

Д. И. САХАРОВ и М. И. БЛУДОВ

ФИЗИКА

ДЛЯ ТЕХНИКУМОВ



Д. И. САХАРОВ и М. И. БЛУДОВ

ФИЗИКА ДЛЯ ТЕХНИКУМОВ

ИЗДАНИЕ ПЯТОЕ

*Допущено Министерством
высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для средних специальных учебных заведений*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1969

*Дмитрий Иванович Сахаров
и Михаил Иванович Блудов*

Физика для техникумов

М., 1969 г., 608 стр. с илл.

Редакторы: *Л. Ф. Верес* и *И. М. Железных*

Техн. редактор *К. Ф. Брудно*

Корректоры: *А. С. Бакулова* и *И. Я. Кришталь*

Печать с матриц. Подписано к печати 10/III 1969 г. Бумага 60×90^{1/16}. Физ. печ. л. 38+1 вкл. Условн. печ. л. 38,125. Уч.-изд. л. 39,01. Тираж 200 000 экз. Цена книги 1 р. 17 к. Заказ № 295.

Издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы,
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 1 «Печатный Двор» имени А. М. Горького Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, г. Ленинград, Гатчинская ул., 26,

2-3-1

46-69

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к третьему изданию	15
Предисловие к первому изданию	16
Глава I. Введение	17
§ 1. Роль техники в народном хозяйстве страны	17
§ 2. Взаимосвязь науки и техники	19
§ 3. Физика — теоретическая основа техники	20
§ 4. Наблюдение и опыт	22
§ 5. Гипотеза и теория	22
§ 6. Содержание и строение курса физики	23
Глава II. Физические величины и их измерение	25
§ 7. Физические величины	25
§ 8. Измерения и расчеты в курсе физики	25
§ 9. Единицы и эталоны мер длины, массы и времени	25
§ 10. Основные и производные единицы. Системы единиц	23
§ 11. Международная система единиц	29
§ 12. Измерительные приборы и способы измерений. Измерение длины	31
§ 13. Измерение массы и веса. Весы	35
§ 14. Измерение времени	35
§ 15. Удельный вес и плотность	37
§ 16. Лабораторная работа № 1. Определение плотности (или удель- ного веса) твердого тела	38
§ 17. Приближенное значение величины и оценка погрешности	39
§ 18. Метод границ при оценке погрешностей	40
§ 19. Приемы приближенных вычислений	41
§ 20. Лабораторная работа № 2. Определение площади поперечного сечения проволоки	43

РАЗДЕЛ I

МЕХАНИКА

Глава III. Основные понятия о механическом движении	46
§ 21. Разделы механики	45
§ 22. Механическое движение	46
§ 23. Движение тела и движение точки	47
§ 24. Поступательное и вращательное движения твердых тел	49
§ 25. Равномерное и неравномерное движения	50
§ 26. Скорость равномерного прямолинейного движения	51
§ 27. Смещение и скорость — векторные величины	51
§ 28. Графики смещения	53

§ 29.	Формула равномерного движения	54
§ 30.	Средняя и мгновенная скорости	55
§ 31.	Равнопеременное движение	57
§ 32.	Ускорение	58
§ 33.	Формулы равнопеременного движения	60
§ 34.	Графики скорости	63
§ 35.	Падение тел и движение тел, брошенных вертикально вверх	64
Глава IV. Законы движения		68
§ 36.	Первый закон Ньютона	68
§ 37.	Взаимодействие тел	69
§ 38.	Силы	70
§ 39.	Равновесие сил	72
§ 40.	Направление силы	73
§ 41.	Второй закон Ньютона	74
§ 42.	Масса тела	75
§ 43.	Единицы силы	77
§ 44.	Вес и масса тела	78
§ 45.	Третий закон Ньютона	80
§ 46.	Реакции связей. Давление тела на опору	82
§ 47.	Невесомость	83
§ 48.	Импульс	84
§ 49.	Реактивное движение	87
§ 50.	Закон независимости действия сил	89
§ 51.	Силы трения	90
§ 52.	Коэффициент трения	91
§ 53.	Значение трения покоя в технике и в быту	92
§ 54.	Трение покоя при качении	93
§ 55.	Лабораторная работа № 3. Проверка второго закона Ньютона	95
Глава V. Элементы статики. Деформации		97
§ 56.	Равнодействующая сил	97
§ 57.	Перенос точки приложения силы в твердом теле	98
§ 58.	Сложение сил	98
§ 59.	Треугольник и многоугольник сил	99
§ 60.	Разложение сил	101
§ 61.	Наклонная плоскость	102
§ 62.	Лабораторная работа № 4. Определение коэффициента трения при помощи угла трения	104
§ 63.	Сложение сил, приложенных к разным точкам твердого тела. Сложение параллельных сил, направленных в одну сторону. Центр параллельных сил	105
§ 64.	Момент силы	106
§ 65.	Равновесие тел, имеющих ось вращения (правило моментов)	107
§ 66.	Пара сил	110
§ 67.	Центр тяжести	112
§ 68.	Равновесие подвешенных и поставленных тел	115
§ 69.	Три вида равновесия	117
§ 70.	Деформации тела	120
§ 71.	Виды деформаций	121
§ 72.	Упругая и пластическая деформации	122
§ 73.	Силы в деформированном теле. Напряжение	122
§ 74.	Абсолютное и относительное удлинение	123
§ 75.	Закон Гука. Модуль Юнга	124
§ 76.	Допускаемое напряжение. Запас прочности	126

Глава VI. Работа, мощность и энергия	123
§ 77. Работа	128
§ 78. Работа силы, направленной под углом к перемещению тела	130
§ 79. Мощность	131
§ 80. Связь мощности со скоростью движения	132
§ 81. Коэффициент полезного действия	133
§ 82. Работа силы тяжести при опускании тела	135
§ 83. Потенциальная энергия поднятого тела	136
§ 84. Кинетическая энергия	137
§ 85. Уравнение кинетической энергии	139
§ 86. Переход кинетической энергии в потенциальную и обратно	140
§ 87. Различие понятий работы и энергии	141
§ 88. Передача энергии от одной системы к другой	141
§ 89. Различные виды энергии	142
§ 90. Закон превращения и сохранения энергии	143
§ 91. Масса и энергия. Закон Ломоносова	145
§ 92. Невозможность создания вечного двигателя	145
Глава VII. Криволинейное и вращательное движения	146
§ 93. Направление скорости при криволинейном движении	146
§ 94. Движение тела, брошенного горизонтально	146
§ 95. Движение тела, брошенного под углом к горизонту	147
§ 96. Вращение твердого тела	149
§ 97. Угловая скорость	151
§ 98. Линейная скорость	152
§ 99. Центробежное ускорение	152
§ 100. Центробежная сила	156
§ 101. Взаимодействие тел, движущихся по окружности	157
§ 102. Формула центробежной силы	160
§ 103. Центробежная сила	162
§ 104. Центробежные механизмы	162
Глава VIII. Всемирное тяготение	164
§ 105. Движение планет	164
§ 106. Закон всемирного тяготения	165
§ 107. Зависимость веса от географической широты	166
§ 108. Поле тяготения	167
§ 109. Искусственные спутники Земли. Космические полеты	168
§ 110. Границы применимости законов классической механики	170
Глава IX. Механические колебания и волны	171
§ 111. Колебательное движение	171
§ 112. Запись колебаний	172
§ 113. Возвращающая сила	173
§ 114. Гармоническое колебание	173
§ 115. Упругие колебания	175
§ 116. Колебания маятника	176
§ 117. Лабораторная работа № 5. Определение ускорения свободного падения с помощью маятника	178
§ 118. Энергия колебаний	179
§ 119. Применение маятника в часах	179
§ 120. Распространение колебаний в среде. Волны	180
§ 121. Поперечные и продольные волны	181
§ 122. Звуковые волны	183

§ 123. Скорость звука	183
§ 124. Наложение волн	184
§ 125. Интерференция волн	184
§ 126. Отражение волн	185
§ 127. Стоячие волны	186
§ 128. Вынужденные колебания. Резонанс	188
§ 129. Высота тона	191
§ 130. Тембр звука	191
Г л а в а X. Основы гидродинамики и аэродинамики	194
§ 131. Гидродинамика и аэродинамика	194
§ 132. Условия, влияющие на движение жидкостей и газов	194
§ 133. Стационарный поток	195
§ 134. Связь между давлением и скоростью в стационарном потоке	196
§ 135. Течение вязкой жидкости по трубам и щелям	200
§ 136. Вихревое движение жидкостей в трубах	201
§ 137. Лобовое сопротивление при движении твердых тел в жидкости	201
§ 138. Подъемная сила крыла самолета	204
§ 139. Винты, вентиляторы, водяные и воздушные двигатели пропеллерного типа	205
§ 140. Суда на подводных крыльях	207

РАЗДЕЛ II

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕПЛОТА

Г л а в а XI. Основы молекулярно-кинетической теории и молекулярные явления в газах, жидкостях и твердых телах	209
§ 141. Природа тепловых явлений	209
§ 142. Молекулы	210
§ 143. Движение молекул	211
§ 144. Межмолекулярные силы	213
§ 145. Движение молекул и температура	215
§ 146. Внутренняя энергия тел в свете молекулярной теории	215
§ 147. Явления на границе жидкость — газ	216
§ 148. Поверхностное натяжение	218
§ 149. Явления в случае искривленной поверхности жидкости	220
§ 150. Явления на границе жидкость — твердое тело	221
§ 151. Капиллярные явления	222
§ 152. Лабораторная работа № 6. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости	224
§ 153. Кристаллическое и аморфное состояния вещества. Строение кристаллов	225
Г л а в а XII. Тепловое расширение твердых тел и жидкостей	228
§ 154. Тепловое расширение	228
§ 155. Коэффициент линейного расширения	229
§ 156. Лабораторная работа № 7. Определение коэффициента линейного расширения	231
§ 157. Коэффициент объемного расширения	231
§ 158. Изменение плотности веществ при изменении температуры.	233

Г л а в а XIII. Свойства газов	234
§ 159. Давление и его единицы	234
§ 160. Плотность газов	235
§ 161. Закон Шарля	236
§ 162. Закон Бойля — Мариотта	237
§ 163. Лабораторная работа № 8. Проверка закона Бойля—Мариотта	239
§ 164. Закон Гей-Люссака	240
§ 165. Применение сжатых газов в технике	241
§ 166. Абсолютный нуль температуры. Абсолютная температура.	245
§ 167. Уравнение газового состояния	246
§ 168. Лабораторная работа № 9. Уравнение состояния газа	248
§ 169. Давление смеси газов	248
§ 170. Идеальный газ	249
§ 171. Объяснение свойств газов молекулярной теорией	249
§ 172. Скорости газовых молекул	251
§ 173. Измерение скорости молекул. Опыт Штерна	251
§ 174. Понятие об адиабатическом процессе в газах	252
Г л а в а XIV. Изменение внутренней энергии тела. Теплота и работа. Теплообмен	255
§ 175. Изменение внутренней энергии тела в процессе совершения работы и при теплообмене	255
§ 176. Количество теплоты как мера изменения внутренней энергии при теплообмене	257
§ 177. Единица количества теплоты	257
§ 178. Теплоемкость тела и удельная теплоемкость вещества	258
§ 179. Измерение удельных теплоемкостей веществ	259
§ 180. Расчет количества теплоты при изменении температуры тела	260
§ 181. Уравнение теплового баланса	261
§ 182. Лабораторная работа № 10. Определение удельной теплоемкости металла	263
§ 183. Удельная теплота сгорания топлива	263
§ 184. Из истории закона сохранения и превращения энергии в механических и тепловых процессах.	265
Г л а в а XV. Изменение агрегатного состояния вещества	268
А. ПЛАВЛЕНИЕ И ОТВЕРДЕВАНИЕ ВЕЩЕСТВ	
§ 185. Плавление и отвердевание	268
§ 186. Переохлаждение жидкостей	269
§ 187. Теплота плавления	270
§ 188. Лабораторная работа № 11. Определение удельной теплоты плавления льда	272
§ 189. Изменение объема при плавлении	272
§ 190. Сплавы и их применение в технике	273
В. ИСПАРЕНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ ВЕЩЕСТВ	
§ 191. Испарение и конденсация	274
§ 192. Насыщение парами	274
§ 193. Испарение различных жидкостей	275
§ 194. Свойства насыщающих паров	276
§ 195. Насыщение парами при различных температурах	277
§ 196. Кипение	278

§ 197. Кипение при пониженном и при повышенном давлении	279
§ 198. Давление насыщающего водяного пара при различных температурах	280
§ 199. Перегретый пар	281
§ 200. Теплота испарения	283
§ 201. Лабораторная работа № 12. Определение удельной теплоты испарения воды	286
§ 202. Влажность воздуха	287
§ 203. Критическая температура	288
§ 204. Сжижение газов	290
Глава XVI. Тепловые машины	292
§ 205. Работа при расширении газа и пара	292
§ 206. Условия, необходимые для работы тепловой машины	294
§ 207. Коэффициент полезного действия тепловых машин	295
§ 208. Двигатель внутреннего сгорания (дизельный)	296
§ 209. Газовая турбина	298
§ 210. Реактивные двигатели	299
§ 211. Теплофикация	302
РАЗДЕЛ III	
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО	
Глава XVII. Электрические заряды	304
§ 212. Предварительные сведения	304
§ 213. Притяжение и отталкивание заряженных тел	306
§ 214. Электризация трением	307
§ 215. Строение атома	308
§ 216. Электростатические явления	310
§ 217. Закон Кулона	310
§ 218. Единицы электрических величин	311
§ 219. Формула закона Кулона. Диэлектрическая проницаемость. Электрическая постоянная	312
§ 220. Электроскоп	314
§ 221. Распределение зарядов на проводниках	314
§ 222. Электризация влиянием	315
§ 223. Притяжение незаряженных тел заряженным телом	317
§ 224. Электрофор	317
§ 225. Появление и исчезновение зарядов	318
Глава XVIII. Электрическое поле	321
§ 226. Поле электрических зарядов	321
§ 227. Электрические силовые линии	322
§ 228. Напряженность электрического поля	323
§ 229. Напряженность электрического поля внутри проводника	324
§ 230. Диэлектрик в электрическом поле	325
§ 231. Работа при перемещении заряда в электрическом поле	326
§ 232. Напряжение. Потенциал	327
§ 233. Единицы напряжения	328
§ 234. Расчет работы перемещения заряда	329
§ 235. Связь между напряженностью и разностью потенциалов	329
§ 236. Емкость конденсатора	330
§ 237. Емкость плоского конденсатора	332

§ 238. Конструкции конденсаторов	331
§ 239. Формула плоского конденсатора	335
§ 240. Батареи конденсаторов	336
§ 241. Энергия заряженного конденсатора	337
Г л а в а XIX. Постоянный электрический ток	339
§ 242. Направление электрического тока	339
§ 243. Роль источника электрической энергии	339
§ 244. Последовательное и параллельное соединения приборов	340
§ 245. Соединение «на землю».	341
§ 246. Условные обозначения	341
§ 247. Величина тока	342
§ 248. Токи при последовательном и при параллельном соединении приборов	342
§ 249. Закон Ома	344
§ 250. Сопротивление проводников	345
§ 251. Расчет сопротивления проводов. Удельное сопротивление.	346
§ 252. Причины различия сопротивлений веществ	348
§ 253. Зависимость сопротивления от температуры	349
§ 254. Реостаты	350
§ 255. Распределение напряжения в цепи	351
§ 256. Сопротивление цепи	352
§ 257. Сопротивление сети	352
§ 258. Определение сопротивления при помощи мостика Уитстона.	353
§ 259. Лабораторная работа № 13. Определение сопротивления проводника мостиком Уитстона	354
§ 260. Сопротивление амперметра и вольтметра	355
§ 261. Электродвижущая сила	356
§ 262. Измерение эдс источника тока	356
§ 263. Последовательное соединение источников тока	358
§ 264. Параллельное соединение источников тока	359
§ 265. Закон Ома для участка цепи, включающего источник электрической энергии	359
§ 266. Напряжение во внешней части цепи	361
§ 267. Закон Ома для полной цепи	362
§ 268. Лабораторная работа № 14. Определение эдс и внутреннего сопротивления элемента	363
§ 269. Лабораторная работа № 15. Последовательное и параллельное соединение проводников	363
Г л а в а XX. Работа и мощность постоянного тока	365
§ 270. Расчет работы и мощности тока	365
§ 271. Мощности, потребляемые приборами, включенными последовательно и параллельно	366
§ 272. Нагревание проводников током	367
§ 273. Закон Ленца—Джоуля	368
§ 274. Лабораторная работа № 16. Исследование зависимости мощности электрической лампы от напряжения на ее зажимах	370
Г л а в а XXI. Явления на границе двух металлов	371
§ 275. Термоэлектрические явления	371
§ 276. Контактная разность потенциалов	373
§ 277. Пьезоэлектрический эффект	376

Глава XXII. Электромагнетизм	379
§ 278. Постоянные магниты	379
§ 279. Взаимодействие токов. Магнитное поле	380
§ 280. Намагничивание железа и стали	381
§ 281. Направление магнитных сил	383
§ 282. Силовые линии магнитного поля	383
§ 283. Структура магнитных полей токов и постоянных магнитов	384
§ 284. Правило штопора	386
§ 285. Действие магнитного поля на ток. Правило левой руки.	387
§ 286. Действие магнитного поля на движущиеся заряженные частицы	388
§ 287. Индукция магнитного поля	388
§ 288. Магнитная проницаемость	390
§ 289. Индукция магнитного поля тока	392
§ 290. Работа магнитных сил. Магнитный поток	394
§ 291. Напряженность магнитного поля	395
§ 292. Магнитные свойства веществ	396
§ 293. Ферромагнетики в переменном магнитном поле	399
§ 294. Гистерезис	400
§ 295. Точка Кюри	401
§ 296. Электромагниты	401
§ 297. Устройство электроизмерительных приборов	402
Глава XXIII. Электромагнитная индукция	404
§ 298. Опыты Фарадея	404
§ 299. Закон Ленца	405
§ 300. Электродвижущая сила индукции	406
§ 301. Правило правой руки	408
§ 302. Электромагнитная индукция при изменении тока	409
§ 303. Токи в сплошных проводниках	409
§ 304. Самоиндукция	410
§ 305. Индуктивность	411
Глава XXIV. Переменный электрический ток	413
§ 306. Что такое переменный ток?	413
§ 307. Получение переменной эдс	413
§ 308. Генератор синусоидального переменного тока	415
§ 309. Действующее (эффективное) значение переменного тока и напряжения	416
§ 310. Активное сопротивление переменному току	418
§ 311. Емкостное сопротивление	419
§ 312. Индуктивное сопротивление	421
§ 313. Лабораторная работа № 17. Определение емкости конденсатора	423
§ 314. Лабораторная работа № 18. Определение индуктивности катушки	424
§ 315. Передача электрической энергии	425
§ 316. Трансформатор переменного тока	425
§ 317. Индукционная катушка	427
Глава XXV. Трехфазный переменный ток	429
§ 318. Что такое трехфазный ток? Получение трехфазного тока.	429
§ 319. График трехфазного тока	431
§ 320. Соединение обмоток генератора трехфазного тока звездой	432

§ 321. Соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении звездой	432
§ 322. Соединение обмоток генератора трехфазного тока треугольником	433
§ 323. Включение потребителей звездой	433
§ 324. Значение нулевого провода	434
§ 325. Включение потребителей в трехфазную сеть треугольником	434
§ 326. Лабораторная работа № 19. Изучение трехфазных цепей при включении ламп звездой и треугольником. Определение соотношений фазных и линейных напряжений и токов	435
§ 327. Вращающийся магнитный поток и его получение	436
§ 328. Понятие об устройстве трехфазного асинхронного двигателя	437
Г л а в а XXVI. Ток в электролитах	440
§ 329. Химическое действие тока	440
§ 330. Ионы в электролитах	440
§ 331. Явления на границе металл—электролит	442
§ 332. Законы электролиза	444
§ 333. Лабораторная работа № 20. Определение электрохимического эквивалента меди	445
§ 334. Заряд иона	446
§ 335. Технические применения электролиза	446
§ 336. Явления в гальваническом элементе	447
§ 337. Поляризация гальванических элементов	449
§ 338. Элемент Лекланше	449
§ 339. Аккумуляторы	450
Г л а в а XXVII. Электрический ток в газах и в вакууме	453
§ 340. Ионы в газах	453
§ 341. Самостоятельная ионизация газа	454
§ 342. Зависимость тока в газах от напряжения	455
§ 343. Разряд с острия	456
§ 344. Искра	457
§ 345. Электрическая дуга	457
§ 346. Электрический ток в разреженных газах	458
§ 347. Катодные лучи	460
§ 348. Электронная лампа	461
§ 349. Кенотрон	462
§ 350. Трехэлектродная электронная лампа	462
§ 351. Электронно-лучевая трубка	463
§ 352. Понятие о плазме. Магнитно-гидродинамический генератор.	465
Г л а в а XXVIII. Свойства полупроводников	467
§ 353. Ток в полупроводниках	467
§ 354. Носители зарядов в полупроводниках	468
§ 355. Односторонняя проводимость. Полупроводниковые выпрямители. Термоэлементы. Холодильники. Фотоэлементы	470
§ 356. Полупроводниковые усилители	472
Г л а в а XXIX. Электромагнитные колебания и волны	474
§ 357. Электромагнитные колебания	474
§ 358. Колебательный контур	474
§ 359. Период электромагнитных колебаний	475
§ 360. Получение электромагнитных колебаний	476
§ 361. Излучение	477
§ 362. Электромагнитные волны	478

§ 363.	Электрический резонанс	
§ 364.	Радиопередача	
§ 365.	Радиоприемник	
§ 366.	Применения радио	

РАЗДЕЛ IV

ОПТИКА

Глава XXX. Источники света. Распространение света

§ 367.	Природа света	
§ 368.	Источники света	
§ 369.	Лучи света	
§ 370.	Скорость света	
§ 371.	Световой поток. Сила света	
§ 372.	Освещенность	
§ 373.	Сравнение сил света двух источников	
§ 374.	Некоторые сведения о гигиене освещения	
§ 375.	Люксметр	

Глава XXXI. Отражение света

§ 376.	Правильное и рассеянное отражение света	
§ 377.	Законы отражения света	
§ 378.	Плоское зеркало	
§ 379.	Вогнутые и выпуклые зеркала	

Глава XXXII. Преломление света

§ 380.	Связь отражения и преломления	
§ 381.	Законы преломления света	
§ 382.	Объяснение явлений преломления и отражения света с точки зрения волновой теории	
§ 383.	Полное отражение света	
§ 384.	Рассеивание света в неоднородных средах	
§ 385.	Плоскопараллельная пластинка	
§ 386.	Лабораторная работа № 21. Определение показателя преломления стекла	
§ 387.	Призма	

Глава XXXIII. Линзы

§ 388.	Формы линз	
§ 389.	Собирающая линза	
§ 390.	Оптическая сила линзы	
§ 391.	Построение изображений, даваемых линзой	
§ 392.	Размер изображения	
§ 393.	Формула линзы	
§ 394.	Лабораторная работа № 22. Определение фокусного расстояния собирающей линзы	
§ 395.	Сферическая аберрация	
§ 396.	Рассеивающая линза	
§ 397.	Проекционный фонарь	
§ 398.	Фотографический аппарат	

Глава XXXIV. Зрение. Оптические приборы	519
§ 399. Устройство глаза	519
§ 400. Аккомодация	520
§ 401. Длительность сохранения зрительного ощущения	520
§ 402. Зрение двумя глазами	521
§ 403. Назначение оптических приборов	522
§ 404. Лупа	523
§ 405. Микроскоп	524
§ 406. Труба Кеплера. Телескоп	526
§ 407. Бинобль	528
Глава XXXV. Волновые свойства света	529
§ 408. Интерференция света	529
§ 409. Длины световых волн	531
§ 410. Дифракция волн	533
§ 411. Дифракция света	534
§ 412. Дифракционная решетка	535
§ 413. Лабораторная работа № 23. Определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки	537
§ 414. Поляризация света	538
Глава XXXVI. Свойства электромагнитных волн различной длины	542
§ 415. Спектр белого света	542
§ 416. Сложение цветных лучей	543
§ 417. Смешивание красок	544
§ 418. Дисперсия света	544
§ 419. Химическое действие света	545
§ 420. Люминесценция	546
§ 421. Невидимые электромагнитные волны	547
§ 422. Рентгеновские лучи	548
§ 423. Обзор электромагнитных волн	552
Глава XXXVII. Излучение и поглощение	553
§ 424. Тепловое излучение твердых тел и жидкостей	553
§ 425. Спектроскоп	555
§ 426. Излучение газов	555
§ 427. Спектры поглощения	556
§ 428. Спектральный анализ	556
Глава XXXVIII. Явления, объясняемые квантовыми свойствами света. Фотоны	558
§ 429. Фотоэлектрический эффект	558
§ 430. Фотоны	559
§ 431. Применения фотоэффекта в технике	561
§ 432. Давление света	564
§ 433. Соотношение Эйнштейна $m = \frac{E}{c^2}$	565

РАЗДЕЛ V

СТРОЕНИЕ АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА

Глава XXXIX. Строение оболочек атома	567
§ 434. Основные этапы познания строения вещества	567
§ 435. Свойства электронов	568
§ 436. Электронные оболочки атомов	569
§ 437. Постулаты Бора. Уровни энергии в атоме	569
§ 438. Химические свойства элементов	572

§ 439. Излучение света атомами	573
§ 440. Избирательное поглощение и усиление электромагнитных волн. Спектры твердых тел и жидкостей	574
§ 441. Лазер	575
Г л а в а XL. Атомное ядро	577
§ 442. Радиоактивные превращения	577
§ 443. Методы изучения атомных частиц	579
§ 444. Опыты Резерфорда с рассеянием альфа-частиц	583
§ 445. Космические лучи	585
§ 446. Машины для получения быстрых атомных частиц	585
§ 447. Строение ядер атомов	588
§ 448. Изотопы	588
§ 449. Ядерные реакции	590
§ 450. Энергия связи протонов и нейтронов в ядре. Дефект массы	591
§ 451. Деление урана и использование атомной энергии	594
§ 452. Разделение изотопов урана	595
§ 453. Ядерный реактор	595
§ 454. Использование изотопов	598
§ 455. Термоядерные реакции	599
§ 456. Ядерные силы. Исследования взаимодействия и превращений элементарных частиц	601
Ответы к упражнениям	605

ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ

Изменение программ и учебных планов средней общеобразовательной и специальной школ и введение в качестве государственного стандарта Международной системы единиц СИ потребовали значительной переработки предыдущего издания «Физики для техникумов».

Настоящее издание приведено в соответствие с программой техникумов, рассчитанной на 280 учебных часов. В соответствии с программой увеличено число лабораторных работ. Увеличено число упражнений. Численные расчеты в тексте и в условиях задач приведены преимущественно в системе СИ.

В новом издании значительно больше внимания уделено описанию примеров применения физических законов в современной технике. В последнем параграфе дается изложение некоторых сведений об элементарных частицах.

Переработка текста книги произведена М. И. Блудовым при участии А. Д. Сахарова и Г. Д. Сахарова. Включен ряд новых глав и параграфов, которые написаны М. И. Блудовым и А. Д. Сахаровым.

Автором глав III—IX, XI—XV, XVII—XXIII, XXI—XXXVII, XXXIX является Д. И. Сахаров. Автором глав I, II, XVI, XXIV, XXV является М. И. Блудов. Автором глав X, XXXVIII—XL является А. Д. Сахаров, при этом значительная часть параграфов в этих главах написана Д. И. Сахаровым. М. И. Блудов составил все описания лабораторных работ и значительную часть упражнений.

Авторы

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

При составлении настоящей книги авторы имели в виду следующие цели курса физики в техникумах: 1) повышение общего уровня развития учащихся, 2) подготовку к изучению специальных технических дисциплин. Кроме того, курс физики в техникумах должен в известной мере подготовить учащихся к работе над повышением квалификации, которую им придется проводить в течение всей их жизни. Поэтому авторы стремились дать учащимся возможно более глубокое понимание сути физических явлений. В книге уделено много внимания молекулярным и электронным представлениям. Авторы стремились также дать правильное понимание энергетических соотношений.

В книге приведено большое число упражнений, частично с технической тематикой, а также пояснения к лабораторным работам. В пояснениях нет рецептурных указаний; сообщив цель работы, они оставляют достаточно места для активности учащихся и при проведении работы, и при оформлении результатов. Соблюдение правил приближенных вычислений и оценка достижимой точности результата считаются обязательными. В книге дано описание 15 работ (вместо 11 по программе); это позволит преподавателю, исходя из местных условий, выбрать наиболее подходящие работы.

М. И. Блудов написал главы I, II и VI книги, составил значительную часть упражнений, все описания лабораторных работ, а также принял активное участие в обсуждении и исправлении текста всего учебника. Остальные главы написаны Д. И. Сахаровым.

Авторы

«Материя есть объективная реальность, данная нам в ощущении...». «Мир есть движение этой объективной реальности...».

В. И. Ленин, Собр. соч., изд. 4, т. 14, стр. 133 и 254.

ГЛАВА I ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Роль техники в народном хозяйстве страны. Наша страна гигантскими шагами идет по пути технического прогресса. Во многих областях техники она обогнала крупнейшие капиталистические страны Европы и Америки.

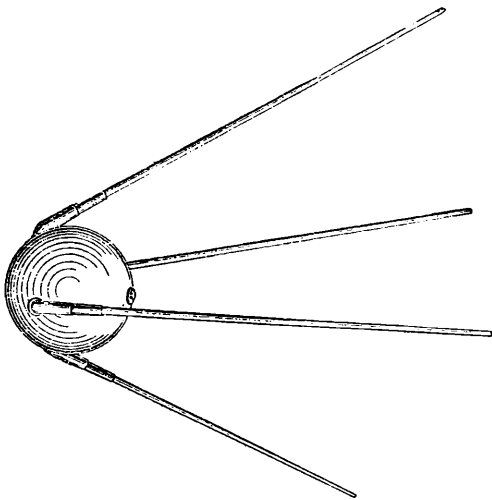


Рис. 1. Первый в мире советский искусственный спутник Земли, запущенный 4 октября 1957 г.

Как результат признанных всем миром успехов нашей страны в развитии ракетной техники начинает превращаться в действительность мечта о полетах в межпланетное пространство: запуски искусственных спутников Земли (рис. 1), запуски космических кораблей с космонавтами на борту и, наконец, выход человека в открытый космос осуществлены уже в СССР.

Советский Союз занимает одно из первых мест в таких областях техники, как ядерная энергетика (рис. 2), автоматика и телемеханика (управление машинами на расстоянии), конструирование быстродействующих вычислительных машин (рис. 3), нашедших широкое применение в различных областях науки, техники и

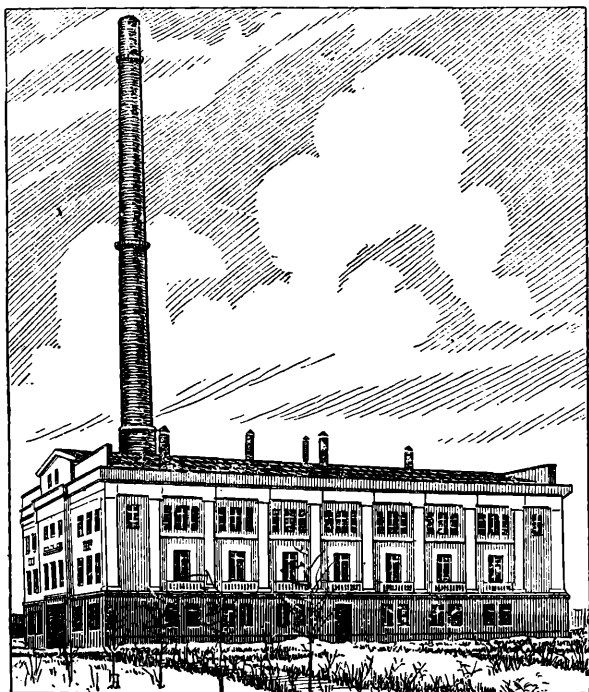


Рис. 2. Общий вид здания атомной электростанции, пущенной в СССР 27 июля 1954 г.

хозяйственной практики, строительство сверхмощных паровых и гидравлических турбин.

В интересах человека преобразуется карта нашей Родины: взрываются горы, изменяется течение рек, проводятся оросительные каналы, создаются новые моря. По газопроводам, протянувшимся на сотни километров, идет природный горючий газ для предприятий, научных лабораторий и для нужд населения. Гигантские электростанции вырабатывают электроэнергию, которая сегодня используется почти в любом производстве, все шире входит и в домашний быт. Одновременно с расцветом техники непрерывно растет благосостояние советского человека.

Величественная программа, принятая на XXII съезде КПСС, определяет нам перспективы невиданного в истории подъема экономического и культурного уровня страны. СССР вступил в период развернутого строительства коммунизма. И в этой программе решающее значение имеет технический прогресс. Выдающаяся роль в осуществлении этих грандиозных созидательных планов принадлежит советской молодежи. Молодым людям, учащимся сейчас в техникумах, предстоит жить и работать в то время, когда намеченные величественные планы станут осуществленной действительностью. Чтобы быть на уровне новых задач, будущие техники и инженеры должны быть теоретически и практически подготовлены к овладению новой техникой в соответствии с достижениями современной науки.

§ 2. Взаимосвязь науки и техники. В своем движении вперед техника использует открытия физики, химии и многих других наук. С другой стороны, развитие техники, вызванное растущими потребностями человеческого общества, побуждает науки к новым открытиям. Новые

технические средства способствуют научному исследованию.

В XVIII в. развитие каменноугольной и металлургической промышленности привело к изобретению паровой машины, а стремление улучшить ее работу, т. е. повысить ее коэффициент полезного действия, способствовало созданию новой науки — термодинамики, являющейся теоретической основой теплотехники.

Практическое применение электрических машин в XIX в. вызвало бурное развитие электротехники; это в свою очередь серьезно продвинуло вперед науку об электричестве.

Научное открытие рождается тогда, когда оно уже подготовлено всем предшествующим ходом развития науки и техники. Научное открытие укрепляется и получает применение только тогда, когда оно отвечает потребностям человеческого общества данной эпохи, когда оно соответствует современному ему способу производства.

Догадки древних философов об атомном строении вещества оставались без применения в течение двух тысячелетий, и только в наше

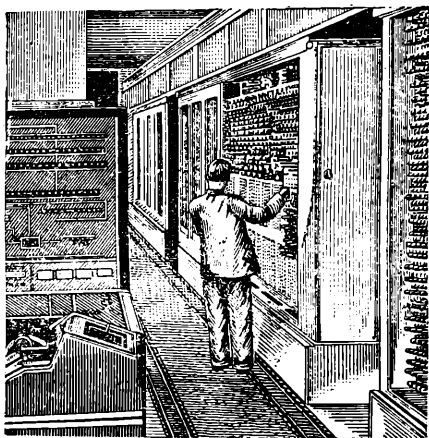


Рис. 3. Большая электронная вычислительная машина, совершающая за секунду 7—8 тыс. арифметических операций.

время учение об атоме, притом в совершенно преобразованном виде, легло в основу атомной физики и атомной техники.

§ 3. Физика — теоретическая основа техники. Из многочисленных примеров, подтверждающих значение физики для техники, приведем два, которые касаются важнейшей задачи техники —

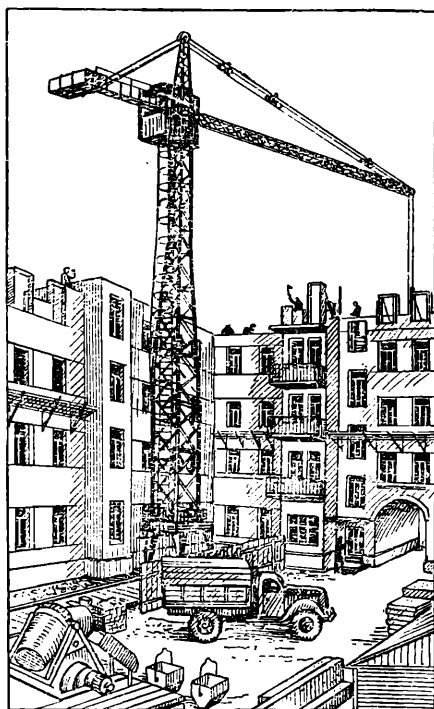


Рис. 4. Механизмы на строительной площадке.

применения машин, использующих все более и более мощные источники энергии, с целью замены малопроизводительного ручного труда.

Рычаг был одним из первых физических открытий человека. Но присмотритесь к механизмам, работающим на любой строительной площадке: подъемные краны (рис. 4), лебедки, блоки — все это не что иное, как сложные разновидности рычага. Трудно, однако, узнать в сложнейших гигантах современной строительной техники их доисторического прародителя. Чтобы подъемный кран не сломался и не опрокинулся под тяжестью поднимаемых грузов, необходим точный расчет, опирающийся на законы физики.

Рассмотрим другой пример. В глубокой древности в Финикии и Греции многие сотни гребцов (рабов), размещенных иногда в несколько ярусов, приводили в дви-

жение большие суда. Впоследствии на смену весельным судам пришли парусные, а с изобретением паровых машин (XVIII в.) — колесные пароходы, и, наконец, стал применяться гребной винт. Современные океанские лайнеры (рис. 5) с мощностью двигателей в десятки тысяч лошадиных сил бороздят океаны со скоростью 60—70 км/час. В недалеком будущем атомная энергия будет двигать суда. Уже спущен на воду первый советский атомный ледокол «Ленин» (рис. 6). Работа всякого рода двигателей, приводящих в движение суда, основана на законах физики.

Какую бы отрасль техники мы ни взяли, в ее основе лежат законы физики. При изучении любой технической дисциплины поэтому требуется знание физики.

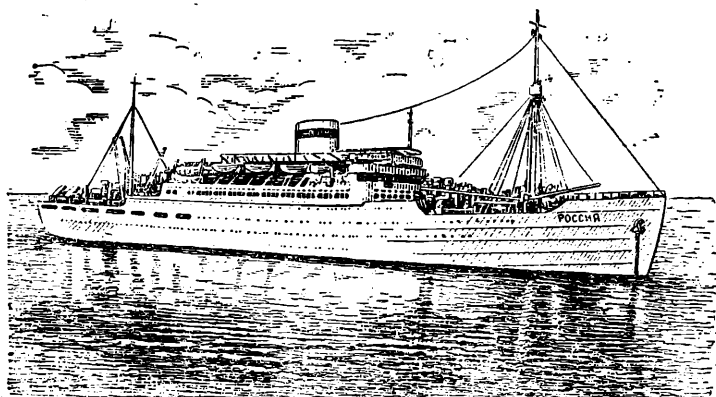


Рис. 5. Современный океанский лайнер.

В учебном плане техникумов физика играет не только общеобразовательную роль; без знания физики невозможно изучение

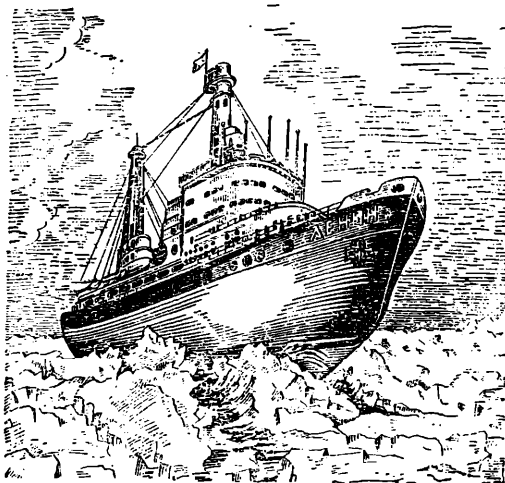


Рис. 6. Советский атомный ледокол «Ленин».

общетехнических учебных предметов: технической механики, электротехники, машиноведения.

§ 4. Наблюдение и опыт. Законами физики пользуются все науки о природе и технике. Само слово «физика» происходит от греческого слова «фюзис» — «природа». Это название дал древнегреческий ученый Аристотель (384—322 гг. до н. э.) одному из своих философских сочинений. Но и задолго до Аристотеля философы задумывались над явлениями природы. Ведь вся жизнь человека зависит от окружающей природы и побуждает его внимательно всматриваться в происходящие вокруг него явления, наблюдать их.

Однако одно наблюдение природы не дает еще ответа на возникающие у человека вопросы. Необходимо выделить явление из множества других, сопутствующих ему, необходимо создать условия, в которых закономерности изучаемого явления станут более отчетливыми, лучше наблюдаемыми. Такого рода наблюдение называется **опытом**, или **экспериментом**. Физика — наука экспериментальная.

Ежедневное наблюдение показывает, например, что снежинки, перышки падают медленно, тогда как за падением камня нельзя даже уследить. Аристотель, не производивший никаких опытов, сделал на основе подобных наблюдений неверный вывод о том, что тяжелые тела падают быстрее легких. Галилей (XVII в.), поставив опыты с падением чугунных ядер с высокой башни, опроверг это ложное мнение и доказал, что все тела падают одинаково. Позже, когда были изобретены воздушные насосы, опыт со свободным падением тел стало возможным поставить более точно. По мере развития науки и техники совершенствовались методы наблюдений, совершенствовалась и техника эксперимента.

§ 5. Гипотеза и теория. На основе наблюдений над явлениями, протекающими в природе или в условиях специально поставленного опыта, ученые выводят заключения о предполагаемой сущности явления, о возможной причине его, о зависимости одних явлений от других. Научно обоснованное предположение о причинах или сущности какого-либо явления или совокупности явлений называется **гипотезой**. Гипотеза дает нам только более или менее вероятное объяснение явления или ряда явлений. Проверка гипотезы на практике, а также применение гипотезы для решения новых задач науки и техники делает гипотезу или более достоверной, или иногда заставляет отказаться от нее как неверной и заменить ее другой.

В течение веков предположение об атомном строении вещества оставалось только догадкой, было гипотезой. В наше время существование атомов и молекул не является более предположением — атомы и молекулы взвешивают, измеряют их скорости, наиболее крупные молекулы удалось даже сфотографировать. Гипотеза превратилась в **теорию**. Теория является формой достоверного

знания, охватывающей группу явлений, объединенных в стройную, лишенную противоречий систему. Достоверность теории следует, однако, понимать относительно. Познавая природу, мы приближаемся все больше и больше к истине. Новые научные открытия пополняют и изменяют теорию и часто приводят к замене старой теории новой, сохраняющей в себе, однако, рациональное зерно старой, т. е. все то, что не противоречит новым открытиям. История физики знает не мало тому примеров. Так, высказанная Ньютоном для объяснения природы света теория светоносных частиц сменилась теорией Гюйгенса о волнообразном колебании эфира, которая в свою очередь уступила место современной электромагнитной и квантовой теории света.

§ 6. Содержание и строение курса физики. В качестве эпиграфа к этой книге мы взяли слова В. И. Ленина, дающие исчерпывающее определение материи. «Материя есть объективная реальность, данная нам в ощущении» — это значит, что под словом «м а т е р и я» мы понимаем всё то, что реально (действительно) существует независимо от нашего сознания, т. е. не является продуктом нашего ума или воображения. Атомы, молекулы, различные тела в твердом, жидком или газообразном состояниях, представляющие собой собрания атомов и молекул, вся «живая» и «неживая» природа — вот разнообразные виды материи. *Материя не создана каким-либо сверхъестественным существом.*

Действуя на наши органы чувств, материя вызывает зрительные, слуховые, осязательные и т. д. о щ у щ е н и я. Мы видим свет, слышим звуки, осязаем предметы, и в нашем сознании возникают о б р а з ы предметов. Но существуют эти предметы независимо от нас, независимо от нашего сознания, от нашего ощущения.

Получаемые через посредство наших органов чувств ощущения служат исходным материалом для м ы ш л е н и я, для образования в нашем сознании п р е д с т а в л е н и й и п о н я т и й. Правильность возникших образов и понятий человек неизбежно проверяет в повседневной жизни. Планмерно, сознательно проводимая проверка есть научный опыт, эксперимент, о котором говорилось в § 4. Определение сущности явлений и установление (открытие) закономерных связей между ними составляет предмет всякой науки.

Физика изучает основные и самые общие изменения материи, изучает ее д в и ж е н и е. Под словом «движение» в широком философском смысле понимается всякое изменение — от простого перемещения до процессов жизни, общественных явлений и актов сознания. *В мире все находится в вечном движении, в постоянном изменении.* Движение есть основное неотъемлемое свойство материи, и мир есть движущаяся материя. Физика изучает простейшие

формы движения, так называемые физические формы движения: механические, тепловые, электрические, световые. Изучение физики проводится в направлении от более простых форм движения к более сложным в такой последовательности:

- 1) механика,
 - 2) молекулярная физика и теплота,
 - 3) электричество,
 - 4) оптика,
 - 5) атомная и ядерная физика.
-

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ИЗМЕРЕНИЕ

§ 7. **Физические величины.** Нам постоянно приходится иметь дело с большими или меньшими количествами каких-либо веществ или материалов, сравнивать расстояния, определять размеры частей сооружений и машин, измерять температуру, отсчитывать время. Все, что может быть больше или меньше, что может быть измерено, называется *в е л и ч и н о й*. Величины, характеризующие с количественной стороны физические явления, называются *ф и з и ч е с к и м и* величинами. Физическими величинами являются, например, длина, масса, время, сила, температура и др.

Точно охарактеризовать величину можно, только измерив ее. Одни словесные сравнения «больше», «меньше» пригодны лишь для приблизительного выражения соотношений между величинами и далеко не всегда достаточны.

Когда-то на Руси летописец записывал сведения о погоде так: «1657 года, 30 января, пяток. День до обеда холоден и вѣдрен, а после обеда оттепелен, в ночи было ветрено». Степень мороза отмечалась характеристиками «мороз мал», «мороз лютый». Сейчас на метеорологических станциях температуру отсчитывают с точностью до $0,1^{\circ}$, для океанографических исследований применяются термометры, позволяющие производить измерения с точностью до $0,01^{\circ}$, а астрономы при помощи очень чувствительных приборов могут измерять даже ничтожное нагревание до $0,000001^{\circ}$ в лучах далеких звезд.

Венецианский купец-путешественник Марко Поло подвергался насмешкам за то, что писал в 1298 г. в своей книге, будто китайцы ежедневно принимают теплые ванны. Венецианцы тогда, очевидно, еще не очень заботились о гигиене, ничего не знали о калориях, понятия не имели о тепловых расчетах, — поэтому им казалось, что для согревания такого количества воды не хватило бы всех лесов Китая. Да и сам Марко Поло, по-видимому, сомневался в возможности такого использования леса и писал, что в качестве топлива для своих бань китайцы употребляют «черные камни» (уголь), чем еще больше смешил своих соотечественников. В наши дни задачу о нагревании воды может решить уже школьник.

В заводских лабораториях ежедневно производится определение calorийности поступающего на заводы угля. Теплотехники ведут учет расхода топлива в гигантских котельных установках с паропроизводительностью свыше 200 тонн пара в час. Подсчитаны исследованные запасы природного топлива. Открываются все новые и новые способы переработки старых и получения новых видов топлива (искусственный бензин, подземная газификация каменного угля и, наконец, атомное горючее).

Еще за 500 лет до нашей эры греческий философ Фалес был знаком с явлением электризации янтаря при натирании его шерстью. Но без измерения такое знание было бесполезно. Современная физика проникла в тайны внутриатомного мира, определила заряд электрона, измерила его массу, раскрыла природу электрического тока. Опираясь на исследования физики, электротехника разработала пути и средства использования электрической энергии. Мощные электростанции вырабатывают миллиарды киловатт-часов энергии.

Измерения и расчеты лежат в основе всех точных наук и их технических приложений.

Очень важно еще отметить, что, пользуясь числом и мерой, мы исходим из признания существования закономерности явлений в мире. Все в мире находится во взаимной связи, все имеет свою естественную причину и свое следствие. Не зная законов природы, не понимая связи явлений друг с другом, человек в далеком прошлом приписывал причину явлений действию сверхъестественных сил, воле богов. И только научное познание мира дает человеку действительную власть над природой, обеспечивает достижения техники.

§ 8. Измерения и расчеты в курсе физики. Во всех разделах технических наук, которые вам предстоит изучать, вы встретитесь с необходимостью производить измерения, делать вычисления и расчеты. На протяжении всего курса физики вы будете знакомиться с явлениями и величинами, находящимися во взаимной связи; число и мера позволят вам понять законы этих явлений.

При выполнении лабораторных работ надо уметь пользоваться различными измерительными инструментами, уметь производить вычисления. Поэтому мы изложим в этой главе первые сведения об основных физических мерах, об устройстве простейших измерительных инструментов, о способах обработки результатов, полученных при измерениях.

§ 9. Единицы и эталоны мер длины, массы и времени. Измерить какую-нибудь величину значит сравнить ее с другой величиной того же рода, принятой за единицу меры. Так, можно измерять длину какой-нибудь определенной длиной, силу — силой и т. д.

В различные эпохи и у разных народов были в ходу различные меры. Таковы, например, египетская стадия, вавилонский локоть, английский фут, русский аршин и многие другие меры.

Развитие международных связей требовало установления единой международной системы мер, которая устранила бы неудобства при обмене и товарами, и научными открытиями. Первая попытка создать меры, пригодные «для всех времен, для всех народов»^{*}), была сделана во время французской революции в конце XVIII в. Положенный в основу метрической системы «метр» должен был, по замыслу французских ученых, равнятьсяся

$\frac{1}{40\,000\,000}$ парижского меридиана и, таким образом, должен был быть навеки связан с размерами нашей планеты. Неоднократно повторенные впоследствии измерения земного меридиана показали, что первый платиновый образец метра, так называемый «архивный метр», оказался немного короче указанной величины.

Эталон длины.
Чтобы избежать необходимости после каждого нового измерения меридиана, при все совершенствующейся технике измерений, менять единицу длины, по международному соглашению решено было считать за

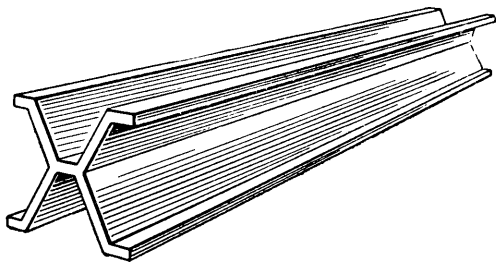


Рис. 7. Эталон метра.

единицу длины расстояние между двумя штрихами, нанесенными на образце (эталоне) метра, хранящемся в Международном бюро мер и весов в Париже. Этот образец, изготовленный из сплава платины и иридия, с целью придания ему большей прочности получил своеобразную форму, в поперечном сечении напоминающую букву X (рис. 7). Расстояние между двумя штрихами на средней внутренней части этого метра с наибольшей возможной точностью соответствует длине архивного метра.

Эталон массы и веса. Основная единица меры массы (количества вещества) — килограмм (1 кг) — есть масса платинового эталона (рис. 8), хранящегося в Париже. С этого образца изготовлены с большой точностью копии для других стран. По мысли французских ученых, творцов метрической системы, килограмм должен быть весом одного кубического дециметра ($дм^3$) дистиллированной воды при температуре ее наибольшей плотности;

^{*}) Девиз, предложенный в проекте медали в честь установления метрической системы в 1799 г.

в действительности вес эталона несколько отличается от этой величины.

Надо также иметь в виду, что во время создания метрической системы не было еще установлено различие между понятиями массы и веса. И сейчас в обыденной жизни не различают эти понятия,

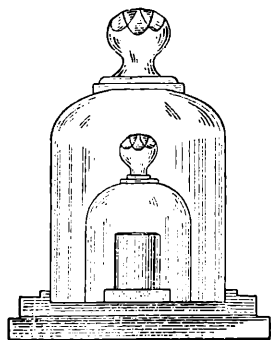


Рис. 8. Эталон килограмма.

объединяя то и другое под общим названием веса. Так, говорят: «Я могу поднять 25 килограммов» (вес), но также говорят: «Сахара в пакете 1 килограмм», хотя в этом случае речь идет не о силе притяжения сахара к Земле, а о количестве его, т. е. о массе. В дальнейшем будет подробно разъяснен физический смысл веса и массы. Сейчас заметим только, что тело большей массы имеет в данном месте во столько же раз больший вес. Прямая пропорциональность между массой и весом позволяет определять массу по весу («отвешивать» некоторое количество вещества). Для различения этих сходных по звучанию единиц мер килограмм-массу обозначают сокращенно *кг*, а килограмм-вес *кГ* или *кгс*

(килограмм-сила)*. Вес — это сила, с которой тело притягивается к Земле. В зависимости от местоположения (географической широты и высоты над Землей) вес тела различен. Поэтому для более точного определения «архивного килограмма» надо указать, что это — эталон веса при так называемом нормальном ускорении свободного падения**). Масса же тела (следовательно, и эталон массы) от местоположения его по отношению к Земле не зависит.

§ 10. Основные и производные единицы. Системы единиц. Метрическая система представляла собой первоначально совокупность единиц для измерения длины и веса (массы), а также площадей и объемов, связанных геометрическими соотношениями с длиной. В 1832 г. математик Гаусс указал, что если принять за основу некоторые произвольные, не зависящие друг от друга единицы длины, массы и времени, то на основании физических соотношений (формул) можно через эти три основные единицы выразить единицы для измерения других физических величин. Так, например, зная, что величина скорости может быть выражена формулой $v = S/t$, можно из основных единиц сантиметра и секунды составить производную единицу для измерения скорости: *см/сек*. В дальнейшем мы

*) В Международной системе единиц «СИ» единица силы — ньютон, равный 0,102 *кГ* (см. § 43). С переходом на эту систему должно исчезнуть смешение понятий веса и массы.

***) За нормальное ускорение свободного падения принимается 9,80665 *м/сек²*.

увидим, как составляются производные единицы измерения других физических величин.

Необходимо помнить, однако, что обозначение производных величин условно. Всякая физическая величина измеряется однородной с ней единицей. Скорость тоже измеряется не метрами и не секундами, а скоростью. В некоторых случаях производные единицы получают самостоятельное название (например, литр вместо дм^3), в других остаются единицами сложного наименования.

Системы единиц, в основу которых положены три единицы — длины, массы и времени, Гаусс назвал абсолютными системами, поскольку выбранные основные единицы не зависят от места и времени их применения. К ним относятся и первые системы механических величин — СГС (сантиметр—грамм—секунда) и МКС (метр—килограмм—секунда). Впоследствии для измерения различных физических величин, встречающихся в разных областях науки и техники, потребовались системы, включающие в себя, кроме метра, килограмма и секунды, еще другие основные единицы. Так, для технических расчетов оказалось удобным ввести вместо единицы массы единицу силы. Такая система называется иногда технической системой и обозначается МКГСС (метр, килограмм-сила, секунда). Для электрических и магнитных величин была принята система МКСА, отличающаяся от механической системы МКС включением четвертой основной единицы — ампера. Специальные основные единицы были приняты при построении систем тепловых и световых величин.

§ 11. Международная система единиц. Развитие науки и техники, особенно в современных условиях с широким применением автоматики, вычислительно-управляющих устройств, выдвинуло требование исключительно высокой точности измерений и единообразия систем единиц.

В октябре 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам в Париже приняла единую Международную систему единиц (СИ — система интернациональная), имеющую целью осуществить единство мер и весов во всех странах мира.

В основу Международной системы положены шесть единиц, указанные в таблице.

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение
Длина	метр	<i>м</i>
Масса	килограмм	<i>кг</i>
Время	секунда	<i>сек</i>
Разность температур	градус Кельвина	$^{\circ}\text{К}$
Сила электрического тока	ампер	<i>а</i>
Сила света	свеча	<i>св</i>

Остановимся пока на новых определениях основных механических единиц системы СИ.

М е т р. Первоначальное определение метра, связанное с естественными размерами нашей планеты, ввиду непостоянства этих размеров, с одной стороны, и постоянно изменяющейся точностью измерений, с другой, заменено новым, основанным на длине световой волны оранжевой спектральной линии излучения атома одного из изотопов криптона (Kr^{86}). Заметим, что переход к новому определению метра не означает изменения величины метра, а повышает точность воспроизведения эталона, так как не зависит от условий и времени хранения его.

К и л о г р а м м. Единица массы — килограмм — представлена массой международного прототипа килограмма.

С е к у н д а. До недавнего времени единица времени — секунда — определялась как $\frac{1}{86\,400}$ средних солнечных суток (сутки = 24 часам, 1 час = 60 минутам, 1 минута = 60 секундам). Однако наблюдения показали, что средние солнечные сутки непостоянны и подвержены нерегулярным колебаниям. Поэтому надо было так же, как это сделано для единиц длины и массы, установить эталон для меры времени, взяв за образец какой-нибудь определенный год. Международный комитет мер и весов в 1956 г. определил секунду как среднюю, выведенную из вращения Земли за три последние столетия. Таким образом, все три основные физические единицы мер — длины, массы и времени — отнесены теперь к вполне реальным эталонам.

В системе СИ секунда определяется как некоторая часть тропического года и не зависит от нерегулярности вращения Земли вокруг оси. Для более точного определения (мы его не приводим) указываются год, день и час, к которому оно относится. Новое определение, однако, не ведет к изменению величины секунды, так как она равна средней продолжительности старой секунды за последние три столетия.

С 1 января 1963 г. система СИ введена в СССР как государственный стандарт (ГОСТ 9867-61) в качестве предпочтительной во всех областях науки, техники и народного хозяйства, а в связи с этим, естественно, и в преподавании.

Для образования дольных и кратных единиц основных величин узаконено применение латинских и греческих приставок (ГОСТ 7663-55). Приводим сокращенную таблицу этих приставок и примеры их применения.

Переход на единую международную систему значительно упрощает изучение физических закономерностей, упрощает выполнение расчетов, устраняет необходимость пользоваться различными переводными множителями при переходе из одной системы в другую.

Кратность и дольность	Наименование приставки	Сокращенное обозначение	Пример
$1000000 = 10^6$ $1000 = 10^3$ $100 = 10^2$ $10 = 10^1$ $0,1 = 10^{-1}$ $0,01 = 10^{-2}$ $0,001 = 10^{-3}$ $0,000001 = 10^{-6}$	мега кило гекто дека деци санти милли микро	<i>М</i> <i>к</i> <i>г</i> <i>да</i> <i>д</i> <i>с</i> <i>м</i> <i>мк</i>	мегом <i>Мом</i> киловольт <i>кв</i> гектоватт <i>гвт</i> декалитр <i>дал</i> дециграмм <i>дг</i> сантиметр <i>см</i> миллиампер <i>ма</i> микрофарада <i>мкф</i>
10^{-12}	пико	<i>п</i>	пикофарада <i>пф</i>

До полного перехода на единую международную систему временно допущены и получившие широкое распространение в практике единицы систем СГС, МКГСС, а также некоторые внесистемные единицы.

Основные механические единицы системы СИ совпадают с единицами системы МКС. Как составляются производные единицы, вы узнаете впоследствии в соответствующих разделах курса. Там же будут даны определения немеханических единиц системы СИ и внесистемных единиц.

§ 12. Измерительные приборы и способы измерений. Измерение длины. Большие расстояния, с измерением которых, например, приходится иметь дело при геодезических (землемерных) работах, съемке планов и т. п., измеряют стальной мерной лентой, разделенной на метры и дециметры. Обмер зданий и внутренних помещений производится рулеткой. При работе с мерной лентой части, меньшие дециметра, определяют на глаз. Ленту (длиной 20 м) откладывают последовательно несколько раз по измеряемой линии, отмечая начало и конец ленты железными шпильками. Вначале весь комплект шпилек (11 или 6) находится у идущего впереди мерщика, который их постепенно расходует, а задний мерщик собирает их. Таким образом, если, например, к концу измерения у заднего мерщика собралось пять шпилек и до последней точки измеряемой линии лента показывает еще 2,4 м, то длина всей промеренной линии $20 \times 5 + 2,4 = 102,4$ м.

Небольшие размеры, скажем, размеры на чертеже или карте, измеряются масштабной линейкой, которая обычно разделена на сантиметры и миллиметры.

Как же измерять малые размеры точнее? Ведь для современной техники точность измерения размеров в миллиметрах совершенно недостаточна. Например, в автомобильных двигателях поршневые

пальцы — стальные полые цилиндрики, соединяющие поршень с головкой шатуна, — обрабатываются с точностью до 4—5 микрон. Микрон (*мк*) равен 0,001 мм. Коленчатый вал автомобиля шлифуется с точностью до 10—15 микрон.

Выполнить деталь совершенно точно невозможно, да в этом нет и необходимости. Важно лишь обеспечить хорошую подгонку деталей и взаимозаменяемость изделий, т. е. возможность замены

износившихся частей машины новыми. Поэтому рабочему разрешается выполнение детали с некоторыми строго определенными отклонениями от теоретических размеров (допусками). Проверка пригодности изготовленной детали производится измерением. Для быстрой и надежной проверки применяются предельные калибры. На рис. 9 изображен такой калибр для проверки валов, представляющий собой двустороннюю скобу, изготовленную из высококачественной стали с очень высокой точностью. Один раствор скобы называется проходным, другой — браковочным. Выбитые на этом калибре числа показывают, что деталь должна проходить через раствор скобы с числом 0,00 и не проходить через раствор 0,017. Номинальное (расчетное) значение диаметра 50 мм. Если измеряемый вал не проходит ни через один из растворов, то, значит, диаметр его слишком велик и надо продолжать обработку (точение или шлифование); если же

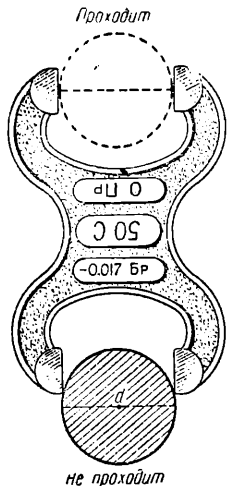


Рис. 9. Предельный калибр $49,983 < d < 50,000$ мм.

вал проходит через оба раствора, то диаметр слишком мал и деталь идет в брак.

Для проверки внутренних размеров отверстий применяются предельные пробки.

Для изготовления деталей различных размеров надо иметь набор калибров или применять раздвижные измерительные инструменты. Рассмотрим два таких прибора, которыми вы будете пользоваться при выполнении лабораторных работ.

Штангенциркуль. Штангенциркуль (рис. 10) позволяет измерять линейные размеры с точностью до 0,1 мм. Он состоит из неподвижной линейки — штанги с нанесенными на ней миллиметровыми делениями — и скользящего по ней движка. На движке имеется небольшая шкала — нониус — с 10 делениями. Каждое деление нониуса на 0,1 мм короче миллиметра. Поэтому, если ножки штангенциркуля сдвинуты вплотную и между ними не зажато никакого предмета, то нулевое (начальное) деление нониуса совпадает с нулем неподвижной линейки, первое деление нониуса

не доходит на 0,1 мм до 1 мм, второе — на 0,2 мм до 2 мм и т. д. Если между ножками штангенциркуля зажать пластинку толщиной 0,1 мм, то все деления нониуса сдвинутся вправо на эту величину, и с отметкой 1 мм на неподвижной линейке совпадет уже первое деление нониуса. При толщине пластинки 0,2 мм нониус сдвинется еще на 0,1 мм и тогда с ближайшим делением линейки совпадет второе деление нониуса.

Рассмотрим пример: чему равен диаметр цилиндра (рис. 10), зажатого в штангенциркуле? Целые миллиметры отсчитываются по неподвижной линейке до нуля нониуса, а излишек десятых долей

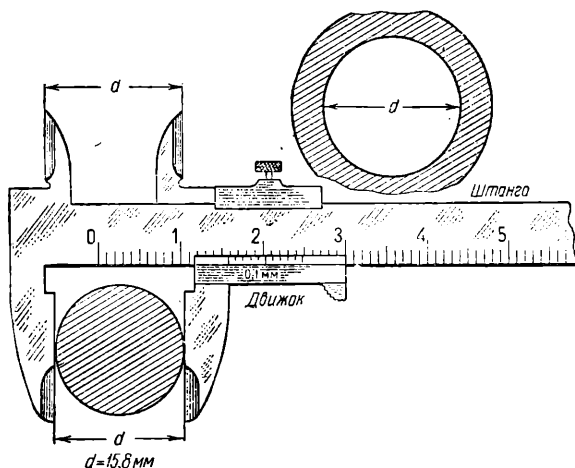


Рис. 10. Штангенциркуль.

миллиметра определится по номеру того штриха нониуса, который совпадет с каким-нибудь делением линейки. В данном случае цилиндр сдвинул нуль нониуса на 15 целых миллиметров и еще на восемь десятых, так как совпадает восьмой штрих. Следовательно, диаметр цилиндра равен 15,8 мм. В некоторых штангенциркулях шкала нониуса делается крупнее, занимая не 9, а 19 мм, но правило отсчета остается тем же.

Нониус применяется не только в штангенциркулях; им снабжены ртутные барометры для точного отсчета высоты ртутного столбика, угломерные геодезические инструменты, в которых нониус, называемый *в е р н ь е р о м*, позволяет производить отсчеты углов с точностью до долей минуты, а также и другие точные приборы.

М и к р о м е т р. Микрометр (рис. 11) позволяет измерять длины с точностью до 0,01 мм. Он состоит из стальной *с к о б ы* и *ш п и н*

деля с винтовой нарезкой. Шаг резьбы обычно делается равным 0,50 мм. Это значит, что, повернув шпиндель на полный оборот, мы отведем его от скобы на 0,50 мм. Шпиндель соединен с барабаном, вращающимся вместе с ним. По окружности барабана нанесены 50 делений. Следовательно, если повернуть барабан не на полный оборот, а лишь на одно деление, то шпиндель отойдет от скобы на 0,01 мм. Внутри барабана имеется гильза, составляющая одно целое со скобой; на гильзе прорезана черта вдоль образующей с делениями по 0,5 мм, причем целые миллиметры расположены ниже черты, а нечетные половинки — выше нее. Чтобы не попортить

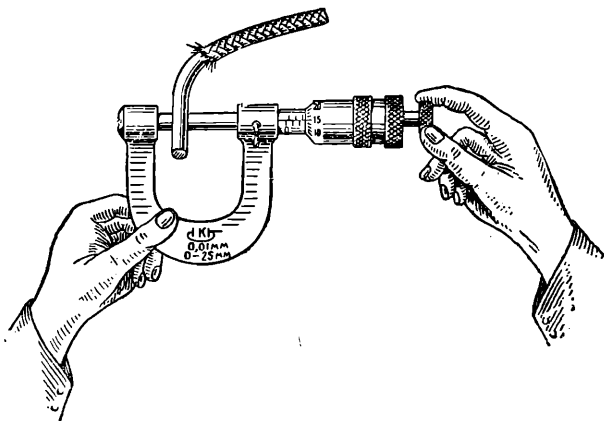


Рис. 11. Измерение диаметра провода микрометром.

измеряемый предмет и не нарушить установку инструмента, барабан надо вращать за крайнюю головку, называемую трещоткой. Как только послышится характерный звук, показывающий, что шпиндель дошел до измеряемого предмета, следует прекратить вращение трещотки и произвести отсчет. Целые миллиметры и их половинки отсчитываются по шкале на гильзе, обнажающейся при отходе барабана, а число сотых долей миллиметра сверх этого показания определяется по тому делению барабана, которое остановится против черты на гильзе. В примере, показанном на рис. 11, отсчет дает 2,65. На том же рисунке видно, что данным микрометром можно измерять диаметры в пределах от 0 до 25 мм.

При помощи микрометра можно измерить даже такие малые величины, как толщину листа бумаги, составляющую 0,02—0,10 мм, толщину человеческого волоса 0,04—0,06 мм (или 40—60 микронов).

Отметим, что при измерении микрометром, равно как и всяким другим измерительным прибором, надо предварительно проверить нуль шкалы. При наличии расхождений в отсчет следует вносить соответствующую поправку.

§ 13. Измерение массы и веса. Весы. Что измеряется при помощи весов: вес или масса? Ответ на этот вопрос зависит от того, о каких весах идет речь. Весы можно разделить в основном на две группы: пружинные весы и весы с гирями (рычажные). Пружинные весы (д и н а м о м е т р ы) основаны на зависимости растяжения пружины от величины приложенной к ней силы (рис. 12). Во сколько раз больше сила, которой растягивается пружина, во столько раз больше и удлинение этой пружины. Вес — это сила притяжения к Земле. Следовательно, пружинные весы измеряют вес подвешенного к ним груза. Опыт показывает, что в различных местах Земли вес одного и того же тела различен. Впоследствии мы покажем, что причиной этого является особая форма нашей планеты и ее вращение вокруг оси. Для данного места Земли вес тела прямо пропорционален массе, но так как в другом месте вес будет другой, несмотря на то, что количество вещества от перемены места, конечно, не изменится, то сказать, пользуясь пружинными весами, какова масса тела, можно только для определенного места. Впрочем, изменения веса в пределах наших обычных перемещений на Земле очень невелики*), и потому в обыденной жизни и в школьной лаборатории ими можно пренебречь.

При помощи рычажных весов измеряют массу. При переносе этих весов в другое место одинаково изменятся и вес взвешиваемого тела, и вес гирь, так что равновесие весов не нарушится. Пользуясь такими весами, мы даже не будем знать об изменении силы притяжения к Земле. Однако, так как единицы веса и массы установлены по одному и тому же эталону, то в этом случае мы можем говорить (но приблизительно) и о том, сколько весит взвешиваемый на рычажных весах предмет.

Из множества различных типов весов остановимся лишь на двух, с которыми нам придется иметь дело при лабораторных занятиях.

1) **Н а с т о л ь н ы е в е с ы** (рис. 13) с предельной нагрузкой 2 кг или 5 кг позволяют производить взвешивание с точностью

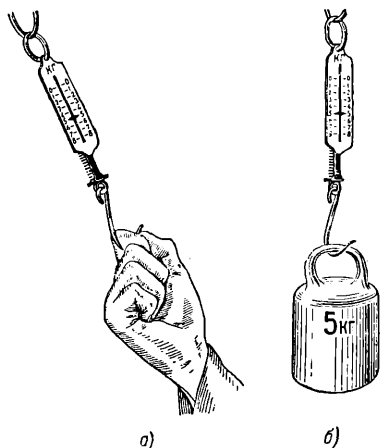


Рис. 12. Применение пружинных весов для: а) измерения силы тяги руки; б) измерения веса.

*) Предмет, весящий 300 кг на экваторе, будет весить приблизительно 301 кг на полюсе.

до 1 Г. Взвешиваемый предмет надо всегда помещать на левую чашку, чтобы правой рукой удобно было подбирать разновески для уравнивания весов. Начи-

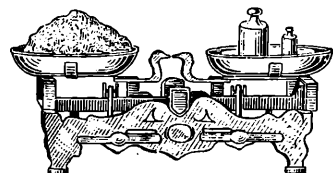


Рис. 13. Настольные весы.

нать подбирать разновески надо с крупных и постепенно переходить к более мелким. Если чашка с гирями перетягивает, то надо сменить большую гирьку на меньшую, но никогда не надо добавлять разновески на левую чашку к взвешиваемому предмету, иначе легко растерять гирьки или ошибиться в подсчете.

2) Технические весы (рис. 14) позволяют в зависимости от их качества измерять весá до 0,1—0,01 Г (максимальная нагрузка до 1 кгГ).

Надо помнить, что разновески следует не брать руками, а пользоваться специально предназначенным для этого пинцетом.

Чтобы быстро находить нужные разновески, меньшие грамма, им придают обычно разную форму (рис. 15).

По окончании взвешивания чашки весов надо опустить до основания (а р р е т и р о в а т ь).

Для еще более точного взвешивания пользуются аналитическими весами, названными так по их применению в аналитической химии. Взвешивание на таких весах — операция более длительная, связанная с некоторыми вычислениями. Описание этих весов мы опускаем.

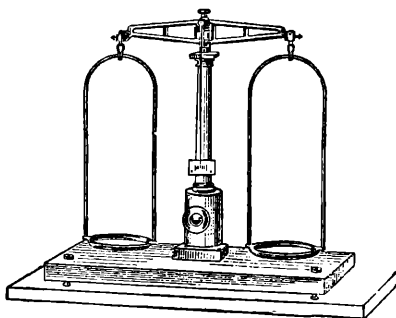


Рис. 14. Технические весы.

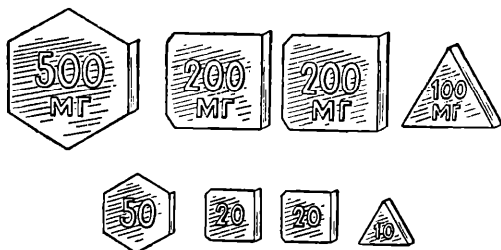


Рис. 15. Полный набор разновесок меньше 1 г.

§ 14. Измерение времени. Для измерения времени мы пользуемся часами. Часы — самый распространенный прибор из при-

меняемых в обыденной жизни. В лабораторной практике вам придется иногда пользоваться секундомером. Секундомер (рис. 16) представляет собой карманные часы с большой секундной стрелкой, которая пускается в ход нажимом на заводную головку. Секундная стрелка делает один оборот за минуту. Для остановки стрелки надо второй раз нажать на головку. Третий нажим возвращает стрелку в нулевое положение.

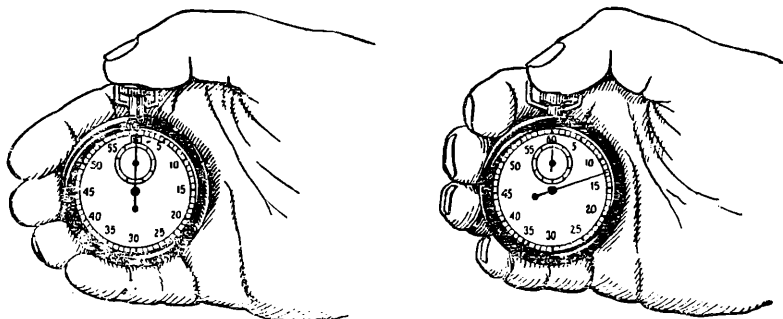


Рис. 16. Секундомер.

Секундомер позволяет производить измерение промежутков времени с точностью до десятых долей секунды. При решении многих научных и технических задач приходится, однако, измерять и более короткие промежутки времени. При работе на радиолокационных установках, в атомных и ядерных исследованиях приходится иметь дело с промежутками времени в тысячные, миллионные и даже миллиардные доли секунды. Столь малые промежутки времени измеряют сложными электронными приборами.

§ 15. Удельный вес и плотность. Из практики известно, что одинаковые объемы различных материалов имеют различный вес, например: лист картона и таких же размеров лист стали, алюминиевая и жестяная кружки и т. д.

Если на одну чашку весов положить свинцовый цилиндр, то на другую для равновесия придется поставить четыре алюминиевых цилиндра того же объема и даже еще добавить небольшой грузик (рис. 17). Это показывает, что свинец в четыре с лишком раза тяжелее алюминия. Для сравнительной оценки различных материалов вводятся понятия удельного веса и плотности.

Удельный вес есть вес, отнесенный к единице объема. Если тело имеет объем, не равный единице, то для нахождения удельного веса надо вес тела разделить на его объем:

$$\gamma = \frac{P}{V}.$$

Здесь γ (греческая буква «гамма») — удельный вес, P — вес, V — объем.

В каких единицах выражается удельный вес? Это зависит от выбора единиц веса и объема. Принято выражать удельный вес в $\Gamma/\text{см}^3$. Численное значение удельного веса останется тем же, если увеличить числитель и знаменатель дроби в 1000 раз, тогда наименование будет $\text{к}\Gamma/\text{дм}^3$, для более крупных весов и объемов удельный вес выражается в $\text{Т}/\text{м}^3$.

Таким образом, можно сказать, что удельный вес алюминия равен $2,7 \Gamma/\text{см}^3$, или $2,7 \text{к}\Gamma/\text{дм}^3$, или $2,7 \text{Т}/\text{м}^3$; удельный вес свинца $11,3 \Gamma/\text{см}^3$ ($\text{к}\Gamma/\text{дм}^3$, $\text{Т}/\text{м}^3$); удельный вес меди $8,9 \Gamma/\text{см}^3$ ($\text{к}\Gamma/\text{дм}^3$, $\text{Т}/\text{м}^3$).

Удельный вес, как и сам вес, в различных местах Земли будет несколько различным. Поэтому, чтобы охарактеризовать вещество вне зависимости от его

местонахождения, вводится понятие *плотности, равной отношению массы тела к его объему*:

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

Здесь D — плотность, m — масса, V — объем.

В системе СИ удельный вес должен выражаться в $\text{н}/\text{м}^3$ (ньютонах на кубический метр), а плотность — в $\text{кг}/\text{м}^3$. Не требуется обязательно выражать размерности физических величин через основные единицы системы в тех случаях, когда расчеты упрощаются применением дольных и кратных, а также допущенных внесистемных единиц. Мы вернемся к этому вопросу после детального ознакомления с системой СИ.

§ 16. Лабораторная работа № 1. Определение плотности (или удельного веса) твердого тела. З н а ч е н и е р а б о т ы. Знание плотности или удельного веса часто позволяет определить, из какого материала изготовлено данное тело. По преданию, Архимед пришел к понятию об удельном весе, пытаясь узнать, из чистого золота или из сплава была сделана корона царя Гиерона.

Гораздо чаще встречается необходимость вычислить массу или вес какого-нибудь тела по его объему и известным плотности или удельному весу. Подобные расчеты часто приходится производить при изучении физики, а в дальнейшем — и технических дисциплин.

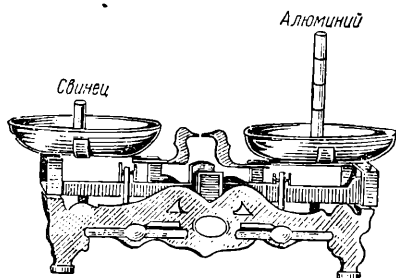


Рис. 17. Четыре алюминиевых цилиндрика весят немного меньше, чем один свинцовый такого же объема.

Например, вам понадобится рассчитать вес стальной балки, массу махового колеса и пр.

Выполнение работы. Обычно для лабораторной работы по определению плотности выбирают тела, имеющие правильную геометрическую форму, например в виде цилиндра, призматических брусочков и т. п. Объем их вычисляется как произведение площади основания на высоту; для цилиндра $V = \frac{\pi a^2}{4} h$, для призмы $V = Bh$ (B — площадь основания, h — высота). Необходимые для вычисления линейные размеры (диаметр, высоту, длину и ширину основания) получают измерением штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. Взвешивание производится с точностью до 0,1 г. Прежде чем производить вычисления, прочтите §§ 17, 18, 19.

§ 17. Приближенное значение величины и оценка погрешности.

Полученные при измерении физических величин результаты не могут быть абсолютно точными. Причина этого заключается в том, что как измеряемый предмет никогда не имеет идеальной математически правильной формы, так и измерительные приборы имеют некоторую погрешность, и, наконец, неточность измерений зависит и от самих наблюдателей.

Проделайте такой опыт: начертите на бумаге отрезок прямой линии, в котором содержалось бы нецелое число сантиметров, и предложите трем-четырем учащимся измерить длину отрезка линейкой с сантиметровыми делениями (без мм), а десятые доли сантиметра оценить на глаз. Результат измерения каждый пусть запишет на бумажке и не объявляет до того, пока измерение не будет закончено всеми. Затем сличите записи. Наверняка результаты не совпадут, отличаясь один от другого на одну-две десятых сантиметра. Тем более можно ожидать расхождения в результатах измерений какого-либо предмета — цилиндра, брусочка и т. п. От того, как приложена линейка, по какому диаметру зажат в штангенциркуле или микрометре цилиндр, могут получаться различные результаты.

Какое же измерение считать наиболее точным? У нас нет никакого основания отдать предпочтение какому-нибудь одному измерению, если все они производились аккуратно, с соблюдением правил пользования соответствующим инструментом. Поскольку отклонения от истинного значения могли быть и в ту, и другую сторону, наилучшим результатом будет **среднее арифметическое** из всех результатов измерений.

Отклонение приближенного значения величины от ее точного значения называется **абсолютной погрешностью**. Но так как точное значение нам не известно, то за абсолютную погрешность измерения мы принимаем отклонение его результата от среднего значения, полученного из нескольких (трех-четырех)

измерений. Так, если при измерении длины бруска были получены результаты: $l_1 = 15,3 \text{ см}$, $l_2 = 15,8 \text{ см}$; $l_3 = 15,4 \text{ см}$, то

$$l_{\text{ср}} = \frac{15,3 + 15,8 + 15,4}{3} = 15,5 \text{ см.}$$

Абсолютные погрешности отдельных измерений Δl (Δ — греческая буква «дельта»): $\Delta l_1 = -0,2 \text{ см}$; $\Delta l_2 = +0,3 \text{ см}$; $\Delta l_3 = -0,1 \text{ см}$.

Средняя абсолютная погрешность

$$\Delta l_{\text{ср}} = \frac{0,2 + 0,3 + 0,1}{3} = 0,2 \text{ см.}$$

Почему при вычислении средней абсолютной погрешности значения погрешностей отдельных измерений берутся все со знаком $+$, хотя случайные погрешности равновероятны как в ту, так и в другую сторону? Взятие всех этих погрешностей с одинаковым знаком соответствует самому неблагоприятному, но все же возможному случаю. Точность результата будет тогда уж во всяком случае не ниже вычисленной. Если же мы взяли бы все отклонения от среднего с указанными выше знаками плюс и минус, то в сумме получили бы нуль и пришли бы к неверному выводу, что среднее значение $15,5 \text{ см}$ дает абсолютно точное значение длины бруска.

Абсолютная погрешность недостаточна для полной характеристики качества измерения. Погрешность в 1 см при измерении длины рельса в 12 м составляет только $0,08\%$ его длины, но та же погрешность при измерении бруска в 12 см будет уже грубой (8%). Отношение абсолютной погрешности к среднему значению, полученному из нескольких измерений, называется относительной погрешностью. Она обычно выражается в процентах (%). В вышеприведенном примере относительная погрешность δ *)

$$\delta = \frac{0,2 \text{ см} \cdot 100\%}{15,5 \text{ см}} = 1,3\%.$$

В ученических лабораторных работах допускается точность $3\text{--}5\%$, а в некоторых более грубых работах — и до 10% .

§ 18. Метод границ при оценке погрешностей. Если измерения делаются одним лицом и отдельные измерения случайно получаются одинаковыми, то все же нельзя считать полученный результат абсолютно точным. Результаты измерения могут отклоняться от истинного значения в ту или другую сторону. Значение величины, взятое с некоторым превышением (в зависимости от точности прибора), называется ее верхней границей, взятое с недостатком — нижней. Например, допустим, что при измерении диаметра болта штангенциркулем мы получили $17,8 \text{ мм}$. Точность определе-

*) δ — строчная греческая буква «дельта».

ния размеров штангенциркулем равна 0,1 мм. Совпадение 8-го деления нониуса с делением неподвижной шкалы нам кажется наиболее точным, но если присмотреться, то 7-е и 9-е деления нониуса тоже почти совпадают с делениями линейки. Мы даже сомневаемся иногда, на каком делении остановиться. Поэтому результат измерения можно записать: $17,8 \pm 0,1$ мм. Истинный диаметр заключен между 17,7 и 17,9 мм. 17,7 мм — нижняя его граница, 17,9 мм — верхняя. Так же находим границы, в которых заключается высота цилиндра и, наконец, его вес (или масса). Подставляя в формулу удельного веса $\gamma = \frac{P}{V}$ значение объема $V = \frac{\pi d^2}{4} h$, получим

$$\gamma = \frac{P \cdot 4}{\pi d^2 h}.$$

Очевидно, наибольшее значение $\gamma_{\text{верх}}$ (верхняя граница) получится, если взять наибольшее значение веса (числитель) и наименьшие значения диаметра и высоты (знаменатель). Если же взять наименьшее значение веса и наибольшие значения диаметра и высоты, мы получим наименьшее значение $\gamma_{\text{нижн}}$ (нижняя граница). Допустим, что $\gamma_{\text{верх}} = 2,87 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$, $\gamma_{\text{нижн}} = 2,79 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$. Находим среднее значение

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{\gamma_{\text{верх}} + \gamma_{\text{нижн}}}{2} = 2,83 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}.$$

Максимальное отклонение равно половине разности между границами:

$$\Delta\gamma = \frac{\gamma_{\text{верх}} - \gamma_{\text{нижн}}}{2} = 0,04 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}.$$

Окончательно находим:

$$\gamma = \gamma_{\text{ср}} \pm \Delta\gamma = 2,83 \pm 0,04 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}.$$

Относительная погрешность

$$\delta_{\gamma} = \frac{\Delta\gamma \cdot 100\%}{\gamma_{\text{ср}}} = \frac{0,04 \cdot 100\%}{2,83} = 1,4\%.$$

§ 19. Приемы приближенных вычислений. Приближенные значения величин позволяют значительно упростить вычисления с ними. В математике дается подробный разбор приемов приближенных вычислений. Ограничимся здесь лишь краткими замечаниями.

«Сколько десятичных знаков оставлять в результате?» — спрашивают обычно учащиеся. Дело тут не в числе десятичных знаков, а в числе значащих цифр, считая и целую и дробную

часть. Числа 25, 2,5 и 0,25 имеют по две значащие цифры, и если они получены в результате измерений с точностью соответственно до 1, 0,1 и 0,01, то относительная погрешность всех этих величин будет одной и той же:

$$\delta = \frac{1 \cdot 100\%}{25} = \frac{0,1 \cdot 100\%}{2,5} = \frac{0,01 \cdot 100\%}{0,25} = 4\%$$

хотя число десятичных знаков у каждого из чисел разное.

Чем меньше значащих цифр (ноль в середине числа считается тоже значащей цифрой), т. е. чем число короче, тем выражение грубее. Например, если длина прямоугольной пластинки составляет 32,3 см (три цифры), а ширина — 8,4 см (две цифры), то, хотя оба числа даны до десятых долей сантиметра, ширина измерена грубее. Предлагаем учащимся самим определить относительную погрешность той и другой величины.

Правило определения числа цифр при вычислении с приближенными величинами. Число значащих цифр в окончательном результате надо брать равным числу значащих цифр в наименее точном, т. е. в самом коротком, числе в исходных данных. В промежуточных (не последнем) вычислениях берется на одну цифру больше, чем в окончательном результате.

Это правило легко понять и легко запомнить. Точность результата зависит от точности исходных данных. Сколь ни точно измерены некоторые из входящих в расчет величин, но если среди них окажется хотя бы одна более грубо измеренная величина, то вся точность остальных сведется на нет.

Приведем интересный пример *). Служащий одного музея уверял, что хранящаяся в этом музее статуя создана 4008 лет назад, и доказывал это лицам, сомневающимся в возможности столь точного определения «возраста» статуи, следующим образом. «Когда я поступил на службу в музей, директор музея сказал мне, что статуе 4000 лет. Я служу в музее уже 8 лет, значит теперь статуе 4000 + 8 = 4008 лет». Служащий, очевидно, не понимал, что число 4000 — приближенное, имеющее одну надежную значащую цифру (4). Сумму 4008 надо, следовательно, округлить, сохраняя в ней только одну цифру тысяч, что даст опять то же число 4000. Служащий мог служить в музее не 8, а 80 лет, и все же возраст статуи оставался бы 4 тысячи лет.

Сделаем небольшой расчет, поясняющий вышеприведенное правило. Пусть надо найти площадь пластинки размерами 32,3 × 8,4 см². Последняя цифра в длине и ширине пластинки — приближенная

*) Проф. В. М. Б р а д и с, Средства и способы элементарных вычислений, Изд. АПН РСФСР, 1948.

(ненадежная). Будем производить умножение, подчеркивая при этом ненадежные цифры:

$$\begin{array}{r} \times 32,3 \\ 8,4 \\ \hline 1292 \\ 2584 \\ \hline 271,32 \end{array}$$

Видно, что нет никакого смысла писать десятые, а тем более сотые доли, если ошибка заключается уже в целых разрядах. Таким образом, площадь пластинки примерно равна 270 см^2 . Это можно было предвидеть и по исходным данным: число 8,4 — самое короткое (две значащие цифры), следовательно, и результат должен иметь две значащие цифры, причем уже вторая из них сомнительна.

Не следует смешивать число значащих цифр с числом разрядов: результат 270 см^2 , а не 27 см^2 .

Если некоторым учащимся кажется, что выписать все цифры — 271,32 — будет все же точнее, то это лишь самообман. В этих цифрах не больше смысла, чем в приписанных к ним справа новых цифрах, взятых просто из головы. Известный русский педагог-физик А. В. Цингер такую «точность» называл «нечестным обращением с величинами».

Польза приведенного правила (оно неприменимо при сложении и вычитании) особенно заметна, когда вычисление состоит не из одного, а из нескольких действий. Округляя результаты согласно приведенному правилу, мы сэкономим много труда и несколько не погрешим против точности.

Применяйте это правило и при решении задач.

§ 20. Лабораторная работа № 2. Определение площади поперечного сечения проволоки *).

Значение работы. При монтаже электрических приборов и установок приходится подбирать провода соответствующих поперечных сечений. Это зависит от величины тока, который должен проходить через данный провод. Если взять провод слишком малого сечения, то он может сильно нагреться, в результате чего пострадает его изоляция. Слишком же толстые провода удорожают проводку.

Тонкие проволоки маркируются по их диаметру, провода же осветительной и силовой сетей изготавливаются с определенными площадями сечения: 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50 мм^2 .

Как же определить площадь поперечного сечения круглого провода? Площадь поперечного сечения провода есть площадь круга.

* В программе техникумов эта работа не значится. Преподаватель может использовать ее как дополнительную после проведения работы № 1 либо же для устного опроса на классных занятиях.

Эту площадь можно вычислить по формуле (доказательство дается в курсе геометрии)

$$S = \frac{\pi d^2}{4},$$

где d — диаметр, а π — постоянный коэффициент, равный приблизительно 3,14. Таким образом, площадь круга немного больше $\frac{3}{4}$ площади описанного около круга квадрата ($\frac{1}{4}$ приходится на обрезки, показанные штриховкой на рис. 18).

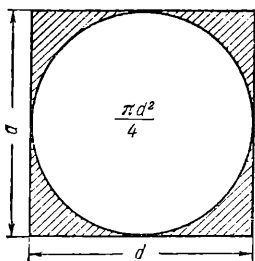


Рис. 18.

Выполнение работы. Измерение диаметра провода производится микрометром. Вследствие неодинаковой толщины провода в разных местах надо сделать два-три измерения и взять из них среднее арифметическое.

Полученный при измерении диаметр является приблизительным, поэтому и вычисление площади даст приближенный результат. Точность результата не может быть

больше точности измерения исходных величин, в данном случае диаметра. Микрометр имеет точность 0,01 мм. Пусть диаметр оказался $d = 2,71$ мм. Окончательный результат будет иметь три значащие цифры: $S = 5,75$ мм².

Учитывая стандарты изготавливаемых промышленностью проводов, можно заключить, что это провод с сечением 6 см³.

Упражнения

1. Определите по рис. 19 длину штифта mn в миллиметрах. Число десятых долей миллиметра оцените на глаз по изображению в лупе (деления около

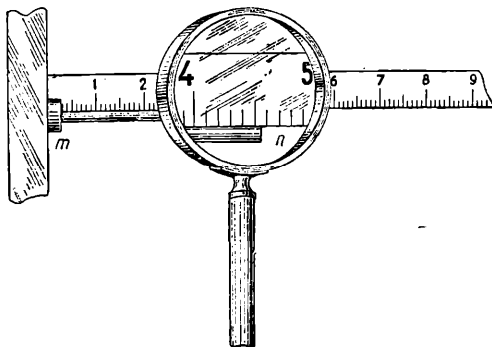


Рис. 19. При помощи лупы увеличивается точность отсчета.

3 и 5 мм закрыты краями лупы). Предварительная проверка нуля была проведена.

2. Прочтите показания микрометра по рис. 20 (изображена только счетная часть прибора).

3. В старину для измерения веса пользовались безменом (рис. 21). Что измеряли при помощи безмена: вес или массу? Дайте объяснение.

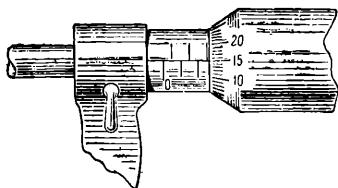


Рис. 20.

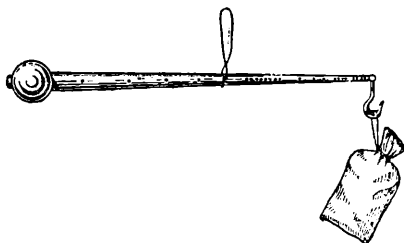


Рис. 21. Старинный безмен.

4. Определите среднюю абсолютную и относительную погрешности измерения диаметра болта, если три последовательных измерения дали следующие результаты: 12,52 мм, 12,48 мм и 12,51 мм.

5. Имеет ли смысл запись результата при определении удельного веса алюминия в учебной лабораторной работе в виде $\gamma = 2,7348 \text{ Г/см}^3$, если измерения веса и объема производились с точностью до 1%?

6. Определяя площадь участка леса на плане, бригада учащихся получила результат $457\,331 \text{ м}^2$. Имеет ли смысл такая «точность», если планиметр (прибор для определения площадей на плане) имеет относительную погрешность 0,25%? Как следует записать результат?

7. Сколько весит лист стали размерами $140 \times 70 \text{ см}^2$ и толщиной 0,5 мм, если удельный вес стали $7,5 \text{ Г/см}^3$?

8. Пробка объемом 6 см^3 весит 1,2 Г. Сможете ли вы поднять 1 м^3 пробки?

9. Найдите массу махового чугунного колеса по чертежу (рис. 22); спицы и ступица колеса составляют 25% общей массы этого колеса, удельный вес

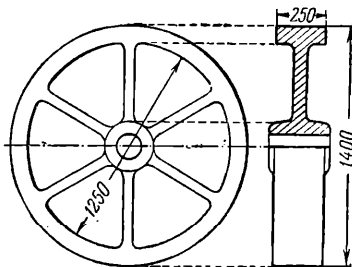


Рис. 22.

чугуна равен $7,7 \text{ Г/см}^3$. (На машиностроительных чертежах размеры деталей всегда даются в миллиметрах и наименования не ставятся.)

10. На какое расстояние можно протянуть электрический провод (голый медный) сечением 10 мм^2 , если имеется моток этого провода весом $10,7 \text{ кг}$?

РАЗДЕЛ I

МЕХАНИКА

ГЛАВА III

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О МЕХАНИЧЕСКОМ ДВИЖЕНИИ

§ 21. Разделы механики. Учение о механическом движении, т. е. о взаимном перемещении тел, — м е х а н и к а — самая старая область физики. Возникновение и развитие механики было связано с разнообразными потребностями человека: со строительством зданий и различных сооружений, с созданием машин, с мореплаванием, с различными военными задачами.

Механика, возникшая еще в древности, особенно быстро начала развиваться в XV—XVII вв. Развитие механики продолжается и в наше время, о чем говорят поразительные успехи авиации, запуск искусственных спутников и космических ракет.

Механика состоит из следующих разделов:

1. К и н е м а т и к и, или учения об описании механического движения. В кинематике изучаются различные движения, но не рассматриваются причины, от которых зависит характер движения.

2. Д и н а м и к и, или учения об условиях, при которых имеет место то или иное движение. Учения о движении жидкостей и газов называются соответственно г и д р о д и н а м и к о й и а э р о д и н а м и к о й.

3. С т а т и к и, или учения о равновесии тел, т. е. учения об условиях, при которых тела остаются в покое (или скорости их не меняются). Учения о равновесии жидкостей и газов называются соответственно г и д р о с т а т и к о й и а э р о с т а т и к о й.

§ 22. Механическое движение. В главе I было указано, что под словом «движение» можно понимать любое происходящее в природе изменение. Обратимся к изучению простейшего вида движения — механического. *Механическим движением называется изменение с течением времени расстояний между телами или между частями тел.* Мы говорим, например, о механическом движении, когда конькобежец скользит по льду или когда мельничный жернов вращается на валу: в первом случае меняется расстояние между

конькобежцем и, например, линией старта; во втором случае меняется расстояние между какой-либо определенной точкой жернова и любой стеной помещения. Из этого определения следует, что понятие механического движения относится непременно к двум или ко многим телам, но не к одному телу. Чтобы яснее понять это, представим себе, что на совершенно спокойной поверхности воды в пруде находятся две лодки *A* и *B*. Пусть по какой-либо причине не видно ни дна, ни берегов. Тогда единственное, о чем мы можем судить, — меняется ли расстояние между лодками. Если оно меняется, то мы говорим, что лодки движутся одна относительно другой; в противном случае мы говорим, что лодки покоятся друг относительно друга. Одну из лодок, например *A*, мы можем считать неподвижной, и тогда можно говорить о движении лодки *B* относительно лодки *A*. Вместо этого мы можем считать неподвижной лодку *B* и говорить о движении лодки *A* относительно лодки *B*.

Тело, которое мы принимаем при изучении какого-либо движения за неподвижное, называется телом отсчета. Таким образом, та из лодок, которую мы сочли неподвижной, выбрана нами за тело отсчета. Какую же из лодок следует выбрать за тело отсчета? Если лодки одинаковы и одинаково нагружены, выбор, вообще говоря, безразличен. Но если одна из лодок значительно больше другой и больше нагружена, то естественно выбрать в качестве тела отсчета менее подвижную лодку с большим грузом, т. е. тело с большей массой. Если различие в массах будет еще больше, — например, небольшой лодки и баржи, — то выбор баржи в качестве тела отсчета станет еще более очевидным. Наконец, если видны берега, то следует выбрать за тело отсчета Землю; масса Земли в громадное число раз больше масс как лодки, так и баржи. При изучении движений тел, находящихся вблизи поверхности Земли, — машин, самолетов, пуль, искусственных спутников, — в качестве тела отсчета обычно пользуются поверхностью Земли или любым телом, жестко с ней связанным, например полом и стенами комнаты, в которой изучается движение.

Итак, запомним: *механическое движение есть изменение расстояния тела от тела отсчета, принимаемого нами за неподвижное.* В дальнейшем, если не указывается, какое именно тело принято за тело отсчета, им надо считать поверхность Земли.

У п р а ж н е н и е

11. На рис. 23 изображен р у ч н о й л а г — прибор для измерения скорости корабля. Определение скорости корабля производится счетом узелков л а г л и н я, который сбегает с в ь ю ш к и за полминуты. Что является телом отсчета при определении скорости корабля?

§ 23. Движение тела и движение точки. Рассмотрим падение подпиленного столба (рис. 24). При падении верхняя точка столба

опишет длинную дугу, точка вблизи середины столба опишет меньшую дугу, а нижняя точка почти не сдвинется. Чтобы определить движение всего столба в целом, надо указать, как движутся отдельные его точки. Поэтому изучение механики и начинают с изучения движения одной точки.

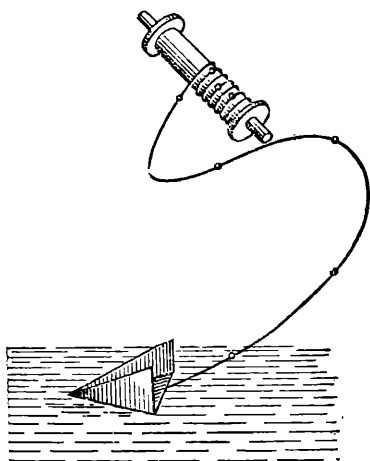


Рис. 23. Ручной лаг.

поршня, движущегося взад и вперед в цилиндре машины, — примеры прямолинейного движения. Движение любой точки экипажа, передвигающегося по ухабистой дороге, — пример криволинейного движения. Наиболее простой и важный случай криволинейного движения — движение по окружности.

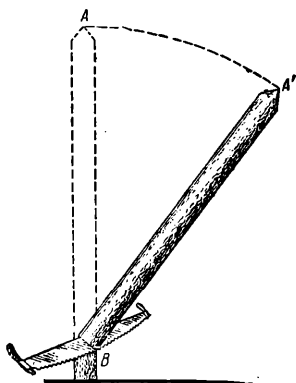


Рис. 24. Верхний конец падающего столба описывает длинную дугу AA' ; нижний конец B почти не сдвигается.

Линия, которую описывает точка при движении тела, называется траекторией точки. Длина отрезка траектории между двумя положениями точки в начале и в конце некоторого отрезка времени называется длиной пути точки, а расстояние между этими положениями называется смещением точки (рис. 25).

Движение точки называется прямолинейным, если ее траектория — прямая линия, и криволинейным, если траектория — кривая. Движение любой точки иглы швейной машины или

траектория — кривая. Движение любой точки иглы швейной машины или траектория — кривая. Движение любой точки иглы швейной машины или траектория — кривая. Движение любой точки иглы швейной машины или траектория — кривая.

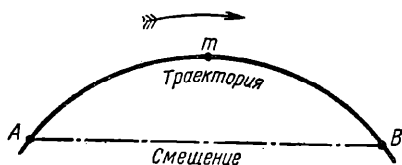


Рис. 25. Точка t движется от A к B ; длина дуги AB — пройденный путь; хорда AB — смещение точки.

Отметим, что при прямолинейном движении в одном и том же направлении понятия пути и смещения совпадают.

У п р а ж н е н и е

12. Колесо вагона катится по прямому пути. Начертите траектории произвольной точки на ободу колеса, приняв за тело отсчета: а) полотно дороги; б) корпус вагона; в) само колесо.

§ 24. Поступательное и вращательное движения твердых тел. Часто можно наблюдать такое движение твердого тела, при котором все точки тела (например, точки C и D на рис. 26) движутся по одинаковым траекториям. Так движется пила при пилке дров, кузов автомобиля на дороге без поворотов и т. п. Движение твердого тела, при котором все его точки движутся одинаково, называется **поступательным движением**. Легко видеть, что при поступательном движении тела любая прямая, мысленно проведенная в теле, во время движения остается параллельной своему начальному направлению (например, на рис. 26 $AB \parallel A'B' \parallel A''B''$).

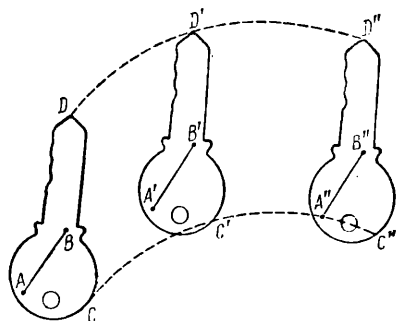


Рис. 26. Поступательное движение ключа.

Из этого определения следует, что для характеристики поступательного движения тела достаточно указать, как движется какая-либо одна из его точек.

Второй вид движения твердого тела — **вращательное**. При вращательном движении траектории точек тела — окружности, центры которых лежат на общей прямой (оси вращения). Ось вращения перпендикулярна к плоскостям, в которых лежат траектории точек тела.

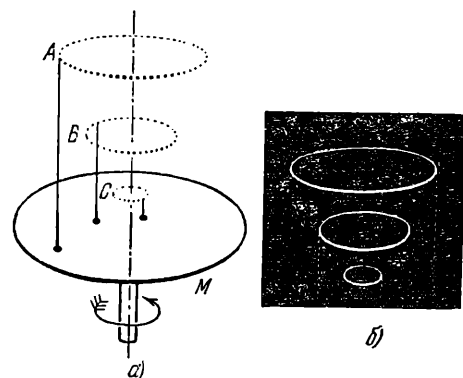


Рис. 27. а) К вращающемуся диску M прикреплены лучинки A , B и C , концы которых тлеют; б) траектории концов лучинок (в темноте).

Примерами вращательного движения являются движения маховичка швейной машины, движение патефонной пластинки и т. п. Вращательное движение можно иллюстрировать таким опытом. К доске, которая может вращаться около оси, прикрепляют несколько лучинок с тлеющими концами (рис. 27). При быстром

вращения доски в темноте видны окружности, по которым движутся концы лучинок (рис. 27). В отличие от поступательного движения, при вращении тела движения разных его точек различны.

В природе и технике часто встречаются движения, которые можно представлять в виде сочетания поступательного и вращательного движений (например, движение колес поезда относительно поверхности Земли).

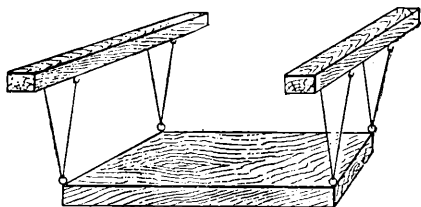


Рис. 28.

У п р а ж н е н и е

13. Какими движениями являются: а) движение качелей; б) движение штопора, винчиваемого в пробку; в) качания тела, подвешенного на восьминитном подвесе (рис. 28)?

§ 25. **Равномерное и неравномерное движения.** По одной и той же траектории, например по прямой линии, можно двигаться по-разному. На рис. 29 показан ряд положений движущегося велосипедиста через равные промежутки времени, в данном случае через секунду. Видно, что в первые 4 секунды расстояния, проезжаемые велосипедистом в равные промежутки времени, все увеличиваются. Это — у с к о р е н н о е движение. Затем в течение 8 секунд велосипедист движется р а в н о м е р н о.

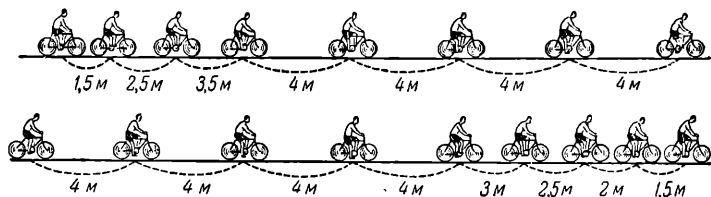


Рис. 29. Велосипедист движется сначала ускоренно, затем равномерно, и наконец, замедленно.

При равномерном движении тело проходит за равные промежутки времени одинаковые расстояния.

Последние 4 секунды расстояния, проезжаемые за секунду, все уменьшаются. Это — з а м е д л е н н о е движение.

Самым простым случаем движения точки является равномерное прямолинейное движение. Строго равномерные движения не встречаются ни в природе, ни в технике. Однако очень часто движения весьма близки к равномерным. Движение автомобиля на горизонтальном участке пути, движение конвейерной ленты, спуск парашютиста, — все это примеры движений, которые можно считать равномерными.

§ 26. **Скорость равномерного прямолинейного движения.** Каждому ясно, что равномерные движения могут быть разными. Равномерно может мчаться автомобиль, и равномерно может ползти улитка. Однако эти движения резко различны. В чем же их различие? Чтобы охарактеризовать его, нужно ввести физическую величину, называемую с к о р о с т ь ю д в и ж е н и я (или просто скоростью).

Встречаясь с новой физической величиной, мы должны, прежде всего, дать ей определение. Это значит, что мы должны установить, как связана эта новая величина с уже известными нам величинами. Мы знаем, что при равномерном прямолинейном движении точка за равные отрезки времени перемещается на равные расстояния, а следовательно, проходит равные пути (как было указано в § 23 при прямолинейном движении понятия смещения и пути совпадают). За удвоенный отрезок времени точка пройдет удвоенный путь; в утроенный отрезок времени будет пройден утроенный путь. Вообще, при равномерном движении смещение точки, а следовательно, и пройденный путь пропорциональны отрезку времени, в течение которого смещалась точка. Отсюда следует, что отношение смещения к отрезку времени, в течение которого это смещение произошло, есть для данного равномерного прямолинейного движения постоянная величина. Для разных равномерных движений это отношение различно: в случае мчащегося автомобиля оно велико, в случае улитки — мало. Отсюда ясно, что указанное отношение и надо принять в качестве величины, характеризующей различие разных равномерных движений, — т. е. за скорость.

Итак, *скорость равномерного прямолинейного движения есть отношение смещения точки к отрезку времени, в течение которого это смещение произошло.*

Например, если пуля за 0,01 сек пролетела 6 м, то ее скорость равна $\frac{6 \text{ м}}{0,01 \text{ сек}} = 600 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. Найденная величина показывает, что пуля сместилась бы на 600 м, если бы она продолжала двигаться прямолинейно и равномерно в течение секунды. Это, конечно, не означает, что пуля на самом деле будет лететь в течение секунды.

Итак, мы связали новую величину — скорость — с величинами, уже известными нам: со смещением и с временем. Из определения скорости следует, что ее единица зависит от выбора единиц смещения и времени. Можно выражать скорость в см/сек, в м/сек, в км/час и т. п.

При поступательном движении тела все его точки движутся одинаково, с одной и той же скоростью. Эту скорость и имеют в виду, когда говорят о скорости поступательного движения какого-нибудь тела.

§ 27. **Смещение и скорость — векторные величины.** Смещение точки нельзя охарактеризовать только числом. Необходимо, кроме

того, указать еще и направление смещения. Так, например, говоря, что человек отдалился от дома на 2 км, мы охарактеризуем его смещение неполно. Указав же, что человек отдалился от дома на 2 км на север, мы более полно опишем его движение.

Итак, смещение точки есть величина, для знания которой нужно, кроме численного значения, знать еще и направление. Подобные величины часто встречаются в физике. Их называют **векторными** величинами. Векторные величины на чертежах обозначают **векторами**, т. е. стрелками, направление которых показывает направление данной величины, а длина — численное значение величины в условном масштабе. Если, например, мы условимся смещение 5 км изображать стрелкой длиной 1 см, то стрелкой длиной 3 см изобразится смещение 15 км.



Рис. 30. Стрелки изображают скорости точки в положениях A_1 , A_2 и A_3 .

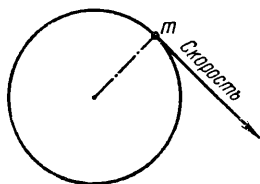


Рис. 31. При движении точки m по окружности вектор скорости перпендикулярен к радиусу окружности.

Поскольку скорость есть отношение смещения ко времени, то *скорость тоже есть векторная величина.*

Каково же направление вектора скорости? В случае прямолинейного движения вектор скорости имеет то же направление, что и вектор смещения, т. е. совпадает с траекторией. Чтобы узнать направление вектора скорости при криволинейном движении, следует взять настолько малый отрезок времени, чтобы в течение его можно было считать отрезок траектории прямолинейным, а движение по этому отрезку — равномерным. Направление этого отрезка траектории, практически совпадающего с касательной к траектории, можно принять за направление вектора скорости.

Итак, при криволинейном движении направление вектора скорости принимают совпадающим с направлением касательной к траектории в рассматриваемой точке (рис. 30). В том частном случае, когда точка движется по окружности, вектор скорости перпендикулярен к радиусу окружности (рис. 31).

У п р а ж н е н и е

14. Определите величины скоростей и угол между их направлениями в случае, показанном на рис. 30. Масштаб: 1 см соответствует 2 км/час.

§ 28. **Графики смещения.** Для описания движения очень удобно пользоваться известным из курса математики графическим методом. Напомним, как строятся графики. Начертим на миллиметровой бумаге две взаимно-перпендикулярные прямые — оси координат (рис. 32). Смещение движущейся точки от начала отсчета будем выражать расстоянием от горизонтальной оси (оси абсцисс). При этом надо условиться о масштабе: например, пусть 1 м смещения движущейся точки соответствует 1 см расстояния от горизонтальной оси. Время будем выражать расстоянием от вертикальной оси (оси ординат), тоже условившись о масштабе (например, 1 сек соответствует 1 см). Пусть известно, что в начальный момент $t = 0$ движущаяся точка находилась на расстоянии 2 м от начала отсчета, через 1 секунду — на расстоянии 3 м, через 2 секунды — на расстоянии 3,5 м, а через 3 секунды — снова на расстоянии 3 м. Все это изображено точками (маленькими кружками). Проводя плавную кривую через центры кружков, мы получим график, показывающий, как меняется смещение нашей точки со временем. Такие графики очень поучительны. Во-первых, по ним можно легко определить расстояние, на котором находилась движущаяся точка в какой-либо момент. Например, по построенному графику можно установить, что через 2,5 секунды точка находилась на расстоянии около 3,3 м. Во-вторых, по графику можно приблизительно судить о скорости точки. Те места, где график круто поднимается (или опускается), очевидно, соответствуют большей скорости, чем места пологого подъема или спуска. Там, где график не поднимается и не опускается, скорость равна нулю.

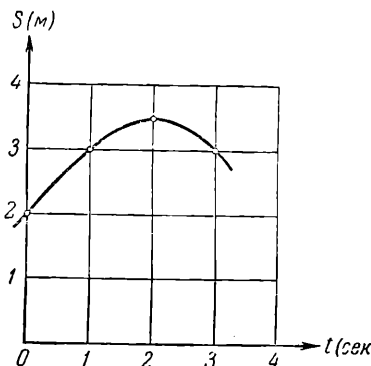


Рис. 32.

Если график смещения — прямая линия, то наклон ее всюду одинаков. Следовательно, прямолинейный график изображает движение с постоянной скоростью, т. е. равномерное движение.

У п р а ж н е н и я

15. Что вы можете сказать о движениях, изображенных графиками 1, 2, 3 и 4 на рис. 33?

16. Охарактеризуйте движение на участках AB , BC , CD и DE графика на рис. 34.

17. Чем различаются движения, графики которых приведены на рис. 35?

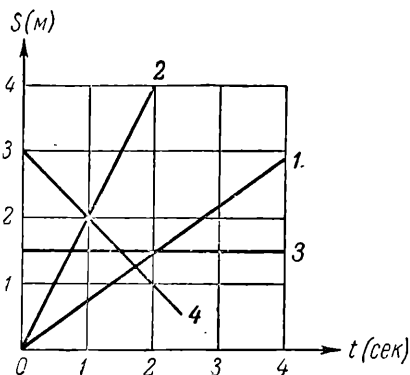


Рис. 33.

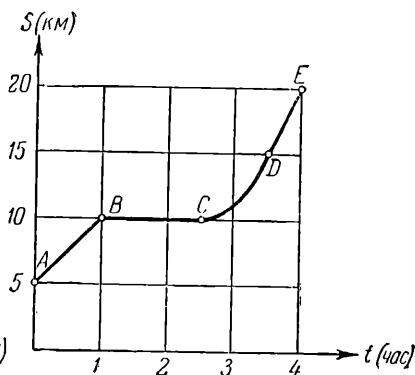


Рис. 34.

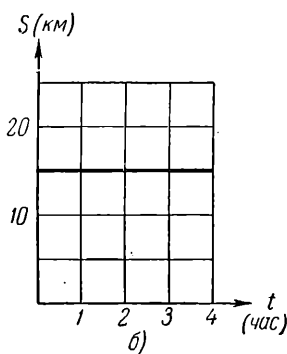
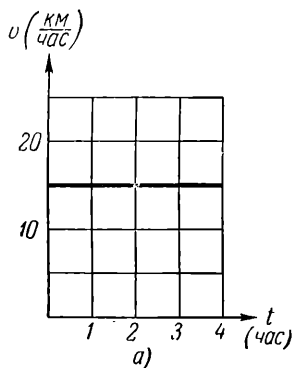


Рис. 35.

§ 29. **Формула равномерного движения.** В дальнейшем нам часто придется говорить о небольших изменениях физических величин. В таких случаях для обозначения разности между конечным и начальным значениями некоторой величины — прироста этой величины — мы будем пользоваться той же буквой, которой обозначена величина, а перед буквой будем писать греческую букву Δ («дельта»). Например, обозначив смещение точки буквой s , прирост смещения напишем в виде Δs ; при прямолинейном движении Δs есть отрезок траектории между конечным и начальным положениями движущейся точки. Обозначив время t , прирост времени, т. е. отрезок времени, напишем в виде Δt .

Заметим, что прирост, или, как его называют иначе, изменение величины, может быть и положительным, и отрицательным, в зависимости от того, что больше — конечное или начальное значение. В случае векторных величин прирост тоже является вектором.

Пользуясь введенными обозначениями для прироста смещения и для промежутка времени, можно определить скорость, данное в § 26, записать в виде формулы

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t},$$

где v — скорость, Δs — длина участка, пройденного в течение отрезка времени Δt . Из сказанного в § 26 ясно, что в случае равномерного движения отрезок времени может быть взят любым по величине. В частности, в качестве него можно взять полную длительность движения (обозначим ее t). В таком случае вместо участка пути надо взять полный путь, пройденный за все время движения (обозначим его s). Тогда получим:

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

Это — формула равномерного движения. Мы можем написать ее еще так:

$$t = \frac{s}{v}, \quad s = vt.$$

У п р а ж н е н и я

18. Какой поезд движется быстрее: тот, который прошел расстояние 600 км за 20 часов, или тот, который прошел 300 км за 5 часов?

19. Рассчитайте скорость в следующих случаях: а) конькобежец пробежал 500 м за 45 сек; б) пуля пролетела 8 м за 0,017 сек.

20. Автомобиль движется равномерно со скоростью 72 км/час. Какое расстояние пройдет автомобиль за 0,2 сек?

21. Сколько времени пройдет, пока плывущий по течению реки плот будет отнесен на 30 км, если скорость течения равна 0,5 м/сек?

22. Сколько времени будет лететь ракета от Земли до Луны, если скорость, с которой она запущена, равна 11,2 км/сек (так называемая в т о р а я к о с м и ч е с к а я с к о р о с т ь) и сохраняется во все время полета постоянной? Расстояние от Земли до Луны составляет 384 000 км.

23. Скорость течения воды в реке равна 0,3 м/сек. Площадь поперечного сечения реки равна 20 м². Каков объем воды, протекшей в течение 10 сек?

24. С какой скоростью должна двигаться нефть в трубопроводе, чтобы за 10 минут протекало 3 м³ нефти? Площадь сечения трубопровода 100 см².

§ 30. Средняя и мгновенная скорости. Как мы видели, при равномерном прямолинейном движении отношение смещения, а следовательно и пройденного пути, к отрезку времени, в течение которого этот путь пройден, не зависит от того, большой или малый отрезок времени мы взяли. Это и дало нам возможность считать это

отношение характеристикой движения — скоростью. В случае переменного движения постоянство отношения пути к отрезку времени уже не имеет места; при ускоренном движении это отношение все увеличивается, а при замедленном — уменьшается. Какой же смысл имеет это отношение в случае переменного движения, например в случае движения поезда от одной станции до другой, во время которого движение и ускорялось и замедлялось? Мы можем вообразить поезд, который, не останавливаясь ни на первой станции, ни на второй, прошел этот перегон за тот же отрезок времени равномерно. Скорость движения воображаемого поезда как-то характеризует движение поезда, двигавшегося неравномерно, поскольку окончательные результаты их движения одинаковы. Ее называют *средней скоростью* неравномерного движения.

Итак, *средняя скорость неравномерного движения есть скорость того равномерного движения, при котором за тот же отрезок времени пройден тот же путь.*

Во многих случаях знание средней скорости является достаточным. Так, например, чтобы вычислить длительность поездки на автомобиле на определенное расстояние по проселочной дороге, достаточно знать, с какой средней скоростью может ехать автомобиль по таким дорогам. Однако часто знания одной средней скорости мало. Например, чтобы судить о результате удара молота, надо знать его движение не в среднем за все время, а непосредственно перед ударом. Для этого надо определить так называемую *мгновенную скорость* молота. Рассмотрим следующий пример. Поезд трогается от станции, все убыстряя свое движение. Какой величиной следует характеризовать его движение через 10 *сек*? Принять за такую характеристику среднюю скорость за все 10 *сек*, предполагая, что поезд в течение 10 *сек* движется равномерно, было бы грубой ошибкой. Если характеризовать движение через 10 *сек* средней скоростью за последние 5 *сек*, то это будет тоже неверно, но все же ближе к правильной оценке. Еще больше мы приблизимся к истине, если возьмем в качестве характеристики среднюю скорость за последнюю 1 *сек*, еще лучше — за последнюю 0,1 *сек*, 0,01 *сек* и т. д. Теоретически следовало бы взять в качестве характеристики движения среднюю скорость за «бесконечно малый» отрезок времени. Практически предел уменьшению отрезка времени ставится имеющимися в нашем распоряжении измерительными приборами. Поэтому в дальнейшем мы будем иметь в виду столь малые отрезки времени, при которых измерение скорости еще возможно.

Итак, *мгновенная скорость переменного движения есть средняя скорость, измеренная за возможно малый промежуток времени.*

Отсюда видно, что в случае равномерного движения понятия средней и мгновенной скорости совпадают и что мгновенная скорость

остается постоянной во все время движения. При неравномерном движении мгновенная скорость все время меняется: при ускоренном движении — возрастает, при замедленном — убывает.

У п р а ж н е н и я

25. О какой скорости — средней или мгновенной — идет речь в следующем правиле технической эксплуатации железных дорог: «Светофор с желтым огнем: разрешается проследовать со скоростью не больше 25 км/час»?

26. По приведенному расписанию определите среднюю техническую (т. е. без учета остановок) скорость на участке Москва — Клин. Можно ли по этой скорости рассчитать время прибытия в Калинин?

Расстояние, км	Станция	Время приб.	Время отпр.
	Москва	—	12.20
89	Клин	13.56	14.04
167	Калинин	15.46	16.06
209	Лихославль	17.12	17.24

§ 31. **Равнопеременное движение.** Мы указывали (§ 25), что при неравномерном движении смещения точки за равные отрезки времени неодинаковы. Иногда эти смещения изменяются за одно и то же время на одинаковую величину. Например, пусть тележка *A*

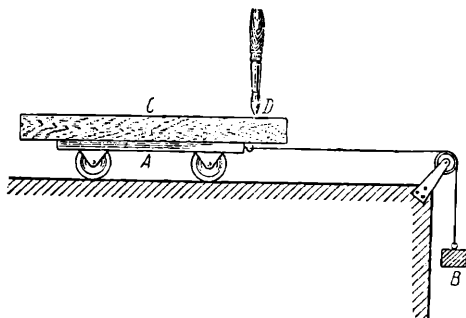


Рис. 36. Простой прибор для изучения переменного движения.

увлекается грузом *B* (рис. 36), связанным шнуром с *A*. Если на тележку поместить доску *C* и во время движения тележки делать на ней кисточкой *D* метки краской через равные отрезки времени (например, кисточку можно укрепить на равномерно вращающемся диске), то метки на доске *C* расположатся примерно так, как показано на рис. 37. Очевидно, расстояния между метками равны смещениям тележки за время одного оборота диска. Измеряя эти

расстояния, мы убедимся, что они отличаются друг от друга каждый раз на одну и ту же величину.

Движение, при котором смещения точки за равные отрезки времени изменяются на одну и ту же величину, называется *равнопеременным*. Если происходит увеличение смещений, то равнопеременное движение называется *равноускоренным*, в случае уменьшения смещений равнопеременное движение называется *равнозамедленным*.



Рис. 37. Примерный вид меток, наносимых на доске *C* кисточкой *D*.

Строго говоря, равнопеременные движения в природе и технике не встречаются. Однако движения тел часто очень близки к равнопеременным. Мы увидим далее, что вблизи поверхности Земли падение тяжелых тел почти не отличается от равноускоренного движения. Несколько больше разнятся от равнопеременного движение поезда, отходящего от станции или тормозящего, движение пули внутри ствола ружья и т. п. Однако и в этих случаях мы часто принимаем движения за равнопеременные, так как при этом расчеты сильно упрощаются, а вносимые погрешности обычно невелики.

§ 32. Ускорение. Равномерное движение характеризуется только одной величиной — скоростью, которая остается неизменной во все время движения. При изучении неравномерного движения этого недостаточно. Дело в том, что в разных случаях неравномерного движения скорость меняется с течением времени по-разному. Тяжелогрузный товарный поезд развивает определенную скорость через несколько минут, а легковой автомобиль может достичь той же скорости уже через несколько секунд. Ясно, что для характеристики неравномерного движения нужна величина, показывающая, как меняется при этом скорость с течением времени.

В случае равнопеременного движения скорость меняется все время одинаково. Это станет ясным, если рассмотреть рис. 38, показывающий положения равноускоренно движущегося шарика через равные отрезки времени. Такой рисунок можно получить, например, фотографируя через равные отрезки времени шарик, скатывающийся по наклонной плоскости. Если поделить смещения $\Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3, \Delta S_4, \dots$ (рис. 39, а) на отрезки времени, в течение которых эти смещения произошли, то мы получим средние скорости шарика на этих участках (рис. 39, б). Так как движение является равноускоренным и любое смещение разнится от предыдущего на одну и ту же величину, то прирост средней скорости в течение

указанных отрезков времени остается неизменным за все время движения (рис. 39, а). Отсюда следует, что за удвоенный отрезок времени прирост средней скорости будет в два раза больше, за утроенный — в три раза больше и т. д. Иными словами, при равнопеременном движении прирост средней скорости пропорционален отрезку времени, в течение которого этот прирост произошел. Поэтому отношение прироста средней скорости к отрезку времени для

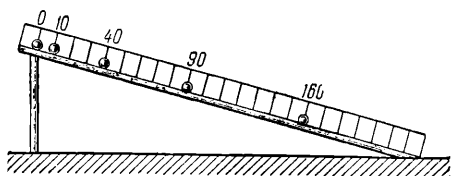


Рис. 38. Положения шарика, скатывающегося по наклонной доске, через равные отрезки времени.

данного равнопеременного движения есть величина постоянная. Для разных движений это отношение различно: у товарного поезда оно мало — скорость нарастает медленно; у легкового автомобиля

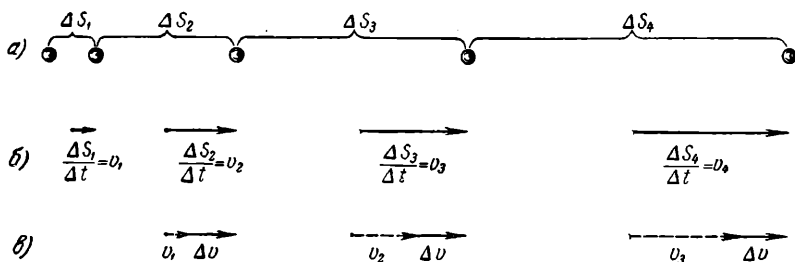


Рис. 39. а) Смещения шарика за равные отрезки времени; б) соответствующие векторы средней скорости при смещениях; в) пунктирные стрелки — векторы средней скорости за предшествующий отрезок времени, сплошные стрелки — приросты средней скорости.

оно велико — скорость нарастает быстро. Отсюда ясно, что указанное отношение может служить характеристикой равнопеременных движений. Более удобно рассматривать изменение не средней, а мгновенной скорости. Таким образом, мы подошли к понятию ускорения.

Ускорением движения называется отношение прироста мгновенной скорости к отрезку времени, в течение которого этот прирост произошел.

Ускорение характеризует быстроту изменения скорости.

Например, если мгновенная скорость поезда в течение 10 сек возросла от 5 м/сек до 7 м/сек, т. е. на 2 м/сек, то ускорение равно

$$2 \frac{\text{м}}{\text{сек}} : 10 \text{ сек} = 0,2 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}.$$

Обратим внимание на наименование единицы ускорения: м/сек². Нам пришлось написать в знаменателе сек², потому что единица времени — секунда — применялась нами два раза: один раз при определении скорости, другой раз — при определении ускорения. Кроме м/сек², ускорение может быть выражено и в других единицах: в см/сек², в м/мин² и т. д.

В случае замедленного движения прирост скорости отрицателен. Например, если скорость автомобиля уменьшилась за 6 секунд от 5 м/сек до 2 м/сек, то прирост скорости равен

$$2 \frac{\text{м}}{\text{сек}} - 5 \frac{\text{м}}{\text{сек}} = -3 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

Поэтому и ускорение тоже отрицательно:

$$-3 \frac{\text{м}}{\text{сек}} : 6 \text{ сек} = -0,5 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}.$$

Итак, при *ускоренном движении ускорение положительно, при замедленном — отрицательно*. При равномерном движении скорость не меняется и ускорение равно нулю.

В технике и природе мы встречаемся с самыми различными ускорениями: у поездов, автомобилей и т. п. ускорения редко превышают несколько десятых долей м/сек², пуля же в стволе ружья имеет ускорение, равное нескольким сотням тысяч м/сек².

Мы видели, что в случае равнопеременного движения ускорение движения остается постоянным за все время движения. В случаях более сложных это не имеет места. Примеры таких движений мы будем изучать позднее. Пока отметим, что, вообще говоря, под словом «ускорение» понимается ускорение, вычисленное за возможно малый промежуток времени.

Так же как и скорость, *ускорение есть векторная величина*. Направление ускорения совпадает с направлением прироста скорости. В случае прямолинейного равноускоренного движения направление ускорения совпадает с направлением скорости, а в случае прямолинейного равнозамедленного движения противоположно ей. В случае криволинейного движения, при котором направление вектора скорости непрерывно меняется, направление вектора ускорения не совпадает с направлением скорости.

§ 33. Формулы равнопеременного движения. а) Ф о р м у л а с к о р о с т и. Согласно определению ускорения можно написать,

обозначая ускорение a , прирост скорости Δv и отрезок времени Δt :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

В случае равнопеременного движения ускорение не меняется во все время движения, а потому для вычисления ускорения можно взять любой отрезок времени; в частности, можно в качестве отрезка времени взять полное время движения (t); в таком случае под Δv следует понимать разность между конечной скоростью v_t и начальной скоростью v_0 . Имеем:

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

Отсюда

$$v_t = v_0 + at \quad (\text{при } v_0 = 0, v_t = at).$$

Это и есть формула скорости равнопеременного движения. Отметим, что она одинаково пригодна для расчетов скорости и равноускоренного, и равнозамедленного движений. Надо только помнить, что при равнозамедленном движении a отрицательно. Ускорение считается положительным в том случае, когда его направление совпадает с направлением пути и скорости. Если, например, мы отсчитываем путь по некоторой прямой вправо, то и скорость и ускорение надо считать положительными, если они направлены вправо.

б) Формула смещения. Средняя скорость за все время t равнопеременного движения равна

$$v_{\text{ср}} = \frac{s}{t},$$

откуда

$$s = v_{\text{ср}} t.$$

Обратим внимание, что мгновенная скорость за время t изменилась от v_0 до $v_t = v_0 + at$. Можно доказать, что при равнопеременном движении средняя скорость равна полусумме начальной и конечной скоростей *):

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_0 + v_t}{2} = \frac{v_0 + v_0 + at}{2} = v_0 + \frac{at}{2}.$$

Подставляя это выражение вместо $v_{\text{ср}}$, получим:

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2} \quad (\text{при } v_0 = 0 \quad S = \frac{at^2}{2}).$$

*) Это доказательство легко проводится методами высшей математики, которая изучается в старших классах техникумов.

Это и есть формула смещения при равнопеременном движении. В случае, если точка движется по прямой траектории в одном направлении, та же формула выражает и пройденный путь, так как в этом случае пройденный путь равен смещению. Формула показывает, что в случае положительного ускорения (равноускоренное движение) пройденный путь больше, чем путь, который был бы пройден, если бы все время сохранялась начальная скорость. А в случае отрицательного ускорения (равнозамедленное движение) пройденный путь, наоборот, меньше пути, который был бы пройден при сохранении начальной скорости.

Формул скорости и смещения совершенно достаточно, чтобы провести любой расчет равнопеременного движения. Но очень часто время движения t по условиям расчета неизвестно и не представляет интереса. В таком случае для облегчения расчетов полезно написать еще одну формулу, которая является следствием формул скорости и пути, из которых исключено время t . Напишем формулы смещения и скорости так:

$$s = \frac{v_t + v_0}{2} t;$$

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

Перемножим эти равенства почленно:

$$sa = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2}$$

или

$$v_t^2 - v_0^2 = 2as \quad (\text{при } v_0 = 0 \quad v_t^2 = 2as).$$

Эта формула не включает времени t . Она тоже одинаково пригодна и для равноускоренного, и для равнозамедленного движений.

Если ускорение отрицательно, то в некоторый момент скорость уменьшится до нуля, а затем сделается отрицательной, т. е. точка начнет двигаться в обратном направлении. Примером этому может служить движение шарика, который пустили по наклонному желобу снизу вверх: сперва шарик движется вверх замедленно, а затем скатывается вниз ускоренно. В подобных случаях и при прямолинейном движении пройденный путь больше смещения точки. В частности, может случиться, что точка, пройдя большой путь вперед и назад, окажется в начальном положении, и ее смещение будет равно нулю.

Рассмотрим примеры расчетов при равнопеременном движении.

1) Автомобиль берет подъем длиной 1,95 км в течение 5 минут, и к концу подъема его скорость равна 18 км/час. Принимая, что ускорение, с которым движется по подъему автомобиль, постоянно, определить его значение.

Имеем:

$$s = 1,95 \text{ км} = 1950 \text{ м},$$

$$t = 5 \text{ мин} = 300 \text{ сек},$$

$$v_t = 18 \frac{\text{км}}{\text{час}} = 5 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

Подставляя эти данные в формулы скорости и пути, получим два уравнения:

$$\begin{aligned} 5 &= v_0 + a \cdot 300, \\ 1950 &= v_0 \cdot 300 + \frac{a \cdot 300^2}{2}. \end{aligned}$$

Решая эти два уравнения, получим:

$$a = -0,01 \frac{м}{сек^2}.$$

Знак минус в ответе показывает, что автомобиль движется по подъему замедленно.

2) Автомобиль тормозит с ускорением, которое во все время можно считать неизменным и равным -4 м/сек^2 . Какой путь пройдет он за время торможения, если начнет тормозить при скорости 16 м/сек ?

Имеем:

$$\begin{aligned} v_0 &= 16 \frac{м}{сек}, \\ v_1 &= 0, \\ a &= -4 \frac{м}{сек^2}. \end{aligned}$$

В данной задаче удобно использовать формулу

$$v_1^2 - v_0^2 = 2as.$$

Тогда

$$0 - 16^2 = -2 \cdot 4 \cdot s,$$

откуда

$$s = 32 \text{ м}.$$

У п р а ж н е н и я

27. Через сколько времени поезд, отходящий от станции с ускорением $0,5 \text{ м/сек}^2$, достигнет скорости 36 км/час , и как далеко отойдет он за это время от станции?

28. Пуля вылетает из дула винтовки со скоростью 880 м/сек . Какова средняя скорость пули в стволе? Движение пули в стволе считайте равноускоренным.

29. Наблюдатель на перроне около переднего тамбура вагона поезда отмечает, что этот вагон после начала движения поезда прошел мимо него в течение 8 секунд. Считая движение поезда равноускоренным, определите, сколько вагонов пройдет мимо наблюдателя за 24 секунды.

30. Поезд в течение 20 сек прошел путь 220 м . Принимая движение за равнопеременное, определите его конечную скорость и ускорение, если начальная скорость была 12 м/сек .

31. Артиллеристы считают, что срок жизни среднего артиллерийского орудия равен 100 сек . Подсчитайте, сколько выстрелов сделает такое орудие за свою жизнь, если известно, что скорость вылета снаряда 1000 м/сек , а длина ствола 4 м .

§ 34. Графики скорости. В § 28 мы познакомились с графиками, показывающими, как меняется с течением времени смещение точки. Можно также построить графики, показывающие, как меняется с

течением времени скорость движения: по оси абсцисс надо откладывать время, а по оси ординат — скорость (в условном масштабе).

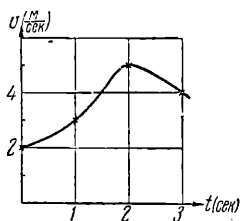


Рис. 40. График скорости переменного движения.

Пусть, например, в начальный момент скорость равна 2 м/сек , спустя 1 сек равна 3 м/сек , спустя 2 сек равна 5 м/сек , спустя 3 сек равна 4 м/сек . На рис. 40 показан график скорости, построенный по этим данным. В той части, где график поднимается, скорость со временем увеличивается, и тем больше, чем круче поднимается график. Снижающаяся часть графика показывает, что скорость со временем убывает. Если график имеет вид прямой линии, то это значит, что скорость нарастает (или убывает) все время одинаково, т. е. что движение равнопеременно. График, параллельный оси абсцисс, показывает, что скорость с течением времени не меняется, т. е. движение равномерное.

У п р а ж н е н и я

32. Прочитайте график, изображенный на рис. 41.

33. Начертите график скорости равноускоренного движения с начальной скоростью 2 м/сек и ускорением $0,5 \text{ м/сек}^2$.

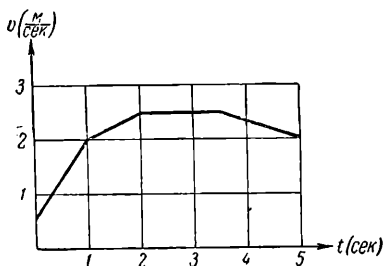


Рис. 41.

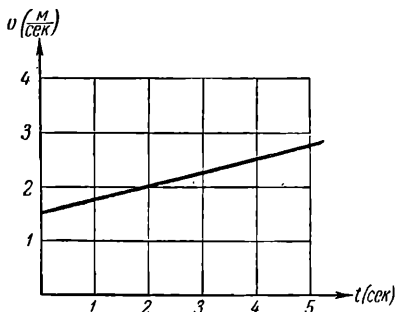


Рис. 42.

34. По графику рис. 42 найдите среднюю скорость за первые 4 сек движения. На том же чертеже постройте график скорости соответствующего равномерного движения. Как по графику скорости найти пройденный путь?

35. Автомобиль, двигавшийся со скоростью 16 м/сек , затормозил и остановился через 5 сек . Начертите график движения автомобиля и по графику найдите среднюю скорость и тормозной путь.

§ 35. Падение тел и движение тел, брошенных вертикально вверх. Мы уже указывали, что падение тел при некоторых условиях близко к равноускоренному движению. Обычно мы наблюдаем падение тел в воздухе, а наличие воздуха существенно влияет на

характер движения, уменьшая его скорость, в особенности в случае таких легких тел, как пушинки, снежинки и т. п. (с о п р о т и в л е н и е в о з д у х а). Мы возвратимся к вопросу о сопротивлении воздуха, а также и других сред, внутри которых могут двигаться тела, позднее, когда будем изучать законы динамики. Пока займемся вопросом, как происходит падение тел при отсутствии воздуха. Возьмем стеклянную трубку, внутри которой находятся дробинка и легкое перышко (рис. 43, а). Удалим при помощи насоса из трубки воздух и будем наблюдать, как падают внутри нее дробинка и перышко. Мы увидим, что перышко падает так же быстро, как и дробинка (рис. 43, б). Пространство, из которого хорошо откачан воздух и другие газы, называется в а к у у м о м. Наш опыт показывает, что *в вакууме все тела падают одинаково*. Стоит, однако, впустить в трубку некоторое количество воздуха, как при падении перышко будет отставать от дробинки, и тем в большей мере, чем больше впущено воздуха.

При падении тел с небольшой высоты разница в падении тяжелых и легких тел часто незаметна и в воздухе. Если, например, одновременно выпустить из рук на высоте 1—1,5 м пробку и такого же размера железную гирьку, то мы увидим, что они ударятся о пол тоже одновременно, т. е. мы не заметим разницы в их движении.

Изучая падение тел в подобных случаях, физики установили, что *высота падения пропорциональна квадрату времени падения*. Если, например, время падения увеличится в два раза, то высота падения увеличится в четыре раза. Отсюда следует, что падение тел есть равноускоренное движение (если сопротивление воздуха не меняет существенно характера движения). Иными словами, *падение тел есть движение с постоянным, одинаковым для всех тел ускорением, направленным по вертикали сверху вниз*.

Как движется тело, брошенное вертикально вверх? Опыт показывает, что в этом случае тело движется равнозамедленно с тем же ускорением, с которым тела падают вниз. Итак, тела, движущиеся вертикально вверх, тоже движутся с ускорением, одинаковым для всех тел и направленным сверху вниз.

Изучение движения тел, брошенных как-либо вблизи поверхности Земли, показывает, что вообще все они движутся с одним и тем же ускорением, направленным по вертикали сверху вниз.

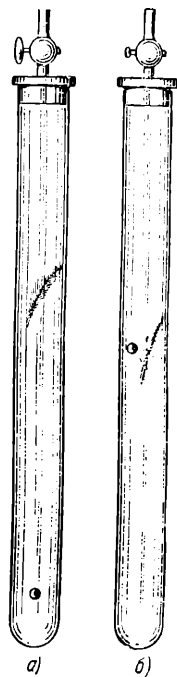


Рис. 43. а) Воздух из трубки не откачан, и перышко, падая, отстает от дробинки; б) воздух из трубки откачан, перышко и дробинка падают вместе.

Отсюда ясно, что ускорение падающих тел есть важная характеристика явлений, происходящих вблизи поверхности Земли. Впоследствии мы увидим, что ускорение падающих тел связано с наличием так называемого поля тяготения Земли. Поэтому можно сказать, что ускорение падающих тел характеризует поле тяготения вблизи поверхности Земли. Это ускорение обозначают всегда буквой g .

Существуют весьма точные способы измерения величины g . С одним из них мы познакомимся в главе XI. Эти измерения показали, что величина g зависит от высоты места над уровнем моря и от широты места. Чем выше место наблюдения, тем меньше g . На одной и той же высоте над уровнем моря g наиболее велико на полюсах, где оно равно 983 см/сек^2 ; на экваторе g наименьшее: $g = 978 \text{ см/сек}^2$. В средних широтах g равно $980 \div 982 \text{ см/сек}^2$ (например, в Москве $g = 981,56 \text{ см/сек}^2$). В дальнейшем мы будем приближенно принимать, что $g = 980 \text{ см/сек}^2 = 9,8 \text{ м/сек}^2$.

При расчетах движения падающих тел и движения тел, брошенных вертикально вверх, следует применять формулы, относящиеся к равнопеременному движению (§ 33), заменив a на g .

Рассмотрим примеры.

1) Какой скорости достигнет кирпич, падая с высоты 10 м ? При такой высоте падения сопротивление воздуха изменит характер движения незначительно. Поэтому можно принять падение кирпича за равноускоренное движение, причем начальная скорость равна нулю. За направление, в котором следует отсчитывать путь, скорость и ускорение кирпича, удобно принять вертикальное направление сверху вниз. Условившись таким образом, можем написать:

$$s = 10 \text{ м},$$

$$a = g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2},$$

$$v_0 = 0.$$

Применяя формулу

$$v_t^2 - v_0^2 = 2gs,$$

находим

$$v_t^2 - 0 = 2 \cdot 9,8 \cdot 10 \frac{\text{м}^2}{\text{сек}^2},$$

откуда

$$v_t = 14 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

2) Камень брошен вертикально снизу вверх со скоростью 7 м/сек . На какую высоту он поднимется? В этом случае снова можно считать движение камня равнопеременным. За направление, в котором отсчитываются пройденный путь, скорость и ускорение, удобно принять вертикальное направление снизу вверх. При таком условии можно написать:

$$v_0 = 7 \frac{\text{м}}{\text{сек}},$$

$$a = -g = -9,8 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2},$$

$$v_t = 0.$$

Применяя формулу

$$v_t^2 - v_0^2 = 2gs,$$

имеем

$$-7^2 = -2 \cdot 9,8 \cdot s,$$

откуда

$$s = 2,5 \text{ м.}$$

У п р а ж н е н и я

36. Камень падал 1,5 сек. С какой скоростью он упал на землю?

37. Спортсмен прыгнул с высоты 2,5 м. С какой скоростью он достиг почвы?

38. Парашютист с раскрытым парашютом приземляется обычно со скоростью 6 м/сек. Какой высоте соответствует эта конечная скорость при прыжке без парашюта?

39. Шарик брошен вертикально вверх. Когда он достигает максимальной высоты 2 м, брошен второй шарик с той же скоростью. На какой высоте встретятся шарики?

40. Постройте график скорости полета мяча, брошенного вертикально вверх со скоростью 10 м/сек.

ГЛАВА IV

ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ

§ 36. Первый закон Ньютона. В предыдущей главе мы изучали, как движутся тела, и рассмотрели случаи равномерного и равнопеременного прямолинейных движений тел. В этой главе мы будем изучать законы движения тел, т. е. выясним, почему в одних случаях тела покоятся или движутся прямолинейно и равномерно, а в других — движутся ускоренно или замедленно. Иными словами, мы рассмотрим, почему в одних случаях скорость тел остается постоянной, а в других — увеличивается или уменьшается.

Начнем с наиболее простого вопроса: при каких обстоятельствах покоящееся тело начинает двигаться, т. е. скорость его увеличивается от нуля до некоторой величины?

Ответ на этот вопрос дает повседневный опыт. Если, например, мяч лежит на полу, то он начнет двигаться только в том случае, если на него подействует какое-либо другое тело: на него налетит другой мяч, его ударят палкой, на него подействует движущийся воздух (ветер) и т. п. Но если нет тел, которые действуют на мяч, «сам собой» он в движение не придет. Значит, увеличить свою скорость тело может только тогда, когда на него действует другое тело.

Легко понять, что уменьшение скорости движения и остановка тела тоже не происходят «сами собой», а вызываются действием других тел. Пуля, попадая в деревянную доску, уменьшает свою скорость и останавливается вследствие действия доски. Шарик, катящийся по полу, или велосипедист, едущий по ровной дороге не вращая педалей, уменьшают свою скорость и останавливаются вследствие трения о пол или о дорогу.

Изменение направления движения — поворот — тоже всегда обусловлено действием какого-либо тела. Брошенный мяч меняет направление движения или под действием притяжения Земли, или под действием ветра, или вследствие действия со стороны стены, о которую он ударился. Быстро бегущий человек, чтобы обогнуть столб, хватается за него рукой.

Итак, *всякому телу свойственно сохранять величину и направление своей скорости*, т. е. двигаться равномерно и прямолинейно. Только действие других тел изменяет скорость тела. Свойство тел

сохранять величину и направление скорости называется и н е р ц и е й. Полет брошенного камня, падение споткнувшегося во время бега человека, вылетание седока из саней, заворачивающих на быстром ходу, — все это проявления инерции тел. Если тело покоится, т. е. сохраняет скорость, равную нулю, то это тоже есть проявление инерции.

При отсутствии действия других тел всякое тело сохраняет состояние покоя или прямолинейного равномерного движения (з а к о н и н е р ц и и).

Закон инерции, известный уже в XVII в. итальянскому физику Г а л и л е ю, был назван первым в числе трех основных законов механики, сформулированных английским физиком и математиком Н ь ю т о н о м (XVII в.).

У п р а ж н е н и е

41. На рис. 44 показано, как можно придать железке рубанка нужное положение. Почему при ударе по железке она входит в рубанок, а при ударе по колодке — выходит из него?

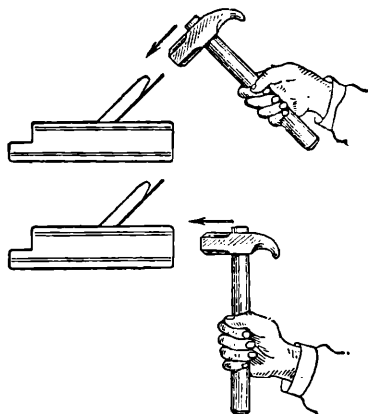


Рис. 44.

§ 37. Взаимодействие тел.

Мы видели, что величина и направление скорости любого тела меняются только в том случае, если на него действует какое-либо другое тело. Что же происходит с этим вторым телом? Скорость его тоже меняется, причем изменение скорости второго тела имеет направление, противоположное изменению скорости первого тела.

Рассмотрим примеры.

Попробуйте, находясь в лодке посредине реки, оттолкнуть от себя другую лодку. Вторая лодка двинется, куда вы ее толкнули; одновременно двинется и ваша лодка, но только в противоположном направлении (рис. 45).

Сходное явление происходит при выстреле — так называемая «отдача» ружья или орудия. Пуля летит вперед, и одновременно ружье отталкивается назад.

Рассмотрим еще такой опыт. Два шарика, сделанные из упругого материала, висят на подвесах, касаясь друг друга (рис. 46, а). Отклоним один из них и отпустим (рис. 46, б). Отклоненный шарик, двигаясь к положению равновесия, ударит по другому шарiku. В результате удара первый шарик остановится (т. е. его скорость уменьшится), а второй шарик начнет двигаться (рис. 46, в)

(т. е. его скорость увеличится). Как видно, и в этом случае изменения скорости взаимодействующих тел имеют противоположные направления.

Изменение скорости любого тела всегда связано с изменением скорости какого-либо другого тела. Если одно тело действует на другое,

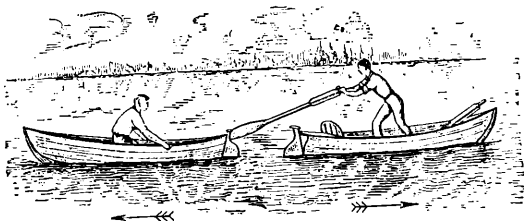


Рис. 45. Отталкивая соседнюю лодку влево, мы двигаем свою лодку вправо.

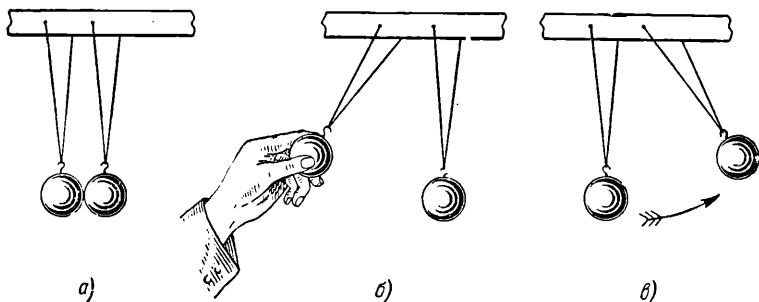


Рис. 46. Если отвести в сторону один из шариков, то он, ударив по другому, приведет его в движение, а сам остановится.

заставляя его менять скорость, то и второе тело действует на первое, заставляя его менять скорость в противоположном направлении. Все изменения движения тел всегда *взаимосвязаны*, и действия тел друг на друга всегда взаимны. Поэтому мы называем действия тел друг на друга их *взаимодействием*.

§ 38. Силы. Взаимодействия тел, в результате которых меняется их скорость, могут быть различными. Скорость упругих тел меняется в том случае, если они соприкасаются друг с другом и при этом изменяют свою форму (*деформируются*). Иногда скорость тел меняется вследствие взаимодействия находящихся на них электрических зарядов. Какова бы ни была природа взаимодействия тел, мы всякую причину изменения скорости тел или деформаций называем *силой*: силой упругости, электрической силой и т. п.

В природе и в технике особо важное значение имеет взаимодействие тел с Землей. Действие Земли на любое находящееся вблизи нее тело — силу тяжести — мы наблюдаем повседневно: всякое тело, не соприкасающееся с другими телами, падает на Землю, быстро увеличивая свою скорость (к вопросу, почему мы не наблюдаем, как меняет при этом свою скорость Земля, мы вернемся позже).

Не менее важен упомянутый выше случай сил, возникающих при изменении формы и объема тел, т. е. при деформации

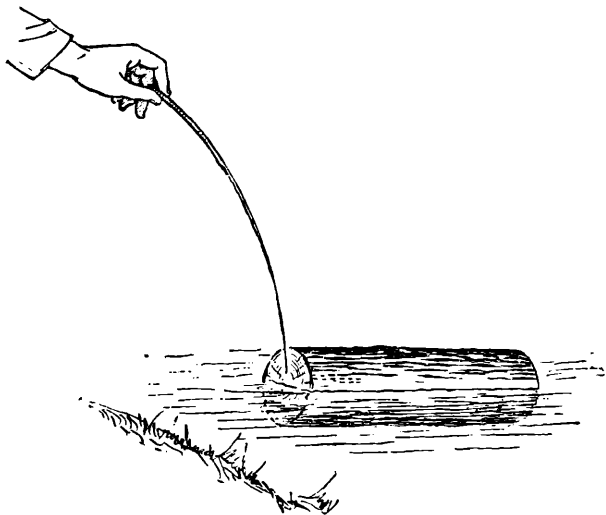


Рис. 47. Если привести полено в движение прутиком, то он изогнется.

тел (силы упругости). Попробуем привести в движение деревянное полено, плавающее в воде, деревянным прутиком (рис. 47). Мы увидим, что полено будет увеличивать свою скорость, только если прутик изогнется. Значит, только изменивший свою форму (деформированный) прутик действует с некоторой силой на полено. При этом деформируется и полено, но настолько мало, что это незаметно на глаз. Если бросить пластмассовый шарик на стеклянную пластинку, то он отскочит от пластинки под действием силы упругости, возникающей при деформации шарика и пластинки. Эта, длящаяся ничтожную долю секунды, деформация обнаруживается, если пластинку покрыть перед ударом тонким слоем копоти. На слое копоти после удара обнаружится круглое пятнышко, свидетельствующее о том, что во время удара шарик был сплюснен. Можно убедиться, что вообще *соприкасающиеся тела действуют друг*

на друга с некоторой силой только в том случае, если они деформированы.

Большое значение имеют силы, возникающие при движении соприкасающихся тел относительно друг друга, -- силы трения. Эти силы тоже связаны с деформацией тел: все трущиеся тела всегда деформированы.

§ 39. Равновесие сил. Пусть на веревке висит груз. На него, несомненно, действует сила тяжести, притягивающая его к Земле. Почему же груз остается в покое? Не противоречит ли это только что данному определению силы?

Нет. Если бы сила тяжести действовала только одна, она вызвала бы ускоренное падение груза вниз. Но в нашем случае на груз дей-

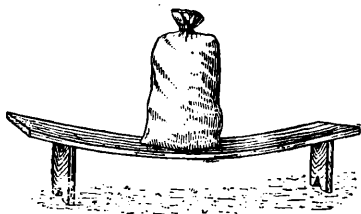


Рис. 48. При тяжелом грузе прогиб скамьи виден на глаз.

ствует не одна сила, а две: сила тяжести тянет груз вниз, а равное ей по величине н а т я ж е н и е веревки тянет его вверх. В результате эти две силы не производят никакого действия и скорость груза остается равной нулю. Случай, при котором действие сил не вызывает изменения скорости тел, называется **равновесием сил**.

Таким образом, *если какая-нибудь сила не вызывает изменения скорости движения тела, то это значит, что к телу приложена другая сила, уравновешивающая ее.*

Когда, например, груз лежит неподвижно, опора под ним немного прогибается и, стремясь выпрямиться, действует на груз снизу вверх. Эта сила и уравновешивает силу тяжести. Если груз достаточно тяжел, то этот прогиб виден на глаз (рис. 48). В случае легких тел прогиб опоры, хотя и незаметен, все же всегда существует.

Рассмотрим еще случай движения поезда. Иногда на горизонтальном участке пути паровоз тянет поезд вперед, а поезд движется равномерно. Почему же тяга паровоза не вызывает увеличения скорости? Дело опять в том, что здесь действует не одна сила, а две. Тяга паровоза стремится ускорить движение, а трение колес -- замедлить. В результате, если эти силы равны, они уравновешиваются и не вызывают изменения скорости поезда. То же можно сказать о равномерном ходе любого экипажа или машины.

Теперь мы можем дополнить закон инерции: *всякое тело сохраняет величину и направление своей скорости, если действующие на него силы уравновешиваются.* Стоит, однако, равновесию сил, действующих на тело, почему-либо нарушиться, как покоящееся тело начинает двигаться или скорость движущегося тела меняется.

Измерение сил обычно производится посредством пружинных динамометров. О простейшем динамометре (пружинные весы) было рассказано в § 13. Как было указано в § 9, в качестве единиц силы часто используются единицы веса: грамм, килограмм, тонна (Γ , $\kappa\Gamma$, T). О других единицах силы будет сказано в § 43.

У п р а ж н е н и я

42. Какие силы уравниваются, когда не удается: а) вытащить гвоздь из стены; б) разорвать веревку; в) поднять тяжелую гирию?

43. Какие силы уравниваются, когда парусная лодка равномерно скользит по поверхности воды? Что происходит, когда лодка садится на мель?

§ 40. Направление силы. Всякая сила действует в некотором определенном направлении. Например, сила тяжести действует по направлению к Земле (мы называем это направление *в е р т и к а л ь н ы м*). Сила трения действует в направлении, противоположном тому, в котором движется тело.

Значит, *сила*, так же как и скорость (см. § 27) характеризуется величиной и направлением, т. е. является *векторной величиной*. Кроме того, имеет значение, где находится *т о ч к а п р и л о ж е н и я с и л ы*. Например, если мы тянем санки за веревку, то движение санок будет различным в зависимости от того, где именно привязана веревка.

При изображении вектора силы стрелкой следует стрелку начинать от точки приложения силы.

У п р а ж н е н и я

44. Где приложены, в каком направлении действуют и чему равны силы, изображенные на рис. 49, а и б, если масштаб $10 \kappa\Gamma = 1 \text{ см}$?

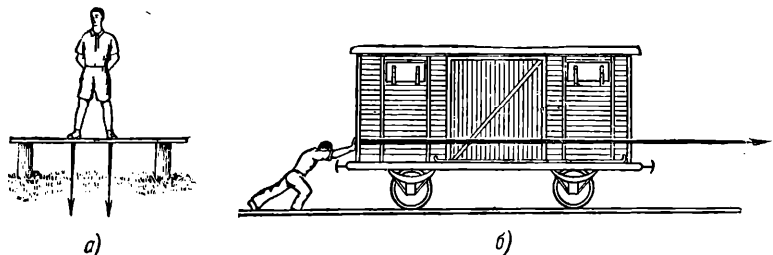


Рис. 49.

45. Изобразите, пользуясь масштабом $0,5 \kappa\Gamma = 1 \text{ см}$, горизонтально действующую силу в $7 \kappa\Gamma$.

§ 41. Второй закон Ньютона. Мы уже знаем, что при наличии неуравновешенных сил телà движутся с тем или иным ускорением. Как связаны между собой сила, действующая на тело, и ускорение, с которым оно движется? Простые наблюдения убеждают нас, прежде всего, в том, что сила и вызываемое ею ускорение направлены одинаково. Действительно, если толкнуть книгу, свободно лежащую на столе, то она начнет двигаться (а начало любого движения есть движение с ускорением) именно в ту сторону, куда толкает ее рука. Брошенный вертикально вверх камень движется замедленно, и его ускорение направлено вертикально вниз. Действующая на камень сила притяжения Земли тоже направлена вертикально вниз.

Далее, легко обнаружить, что большая сила вызывает и большее ускорение определенного тела. Привести в движение железнодорожный вагон может и человек, и паровоз. От толкающего усилия человека скорость вагона будет нарастать медленно: ускорение будет малò. От значительно большей тяги паровоза скорость вагона будет нарастать быстро: ускорение будет велико.

При замедлении движения вагона или поезда будет получаться то же самое. Небольшая сила, например слабое трение, будет лишь очень мало замедлять ход поезда. Сильное трение, например торможение, быстро замедлит движение и остановит поезд.

Чтобы исследовать связь между силой и ускорением количественно, надо обратиться к измерениям. Силу можно измерять разного рода динамометрами (например, пружинными, см. § 39). Ускорение можно найти, производя отметки движения через равные отрезки времени (см. § 32).

Производя измерения силы и ускорения при помощи приборов, можно убедиться в том, что сила и ускорение, с которым движется тело, пропорциональны друг другу. Если увеличить силу в несколько раз, то и ускорение увеличится во столько же раз.

Итак, *ускорение движения тела пропорционально действующей на тело силе и одинаково с ней направлено.* Это положение выражает второй закон Ньютона. Мы дадим этому закону более полную формулировку после того, как введем понятие массы тела.

Пока отметим, что закон инерции можно рассматривать как частный случай второго закона Ньютона. Если силы отсутствуют или полностью уравновешены, то ускорение равно нулю, т. е. тело движется с постоянной скоростью.

Другой частный случай представляет постоянная сила. Постоянная сила вызывает и постоянное ускорение. В частности, если направление силы совпадает с направлением скорости, то тело движется прямолинейно и равноускоренно. Примером может служить падение тел при отсутствии сопротивления воздуха. Если же направление силы противоположно скорости тела, то тело движется равнозамедленно (например тело, брошенное вертикально вверх).

У п р а ж н е н и я

46. С каким ускорением будет двигаться тело весом 3 кГ , если на него будет действовать сила 4 кГ в горизонтальном направлении?

47. Луна притягивает к себе тела, находящиеся на ее поверхности, с силой в шесть раз меньше силы притяжения к Земле тех же тел на поверхности Земли. С каким ускорением падают тела на Луне?

48. а) Какая сила тяги требуется, чтобы автомобиль двигался с ускорением $0,5 \text{ м/сек}^2$, если вес автомобиля равен 1350 кГ (трение не учитывать)? б) Решите ту же задачу с учетом сил сопротивления движению при условии, что они составляют 2% от веса автомобиля.

§ 42. Масса тела. Мы указывали (§ 36), что инерция есть общее свойство тел. Все без исключения тела меняют свою скорость только под действием неуравновешенных сил. Иными словами, *все тела инертны*. Инертен и громадный айсберг, плавающий в арктических морях, инертна и крошечная летающая в воздухе пылинка. Однако мера инертности у этих тел различна.

Попробуем оттолкнуться от берега один раз тяжело груженную лодку, а другой раз — такую же лодку без груза. Если мы будем действовать оба раза с одинаковой силой, то лодки начнут двигаться с разными ускорениями: скорость пустой лодки будет увеличиваться быстро, а груженной — медленно. Если с одинаковой силой тормозить обе лодки, то получится сходный результат: пустая лодка остановится скорее, чем груженная. Иными словами, ускорение пустой лодки больше, чем груженной, при действии той же силы. Отсюда ясно, что инертность груженной лодки больше инертности пустой лодки.

Рассмотрим еще такие опыты. Деревянная планка AB (рис. 50, а) подвешена посередине на прочной нити, перекинутой через неподвижный блок. К планке можно прикреплять на различных расстояниях от подвеса грузы. Сперва укрепим на ней на равных расстояниях от подвеса две одинаковые железные гирьки KK . При этом планка сохранит горизонтальное положение. Затем резко дернем за свободный конец нити вниз. Планка с ускорением пойдет вверх, а за планкой двинутся вверх и гирьки. Мы увидим, что планка при движении остается горизонтальной, т. е. движется поступательно. Значит, все ее точки, а также скрепленные с планкой гирьки, движутся с одним и тем же ускорением. Силы, действующие на гирьки, равны, так как расстояния до подвеса (плечи рычага) одинаковы. Отсюда следует, что меры инертности гирек одинаковы. Это и понятно, так как мы взяли одинаковые гирьки. Заменяем одну из гирек деревянным бруском, который подберем так, чтобы планка была по-прежнему горизонтальна (рис. 50, б), и повторим опыт. Мы увидим, что планка и теперь движется горизонтально. Это означает, что меры инертности железной гирьки и выбранного нами деревянного бруска тоже одинаковы.

Итак, не только тела, состоящие из одного и того же вещества, но и тела из разных веществ могут иметь одинаковые меры инертности. Теперь возьмем две железные гирьки, объемы которых отличаются в два раза. Чтобы планка осталась горизонтальной, нам придется расположить гирьки на разных расстояниях от подвеса: меньшую гирьку на вдвое большем расстоянии, чем большую (рис. 50, в). Повторив опыт, увидим, что планка и теперь движется поступательно, т. е. ускорения гирек одинаковы. Но по закону рычага сила, действующая на меньшую гирьку, в два раза меньше силы, действующей на большую

гирьку (потому что плечо в два раза больше). Значит, мера инертности этой гирьки в два раза меньше инертности большей. Очевидно, это связано с тем, что в этой гирьке в два раза меньше железа.

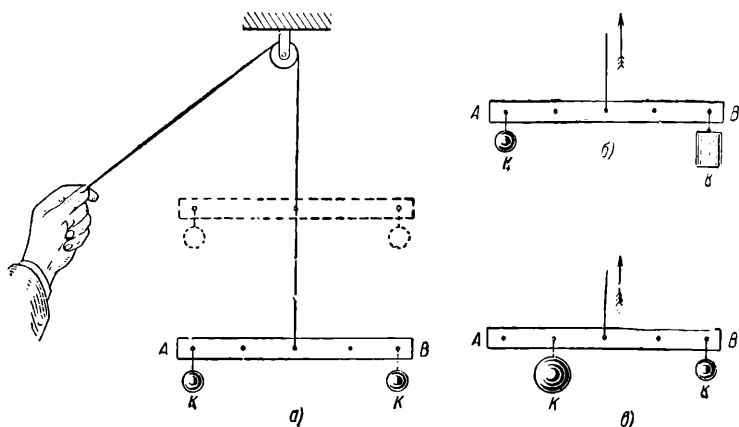


Рис. 50. Простой прибор для сравнения сил, вызывающих ускорения тел.

Произведем тот же опыт, оставив на месте тяжелую гирьку и заменив легкую гирьку прежним деревянным бруском. Планка снова движется поступательно, и это дает нам возможность утверждать, что мера инертности бруска в два раза меньше инертности большей гирьки.

Итак, меры инертности тел можно сравнивать друг с другом. Что же считать мерой инертности тел? Обратим внимание, что из второго закона Ньютона следует постоянство отношения силы, действующей на тело, к ускорению, с которым это тело движется. Для разных же тел это отношение может быть различным. Чем инертнее тело, т. е. чем меньше ускорение, вызываемое определенной силой, тем это отношение больше. Отсюда ясно, что инертность тел характеризуется именно отношением силы к вызываемому ею ускорению данного тела. Эту величину называют *м а с с о й* тела. *Итак, масса тела есть величина, характеризующая его инертность и равная отношению силы, действующей на тело, к ускорению, вызываемому этой силой.*

Обозначая массу через m , силу — через F и ускорение — через a , можно написать согласно определению массы:

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

откуда

$$F = ma,$$

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

Последнюю формулу можно рассматривать, как более полное выражение второго закона Ньютона. *Ускорение движения тела направлено одинаково с силой, действующей на тело, пропорционально ей и обратно пропорционально массе тела.*

Таким образом, ускорение тела определяется двумя (и только двумя) величинами: силой, которая вызывает ускорение, и массой тела. Например, автомобиль определенной массы под действием определенной силы будет всегда двигаться с одним и тем же ускорением, независимо от того, чем он гружен — железом или войлоком, независимо от того, где он находится, независимо от того, какую скорость он имеет, и т. д. Ускорение тела не зависит ни от объема тела, ни от плотности его, ни от скорости, ни от расположения других тел, не действующих на него, — значение имеют только сила и масса.

§ 43. Единицы силы. В каких единицах выражается сила, если вычислять ее по формуле $F = ma$? Это зависит от того, в каких единицах выражать массу и ускорение.

Если выразить массу в кг, а ускорение в $м/сек^2$, то сила будет выражена единицей, которая в честь Ньютона называется ньютоном (обозначается n). 1 n есть сила, при действии которой масса 1 кг движется с ускорением 1 $м/сек^2$. Так, если масса 5 кг движется с ускорением 3 $м/сек^2$, то на нее действует сила

$$F = 5 \text{ кг} \cdot 3 \frac{м}{сек^2} = 15 \text{ н.}$$

Если же, как принято в физике, выразить массу в г, а ускорение в $см/сек^2$, то сила выразится в так называемых динах (обозначается $дин$). 1 $дин$ есть сила, при действии которой масса 1 г движется с ускорением 1 $см/сек^2$. Так, если масса 10 г движется с ускорением 30 $см/сек^2$, то на нее действует сила

$$F = 10 \text{ г} \cdot 30 \frac{см}{сек^2} = 300 \text{ дин.}$$

Дина значительно меньше ньютона, а именно:

$$1 \text{ н} = 1000 \text{ г} \cdot 100 \frac{см}{сек^2} = 10^5 \text{ дин.}$$

В технике часто выражают силу в килограммах ($кг$). Как было сказано в § 13, 1 $кг$ есть весовая единица силы, т. е. сила, с которой притягивается к Земле масса 1 кг в том месте Земли, где ускорение падающих тел имеет условленное значение, а именно 9,80665 $м/сек^2$. (Мы будем пользоваться приближенным значением 9,8 $м/сек^2$.) Отсюда видно, что

$$1 \text{ кг} = 1 \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{м}{сек^2} = 9,8 \text{ н} = 980\,000 \text{ дин.}$$

Если мы хотим, чтобы при вычислении по формуле $F = ma$ сила получилась в кГ , то ускорение надо выразить в м/сек^2 , а массу — в так называемых технических единицах массы (обозначаемых т. е. м.): 1 т. е. м. = 9,8 кг. Пусть, например, тело массы 2 кг движется с ускорением 3 м/сек^2 . Выразим действующую на него силу в кГ :

$$m = 2 \text{ кг} = \frac{2}{9,8} \text{ т. е. м.} = 0,204 \text{ т. е. м.},$$

$$F = 0,204 \text{ т. е. м.} \cdot 3 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2} = 0,612 \text{ кГ}.$$

§ 44. Вес и масса тела. Мы уже знаем (см. § 35), что в пустоте все тела (и тяжелые, и легкие) движутся с одним и тем же ускорением, направленным по вертикали вниз. Вдумаемся в этот замечательный факт. Прежде всего, заметим, что в пустоте сопротивление среды (например, воздуха) отсутствует и, следовательно, единственной силой, действующей на движущееся тело, является сила притяжения к Земле. Из того факта, что в данном месте земной поверхности ускорение всех падающих тел одно и то же, следует, что сила притяжения к Земле пропорциональна массе тела. Если, например, сила притяжения одного тела к Земле в два раза больше, чем другого, то и инертность этого тела в два раза больше, и ускорение получается тем же самым.

Представим себе теперь, что на столе лежит книга. Вес книги, т. е. сила, с которой книга давит на стол, равна, очевидно, силе притяжения книги к Земле. Обозначив вес книги P , мы можем написать:

$$P = mg.$$

Из этой формулы следует, что в отличие от массы тела, которая характеризует механические свойства тела независимо от того, где оно находится, вес тела в разных местах поверхности Земли различен вследствие того, что величина g в разных местах различна. Мы видели (§ 35), что на полюсах Земли величина g — наибольшая, в средних широтах она меньше, и меньше всего она на экваторе. Отсюда следует, что *вес любого тела — наибольший на полюсе и наименьший на экваторе*. Отсюда же следует, что вес любого тела на некоторой высоте над Землей *меньше*, чем на поверхности Земли. Разница в весе одного и того же тела в различных местах Земли или при подъеме на небольшую высоту невелика и практически неощутима.

Отметим, что к формуле

$$P = mg$$

относится все, что было сказано в § 43 о вычислениях по формуле

$$F = ma.$$

Если m выразить в $г$, а g — в $см/сек^2$, то P выразится в динах. Если m выразить в $кг$, а g — в $м/сек^2$, то P выразится в ньютонах. Наконец, если m выразить в технических единицах массы, а ускорение g — в $м/сек^2$, то P выразится в $кг$.

Из сказанного в § 43 о вычислении сил по формуле $F = ma$ ясно, что при расчетах надо внимательно следить, чтобы все входящие в формулу величины были выражены в надлежащих единицах. То же относится и к любым другим формулам, служащим для расчетов. Если, например, в формуле для расчетов равномерного движения мы выразим путь в метрах, а время — в секундах, то скорость будет выражаться в $м/сек$.

Особенно надо быть внимательным, если в условие задачи входят данные, выраженные в различных системах единиц или в допущенных ГОСТом внесистемных единицах. При решении таких задач надо все данные выразить в одной системе, лучше в системе СИ.

В технических расчетах часто приходится иметь дело с килограммами как единицами силы и веса ($кг$). Если при этом потребуются определить массу тела, то следует иметь в виду, что вес в $кг$ и масса в $кг$ выражаются одним и тем же числом (если отвлечься от колебаний в весе на различных широтах). Масса автомобиля «Волга», весящего 1460 $кг$, равна 1460 $кг$. Но не следует забывать, что эти физические величины выражены здесь в различных системах: вес — в технической, масса — в системе СИ. Поэтому, используя эти данные для решения задачи, надо вес выразить тоже по системе СИ (в ньютонах), т. е. $1460 \cdot 9,8 = 14\ 200$ н.

При выражении веса и массы в одной системе единиц численное равенство между ними, конечно, исчезает. Это очевидно из соотношения между весом и массой

$$P = mg.$$

Точно так же перестает существовать численное совпадение выражений для удельного веса и плотности, о котором мы говорили в § 15. Выражения этих физических величин в системе СИ для некоторых веществ приведены в таблице.

Вещество	γ (в $\frac{н}{м^3}$)	D (в $\frac{кг}{м^3}$)
Вода (при 4° С)	$9,8 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$
Ртуть	$1,33 \cdot 10^5$	$1,36 \cdot 10^4$
Алюминий	$2,6 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^3$
Медь	$8,8 \cdot 10^4$	$8,9 \cdot 10^3$
Сталь	$7,6 \cdot 10^4$	$7,8 \cdot 10^3$
Свинец	$11,1 \cdot 10^4$	$11,3 \cdot 10^3$

У п р а ж н е н и я

49. Выразить в единицах системы СИ и технических массу тела, вес которого равен 16 кг .

50. Выразить вес гири, масса которой равна 5 кг , в n и кг .

51. Пуля массы $9,8 \text{ г}$ вылетает из дула винтовки со скоростью 865 м/сек . Длина ствола $67,6 \text{ см}$. Считая движение пули в стволе равноускоренным, найдите ускоряющую силу.

52. Поезд весом 500 Т отходит от станции равноускоренно и через 20 сек достигает скорости 45 км/час . Сила сопротивления движению составляет $0,3\%$ веса поезда. Найдите силу тяги паровоза.

53. Через блок перекинут шнур, к концам которого подвешены грузы по 2 кг (рис. 51). С какими ускорениями будут двигаться грузы, если на правый груз положен перегрузок 20 г ? Массу блока считайте малой, а трением пренебрегите.

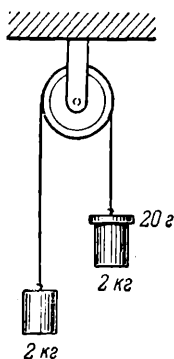


Рис. 51.

54. Из бокового отверстия сосуда бьет струя воды. Как изменится по сравнению с покоящимся сосудом скорость вытекания струи в случаях: а) сосуд равномерно опускается или поднимается; б) ускоренно поднимается; в) ускоренно опускается; г) свободно падает?

§ 45. Третий закон Ньютона.

Приступая к изучению динамики, мы с самого начала установили, что действия тел всегда *взаимны*: если тело A так действует на тело B , что скорость тела B меняется, то и тело B действует на тело A так, что меняется скорость тела A . Но изменение скоростей тел происходит при действии сил. Значит, силы, действующие на тела, всегда возникают парами; одна из них действует на

тело A , другая — на тело B . Одновременное появление сил, действующих на два тела, наглядно видно, например, при сближении двух одинаковых мячей: одновременно деформируются оба мяча (рис. 52), значит, одновременно возникают *две* упругие силы. Подобно этому, когда сталкиваются два железнодорожных вагона, то сжимаются буфера обоих вагонов, независимо от того, двигался до столкновения один вагон или двигались оба вагона.

Что можно сказать о силах взаимодействия тел? Произведем опыт с двумя одинаковыми шариками (A и B на рис. 53), находящимися на гладкой горизонтальной плоскости и соединенными резиновой нитью. Отдалим шарики друг от друга так, чтобы нить натянулась. При этом сразу возникнут две силы: нить тянет шарик A в сторону B и шарик B в сторону A . Отпустим шарики. Мы увидим, что шарики устремятся друг к другу и пройдут при этом одинаковые расстояния. Значит, они двигались с одинаковыми, но противоположно направленными ускорениями. Так как массы шариков равны, то отсюда следует, что на шарики действовали равные по величине и противоположно направленные силы. Заменим теперь один из шариков шариком большей массы и повторим опыт. Мы увидим, что шарик большей массы движется с меньшим ускорением, чем шарик

меньшей массы. На основании второго закона Ньютона мы можем заключить, что и в этом случае на шарики действуют силы, равные по величине, но противоположные по направлению. Эти простые опыты подводят нас к пониманию третьего закона Ньютона, который был открыт на основе тщательного изучения движения небесных тел: *силы взаимодействия тел равны по величине и противоположны по направлению.*

Этот закон имеет место всегда. Но иногда мы не можем обнаружить изменение скорости у одного из тел. Например, прыгая с большой баржи на берег или прыгая с берега (т. е. с Земли) в лодку, мы не замечаем, чтобы скорость баржи или Земли менялась. Дело здесь, очевидно, в соотношении масс. Масса баржи во много раз больше массы прыгающего с нее человека, а силы, действующие на баржу и на человека, равны друг другу. Поэтому скорость баржи изменяется при прыжке во столько раз меньше, по сравнению со скоростью человека, во сколько масса ее больше массы человека. Вот почему изменение скорости баржи оказывается неощутимо малым. А масса Земли столь велика по сравнению с массой человека, что нет смысла говорить об ускорении, получаемом ею при толчке от ног прыгающего человека. Разница в скоростях, полученных пулей и самим ружьем при отдаче, тоже объясняется разницей в массах пули и ружья. Если бы ружье имело

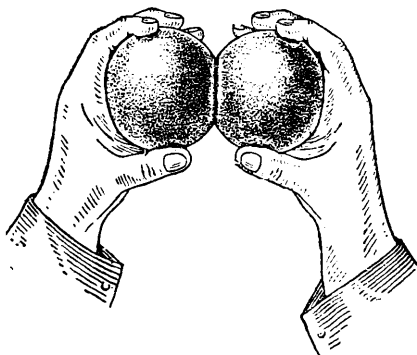


Рис. 52. При сближении рук деформируются оба мяча.

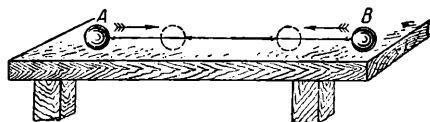


Рис. 53. Одинаковые шарики *A* и *B*, стягиваемые резиновой нитью, перемещаются на одинаковые расстояния.

такую же массу, как пуля, то оно отлетело бы при выстреле назад со скоростью самой пули.

Необходимо уяснить себе, что силы действия и противодействия, равные по величине и противоположные по направлению, никогда не уравниваются, так как они приложены к различным телам. При решении задач по механике следует строго различать, какие силы и к каким телам приложены.

§ 46. Реакции связей. Давление тела на опору. Препятствия, ограничивающие свободу перемещения тела, называют в механике связями. Так, для тела, находящегося на горизонтальной поверхности стола, стол будет связью, не допускающей падения тела. Для тела, подвешенного на веревке, связью будет веревка.

Ограниченное в своем движении тело действует на связь, вызывая деформацию связи: давление на стол прогибает его, натяжение веревки растягивает ее. Деформированная связь в свою очередь с равной силой (третий закон Ньютона) действует в обратном направлении на тело, противодействуя дальнейшей деформации. Сила, с которой связь действует на тело, называется реакцией связи.

Учитывать реакции связей приходится при решении задач, условия которых включают случаи и равновесия, и движения тела. Простейшие примеры равновесия тел под действием реакций связей были рассмотрены в § 39. Обратимся к рассмотрению задач на движение, при решении которых приходится учитывать действие связей.

Решая задачи динамики, следует придерживаться следующего плана: 1. Внимательно ознакомившись с условием задачи (помогает хороший чертеж), выяснить, какие силы действуют на данное движущееся тело, учитывая и реакции связей. 2. Найти одну результирующую силу, которой можно заменить действие в с е х п р и л о ж е н н ы х к т е л у с и л. 3. Подставить найденную результирующую силу в основное уравнение динамики $F = ma$ и решить это уравнение.

В качестве примера рассмотрим решение задачи, в которой нужно определить силу давления на опору при ускоренном движении в вертикальном направлении.

Условие задачи: человек весом 70 кг поднимается в лифте с ускорением $0,5 \text{ м/сек}^2$ (начало подъема). С какой силой давит он на пол кабины лифта?

Решение. 1. На человека действуют: сила притяжения к Земле P (вес) и реакция опоры N , направленная вверх, равная по величине искомой силе давления на пол F (третий закон Ньютона).

2. Результирующая двух противоположно направленных сил N и P равна $(N - P)$ и направлена вверх (лифт поднимается).

3. Запишем второй закон Ньютона:

$$N - P = ma,$$

откуда

$$F = N = P + ma.$$

При решении задач в системе СИ надо вес человека выразить в ньютонах $P = 70 \cdot 9,8 = 686 \text{ н}$.

Сила давления на пол кабины $F = 686 + 70 \cdot 0,5 = 721 \text{ н}$. Такое увеличение давления при подъеме с ускорением сравнительно с

давлением человека на пол, если бы он был неподвижен или поднимался равномерно, получило название «перегрузки».

Если лифт будет опускаться с ускорением, меньшим ускорения свободно падающего тела (падение будет сдерживаться прикрепленными к кабине тросами), то

$$F = P - ma.$$

И, наконец, при свободном падении (обрыв троса), когда $a = g$:

$$F = P - mg = 0,$$

т. е. давление на опору прекращается. Опора и тело движутся с одинаковым ускорением. Наступает состояние «невесомости».

§ 47. Невесомость. Мы можем иллюстрировать явление невесомости опытом с падающей доской и укрепленным на ней маятником (рис. 54). Когда доска подвешена неподвижно, маятник или покоится в вертикальном положении, или колеблется около него, динамометр показывает вес доски.

Пережжем нить, на которой была подвешена система доска — динамометр, и будем наблюдать систему в падении. Указатель динамометра остановится на нуле, маятник или застынет неподвижно в крайнем положении, или будет вращаться вокруг точки подвеса по инерции с постоянной скоростью, с той, какую он имел в момент начала падения. Мы наблюдаем «исчезновение» веса в падающей системе. Наступило состояние невесомости.

Явление невесомости наблюдается и в кабине космического корабля при полете за пределами атмосферы с выключенным двигателем.

При запуске космического корабля, пока он поднимается с огромным ускорением вверх, все тела в нем находятся в состоянии «перегрузок»: к силе тяжести как бы добавляется сила, в несколько раз большая силы земного притяжения и вызывающая в телах внутри корабля деформации, во столько же раз превышающие деформации под действием веса на поверхности Земли.

Когда корабль выйдет из плотных слоев атмосферы и достигнет заданной высоты, двигатель выключают и начинается свободное движение в поле тяготения. Кабина и все предметы в ней теперь находятся под действием единственной силы притяжения к Земле и другим небесным телам. Под действием этой силы кабина и предметы в ней подобно свободно падающим телам получают одинаковое ускорение, заставляющее их оставаться на орбите. Поэтому относительно кабины ускорение всех предметов, находящихся в кабине и движущихся вместе с ней по орбите, равно нулю. Исчезают давление на опору и связанные с ним деформации, что и означает «невесомость». Выпущенная из рук космонавта авторучка висит «неподвижно», вода не выливается из наклоненной бутылки. При движении корабля с выключенным двигателем все проявление силы тяжести внутри корабля прекращаются. Они снова приобретут и весьма серьезное значение при спуске корабля на Землю.

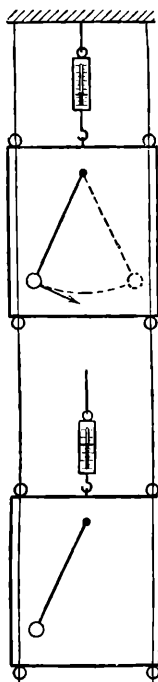


Рис. 54. Опыт с падающим маятником.

У п р а ж н е н и я

55. Одинаково ли натяжение веревок в случаях *a* и *б* на рис. 55?

56. Укажите проявления противодействия в следующих случаях: а) молоток вгоняет гвоздь в стену; б) камень падает на Землю; в) вентилятор гонит воздух.

57. Объясните, можно ли двигать парусное судно, надувая парус от сильного вентилятора, помещенного на судне? Что произойдет, если дуть мимо паруса?

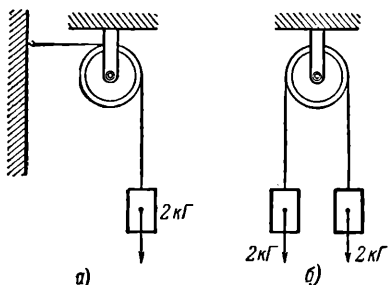


Рис. 55.

58. Два человека тянут веревку в разные стороны с силой в 5 кг каждый. Разорвется ли веревка, если она выдерживает натяжение до 6 кг ?

59. При выстреле из ружья его следует плотно прижимать к плечу. Почему при этом скорость отдачи уменьшается?

60. Движущая сила, создаваемая гребным винтом судна, равна 4 Т , сопротивление воды 3 Т . Не нарушается ли здесь закон равенства действия и противодействия? С каким ускорением идет судно, если его водоизмещение 2000 т ?

61. Определите натяжение каната, поднимающего кабину лифта, вес которой с пассажирами равен 1500 кг . Расчет сделайте для начала подъема с ускорением $1,7 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$, для установившегося равномерного движения и для конца подъема с ускорением $-1,7 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$.

62. Лифт, описанный в предыдущей задаче, опускается, причем начинает движение равноускоренно $\left(1,7 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}\right)$, затем движется равномерно и под конец — равнозамедленно $\left(-1,7 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}\right)$. Определите натяжение каната в трех этапах движения и сопоставьте с результатами предыдущей задачи.

§ 48. Импульс. Как мы видели, второй закон Ньютона можно выразить формулой

$$F = ma.$$

Рассмотрим случай, когда тело движется прямолинейно, с постоянным ускорением a в течение отрезка времени Δt , причем скорость тела меняется от v_1 до v_2 :

$$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}.$$

Умножив обе части равенства на массу тела m , получим:

$$am = F = \frac{mv_2 - mv_1}{\Delta t} = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t},$$

где знаком Δ обозначен прирост величины, стоящей в скобках. Произведение массы тела на его скорость есть важная физическая

величина, называемая количеством движения, или импульсом *) этого тела. Импульс тела есть величина векторная, направление которой совпадает с направлением скорости тела. Мы получили, таким образом, новое выражение второго закона Ньютона.

Понятие импульса тела очень наглядно характеризует механическое движение: оно показывает нам и *что* движется, и *как* движется. Пылинка, медленно плывущая в воздухе, обладает, очевидно, очень малым импульсом (малы и m , и v). Идущий полным ходом океанский теплоход обладает громадным по сравнению с пылинкой импульсом (и m , и v очень велики). Формула

$$F = \frac{\Delta (mv)}{\Delta t}$$

показывает, что для того, чтобы остановить тело в течение определенного отрезка времени Δt , например 1 сек, требуются *разные* силы, в зависимости от импульса тела. Для остановки пылинки потребуется ничтожная сила, а для теплохода — громадная. Этим не исчерпывается значение понятия импульса. Особенно важное значение имеет закон сохранения импульса взаимодействующих тел, являющийся следствием законов Ньютона. Выведем этот закон для случая двух точечных тел, движущихся вдоль соединяющей их прямой.

Обозначим массы тел m_1 и m_2 , их ускорения a_1 и a_2 . Действующие на них силы равны $m_1 a_1$ и $m_2 a_2$. На основании третьего закона Ньютона можно написать:

$$m_1 a_1 = - m_2 a_2.$$

Если мы обозначим скорости первого и второго тел в начале и конце взаимодействия соответственно через v_1 , v_1' и v_2 , v_2' , то

$$a_1 = \frac{v_1' - v_1}{t}, \quad a_2 = \frac{v_2' - v_2}{t}.$$

Следовательно,

$$\frac{m_1 (v_1' - v_1)}{t} = - \frac{m_2 (v_2' - v_2)}{t}.$$

Сокращая на t , раскрывая скобки и перенося члены, получим:

$$m_1 v_1' + m_2 v_2' = m_1 v_1 + m_2 v_2.$$

*) В дальнейшем неудачный термин «количество движения» всюду заменен современным термином «импульс тела», или, кратко, «импульс». Не следует смешивать «импульс тела» с «импульсом силы», равным произведению силы на время ее действия. При движении тела под действием силы (с ускорением) импульс силы показывает приращение количества движения (импульса тела) за промежуток времени движения: $F \cdot \Delta t = \Delta (mv)$.

Это соотношение показывает, что сумма импульсов тел после взаимодействия такова же, как и до их взаимодействия. Можно доказать, что и при взаимодействии любого числа тел общая сумма их импульсов не меняется. Это и есть закон сохранения импульса. Он относится к замкнутой системе тел, т. е. такой системе, в которой нет тел, взаимодействующих с какими-либо телами вне ее.

Рассмотрим примеры, поясняющие закон сохранения импульса. В опыте, изображенном на рис. 46, а, до удара левый шарик обладал некоторым импульсом, а правый покоился и его импульс был равен нулю. В результате удара импульс левого шарика стал равным нулю, а правый получил такой же импульс, какой потерял левый, и общая сумма их импульсов не изменилась.

Перед выстрелом из ружья сумма импульсов ружья и пули равна нулю, так как оба тела покоятся. В результате выстрела пуля получает некоторый импульс вперед (будем считать его положительным), а ружье приобретает такой же импульс назад (его надо считать отрицательным). Общая сумма импульсов по-прежнему равна нулю.

Закон сохранения импульса показывает, что импульс любого тела меняется только в том случае, если какое-либо другое тело (или несколько тел) меняет свой импульс на ту же величину в противоположном направлении. Закон сохранения импульса есть, таким образом, выражение всеобщей взаимосвязи механических явлений. В свете этого закона становится ясной сущность закона инерции. Если на тело не действуют никакие силы, то скорость его остается постоянной потому, что оно никуда не передает и ниоткуда не получает импульса. Если же на тело действуют взаимоуравновешенные силы, то оно отдает за некоторый отрезок времени такой же импульс, какой само получает. Например, при равномерном движении поезда паровоз получает от рельсов такой же импульс, какой отдают рельсам вагоны. Поэтому общий импульс паровоза и вагонов, а следовательно, и скорость поезда не меняется.

Покажем на примере, как пользоваться законом сохранения импульса для расчетов. Какую скорость отдачи получит орудие, масса которого равна 800 кг, если оно выбрасывает снаряд с массой в 2 кг со скоростью 500 м/сек? Так как общий импульс орудия и снаряда до выстрела равнялся нулю, то, пренебрегая трением орудия о почву и принимая, таким образом, систему орудие — снаряд за замкнутую, можно написать:

$$800 \text{ кг} \cdot v + 2 \text{ кг} \cdot 500 \frac{\text{м}}{\text{сек}} = 0,$$

откуда

$$v = -1,25 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

Знак минус означает, что орудие движется в направлении, противоположном направлению движения снаряда. Как видно, в этом расчете совершенно не затрагивался вопрос о силах, о времени взаимодействия, и определение скорости одного из тел оказалось простым.

У п р а ж н е н и я

63. По горизонтальному участку железнодорожного пути движется со скоростью $1,5$ м/сек вагон, масса которого вместе с грузом 30 т, и доходит до неподвижного вагона массой 45 т. После этого происходит автоматическая сцепка и вагоны далее движутся вместе. Определите скорость их совместного движения.

64. Шарик массой 200 г движется со скоростью 150 см/сек и ударяет в неподвижный шарик массой 100 г. С какой скоростью движется после удара первый шарик, если второй движется со скоростью 200 см/сек в том же направлении, в котором первый двигался до удара?

65. Шарик массой 100 г упал на стол с высоты 40 см и, отскочив, поднялся на высоту 30 см. Какой импульс он передал столу?

§ 49. Реактивное движение. На рис. 56 схематически изображена ракета. Выбрасывая вниз газы — продукты сгорания находящихся внутри нее горючих веществ, — ракета быстро движется вверх.

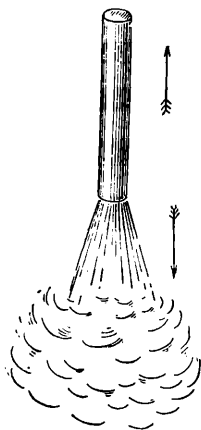


Рис. 56. Ракета выбрасывает продукты сгорания вниз, а сама поднимается вверх.

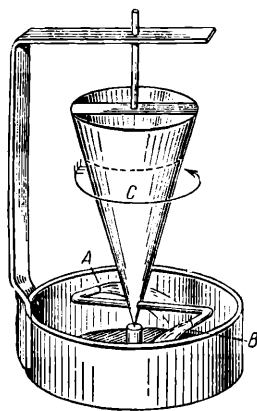


Рис. 57. При вытекании струй воды из трубок A и B сосуд C вращается.

Объяснение этому явлению аналогично объяснению отдачи ружья. Противодействие газов, выбрасываемых вниз, вызывает движение ракеты вверх. Так как масса ракеты относительно невелика, то ракета движется с большим ускорением. Противодействие, получающееся при выбрасывании струи газа или жидкости, называется реакцией струи. На рис. 57 показан прибор, в котором

реакция струй, вытекающих из отверстий трубок *A* и *B*, заставляет вращаться сосуд *C* (сегнерово колесо). Движение, вызываемое реакцией струи, называется реактивным движением. Двигатели, вызывающие движение самолетов, автомобилей и т. п. по принципу ракеты, называются реактивными двигателями.

Основоположником применения реактивных двигателей для полета является знаменитый русский ученый К. Э. Циолковский. Отметим также, что один из первых проектов реактивного воздухоплавательного прибора был создан русским революционером Н. И. Кибальчицем *).

Циолковский разработал теорию движения ракет. Формула Циолковского для определения скорости ракеты получила всеобщее признание. Идеи Циолковского о конструкции межпланетных кораблей легли в основу современной ракетной техники. Главная труд-

ность в осуществлении космических полетов состоит пока в необходимости иметь на борту ракеты огромное количество топлива. Циолковский впервые рекомендовал составные многоступенчатые ракеты (две—четыре ступени). Двигатели ступеней последовательно вступают в действие, при-

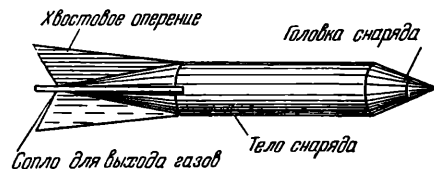


Рис. 58. Внешний вид реактивного снаряда.

чем отработавшая ступень автоматически отбрасывается и не обременяет своим весом продолжающую свой полет оставшуюся часть ракеты.

В последнее время реактивное движение получает все большее применение в технике. Появились самолеты, снабженные реактивными двигателями, позволяющими развивать громадные (тысячи километров в час) скорости. Эти самолеты могут летать на таких высотах, где слишком значительное разрежение воздуха не позволяет использовать пропеллер. Появились снабженные реактивными двигателями снаряды, которые могут покрывать громадные расстояния, недостижимые для обычных артиллерийских снарядов. Реактивные снаряды (рис. 58) теперь также применяются для исследований верхних слоев атмосферы.

С помощью реактивных двигателей в 1957 г. в СССР был впервые в истории осуществлен запуск межконтинентальной ракеты, сначала поднимающейся на большую высоту реактивным движением, а затем движущейся в верхних слоях атмосферы без двигателя. Такой

*) Н. И. Кибальчиц создал свой замечательный проект в 1881 г. в тюрьме, ожидая казни. Он просил довести этот проект до сведения ученых, но департамент полиции не выполнил его предсмертной просьбы и проект был обнаружен только через 36 лет.

снаряд достигает удаленных на несколько тысяч километров целей точно по заданной траектории в течение нескольких минут. Наконец, реактивные двигатели позволили произвести 4 октября 1957 г. в СССР запуск первого в истории человечества искусственного спутника Земли. Спутник в виде шара диаметром 58 см и массой 83,6 кг и ракета-носитель долгое время двигались над поверхностью Земли на высоте в несколько сотен километров, демонстрируя этим изумительные успехи советской науки и техники.

Вслед за первым спутником в СССР было запущено еще много искусственных спутников Земли, была запущена космическая ракета в сторону Луны, совершен облет Луны и сфотографирована ее невидимая с Земли сторона. Полеты космических кораблей в направлении к Венере и к Марсу дали ученым ряд ценных сведений об этих далеких космических объектах. Исследования путем запуска спутников продолжаются.

Первый полет человека в космос, осуществленный 12 апреля 1961 года Юрием Алексеевичем Гагариным, и последующие полеты других наших славных космонавтов внесли неоценимый вклад в сокровищницу науки и утвердили в веках славу нашей Родины в деле освоения космического пространства.

§ 50. Закон независимости действия сил. В большинстве случаев тело находится во взаимодействии не с одним, а многими другими телами, иначе говоря, находится под действием одновременно нескольких сил.

Как мы уже видели (§ 42), из факта прямой пропорциональности между силой и ускорением

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

следует, что ускорение, сообщаемое данной силой данному телу, не зависит ни от чего, кроме величины этой силы и массы тела. В частности, оно не зависит от действия других сил на данное тело.

Если к телу приложено одновременно несколько сил, то каждая из этих сил сообщает телу определяемое вторым законом ускорение так, как если бы других сил не было вовсе. Это утверждение называют иногда законом независимости действия сил.

По существу сформулированное утверждение есть просто повторение другими словами содержания второго закона Ньютона о пропорциональности силы и ускорения. Так, если действуют n равных сил, то ускорение увеличивается в n раз. Поясним на примере применение закона независимости действия сил в условиях конкретных задач.

В задаче о поднимающемся с ускорением лифте (стр. 84) можно применить закон Ньютона отдельно для определения ускорения

вверх, сообщаемого двигателем лифта: $j = \frac{N}{m}$, и ускорения вниз, вызываемого земным притяжением: $g = \frac{P}{m}$. Сложение (с учетом направлений векторов) даст результирующее ускорение

$$a = \frac{N}{m} - \frac{P}{m},$$

откуда $ma = N - P$. Тот же результат можно было получить, определяя первоначально результирующую всех действующих на тело сил, а потом применяя второй закон Ньютона.

Если равнодействующая сил равна нулю (силы уравновешиваются), то и ускорение равно нулю, т. е. тело или покоится, или движется равномерно.

§ 51. Силы трения. Как известно, существуют три вида трения: трение покоя, трение скольжения и трение качения *). Для демонстрации трения покоя обычно пользуются прибором, который называется трибометром (рис. 59).

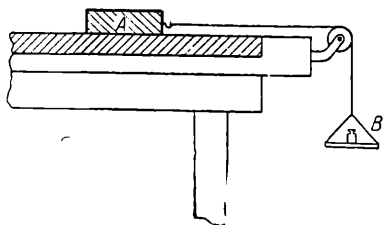


Рис. 59. Трибометр.

Положим на доску трибометра брусок A и поставим на чашку B небольшую гирьку. Брусок останется на месте. Очевидно, сила тяги гирьки уравновешивается противоположно направленной силой, действующей между доской и бруском. Это и

есть сила трения. Поскольку брусок остается в покое, эта сила называется силой трения покоя.

При увеличении силы тяги будет согласно третьему закону Ньютона увеличиваться и сила трения и брусок будет оставаться в покое, пока, наконец, сила тяги не достигнет некоторого предельного значения, после чего брусок начнет скользить по поверхности доски.

Следовательно, в зависимости от величины внешней силы сила трения покоя может принимать любые значения между нулем и некоторым максимальным, предельным значением, за которым начинается скольжение. Обычно под силой трения покоя понимают именно это максимальное значение.

При дальнейшем увеличении силы тяги движение становится ускоренным. Если попробовать применить второй закон Ньютона, то увидим, что при достигнутом ускорении и известной массе бруска сила, движущая брусок (сила тяги), оказывается больше, чем тре-

*) Первоначальные сведения о трении даются в восьмилетней школе. Из программы техникумов (1962) тема «Трение», как самостоятельная, исключена.

буется по формуле $F = ma$. Очевидно, ускорение бруску сообщает только часть силы тяги, а другая часть уравнивает силу трения, направленную против движения. Эта сила называется силой трения скольжения. Итак, $F_{\text{тяги}} = F_{\text{тр}} + F_{\text{уск}}$. Это надо иметь в виду при решении задач, в которых приходится учитывать силы трения. При равномерном движении бруска $F_{\text{тяги}} = F_{\text{тр}}$.

Заметим, что сила трения при равномерном движении несколько меньше, чем максимальная сила трения покоя (в последний момент перед началом скольжения). Это известно и из жизненных наблюдений: сдвинуть тяжело нагруженные сани с места труднее, чем продолжать уже начавшееся их движение.

§ 52. Коэффициент трения. Одной из причин возникновения силы трения является наличие неровностей, шероховатостей соприкасающихся поверхностей тел. Чем сильнее прижимается одна поверхность к другой, тем глубже входят выступы одной поверхности во впадины другой и тем большая сила нужна для преодоления этого механического препятствия. Это подтверждает опыт с трибометром. Увеличивая силу, прижимающую брусок к доске (в данном случае вес), вдвое, мы должны будем вдвое увеличить и силу тяги, необходимую для начала движения. Таким образом, можно считать силу трения прямо пропорциональной силе давления по перпендикуляру к плоскости соприкосновения тел (силе нормально-го давления P_n):

$$F_{\text{макс}} = fP_n.$$

Коэффициент пропорциональности в этой формуле получил название коэффициента трения покоя. Его можно определить как отношение силы трения к силе нормального давления:

$$f = \frac{F_{\text{макс}}}{P_n}.$$

Можно считать, что коэффициент трения есть величина постоянная для данных двух поверхностей. Отметим, что силой нормального давления не всегда является вес движущегося тела. Если прижать пальцем брусок к вертикальной стене (рис. 60), то прижимающей силой будет сила, направленная перпендикулярно к стене, а вес будет тогда силой, которая стремится вызвать движение вниз.

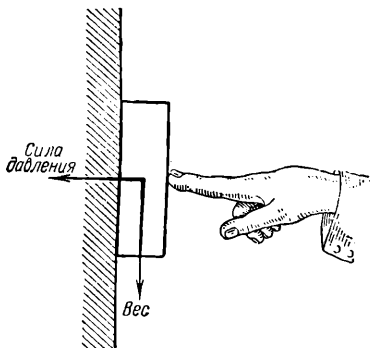


Рис. 60. Вес бруска уравнивается силой трения, обусловленной наличием силы давления пальца.

Опыты с трибометром показывают, что сила трения не зависит от величины поверхности трущихся тел: мы можем повернуть брусок любой гранью — сила трения от этого не изменится. Коэффициент трения зависит от материала трущихся поверхностей, от характера обработки их, от наличия смазки между поверхностями. В нижеследующей таблице даны средние значения коэффициента трения покоя:

Чугун по чугуну	0,19 — 0,21
Дерево по дереву	0,3 — 0,5
Деревянные полозья саней по снегу . . .	0,04
Обитые сталью полозья по льду	0,02

Как уже было сказано, сила трения скольжения (равная силе тяги при равномерном движении) меньше максимальной силы трения покоя. Поэтому и коэффициент трения скольжения несколько меньше коэффициента трения покоя. Кроме того, сила трения и коэффициент трения скольжения зависят от скорости скольжения. При небольших скоростях это, впрочем, мало заметно.

§ 53. Значение трения покоя в технике и в быту. Роль трения в жизни и в технике очень велика. В машинах сила трения часто

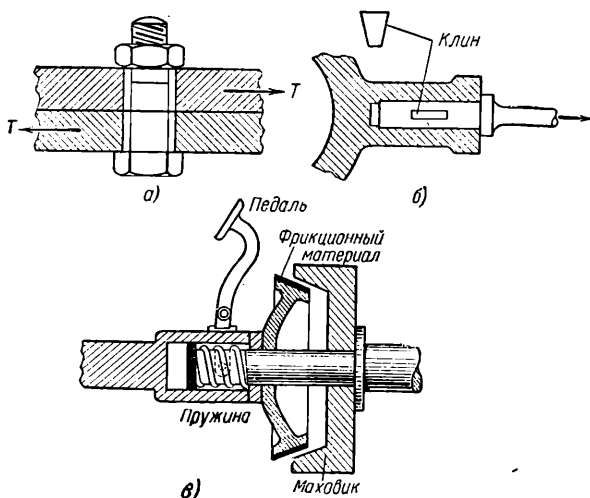


Рис. 61. а) Болтовое соединение создает трение между листами, препятствующее их смещению; б) клиновое соединение штока паровой машины с ползуном; в) муфта сцепления на автомобиле (фрикционная передача).

мешает их работе, ведет к потерям мощности машин и к износу деталей. В некоторых случаях трение является полезным: благодаря трению осуществляется соединение частей машин (болтовое и кли-

новое, рис. 61, а и б) и передача движения между ними (ременная, фрикционная передачи, рис. 61, в). С трением приходится считаться не только при изучении движения, но и при исследовании вопроса о равновесии тел. Приставленная к стене доска (рис. 62) не могла бы держаться без трения. Вся наша жизнь была бы невозможна, если бы не было трения. Мы не могли бы ходить, предметы не могли бы оставаться на своих местах, малейший толчок приводил бы их в движение, мы ничего не могли бы удерживать в руках — предметы выскальзывали бы из них, как мокрый кусок мыла.

На рис. 63 изображена лошадь, везущая воз по санному пути. Движение лошади и воза происходит благодаря взаимодействию лошади с Землей при наличии трения покоя, действующего со стороны дороги на подковы лошади. Если дорога скользкая, ноги лошади скользят назад. Этому препятствует трение покоя. Полозья саней испытывают трение, направленное в сторону, обратную движению. Если трение покоя между дорогой и подковами лошади больше трения скольжения между полозьями и дорогой, лошадь и воз движутся ускоренно. Если же эти силы равны друг другу, движение будет равномерным.

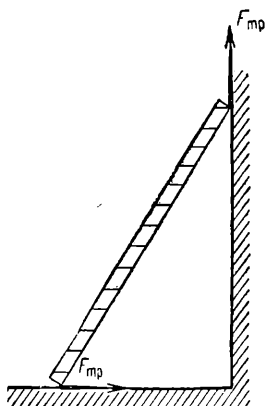


Рис. 62. Доска не соскальзывает вниз, удерживаемая силой трения.

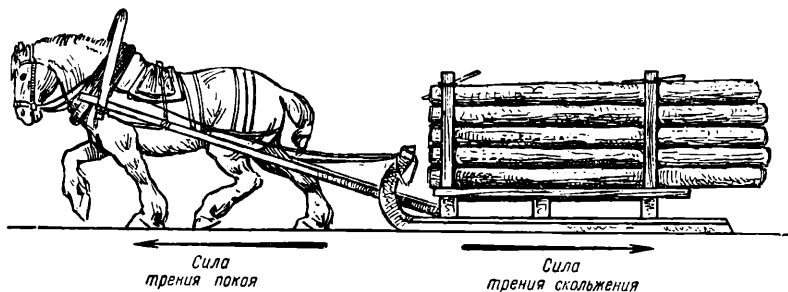


Рис. 63. Силы трения, действующие при движении лошади и саней.

§ 54. Трение покоя при качении. Если при качении не происходит скольжения, то, несмотря на движение катящегося тела, точки соприкосновения в каждый момент находятся в покое друг относительно друга. Поэтому для движения катящихся тел (колес поезда, автомобиля) большое значение имеет трение покоя. Разберем это подробнее.

Двигатель вращает ведущие колеса локомотива. Если бы при этом паровоз оставался на месте, то колеса проскальзывали бы по рельсам. Но скольжению

препятствует сила трения покоя (иногда говорят «сила трения сцепления»), действующая со стороны рельсов на обод колес. Сила трения покоя всегда противоположна тому направлению, в котором должно было бы возникнуть скольжение, если бы этой силы не существовало. В данном случае эта сила и приводит локомотив в движение по рельсам.

Чтобы локомотив мог двигать состав, необходимо, чтобы сила тяги равнялась сопротивлению всего поезда или была больше него; она равна сопротивлению при равномерном движении поезда и больше него при начале движения, сообщая паровозу ускорение, необходимое для перехода от покоя ($v_0 = 0$) к движению с некоторой скоростью v . Величина силы тяги, возникающая из-за трения сцепления ведущих колес с рельсами, зависит от силы, приложенной к колесам со стороны двигателя, и от веса локомотива, приходящегося на ведущие колеса. Чем больше мощность, развиваемая двигателем, тем с большей силой отталкивается локомотив от рельсов. Эта сила может достичь величины, способной преодолеть сопротивление состава, вес которого может быть во много раз больше веса локомотива.

Бегущие колеса вагонов, поскольку к ним не приложено вращательного действия двигателя, находятся только под действием трения качения, препятствующего их движению. Когда двигатель прекратит работу, колеса всего состава будут испытывать только тормозящее действие трения качения и поезд начнет замедлять свое движение. При необходимости резкого торможения к колесам вагонов прижимаются тормозные колодки (трение скольжения).

Трение сцепления ведущих колес с рельсами может оказаться иногда недостаточным, и тогда колеса начинают буксовать. Это может случиться или при слишком большом весе состава, или при недостаточном сцепном весе локомотива, или при выпадении снега и дождя, смачивающих рельсы. В последнем случае приходится под ведущие колеса подсыпать на рельсы песок. Для создания необходимого коэффициента трения резиновые покрышки автомобильных шин снабжают узорным рисунком, а в гололедицу на ведущие колеса наматывают специальные цепи.

У п р а ж н е н и я

66. Почему человек не может сдвинуть с места каменную глыбу весом в несколько тонн, лежащую на земле? Почему он может перемещать ту же глыбу, лежащую на плоту?

67. Найдите сцепной вес паровоза (вес, приходящийся на ведущие колеса), если сила тяги должна равняться 16 Т, а коэффициент трения покоя равен 0,2.

68. Какую силу надо приложить, чтобы передвигать равномерно по цементному

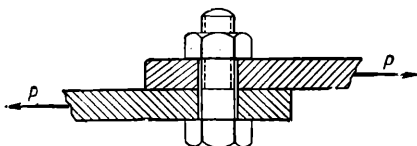


Рис. 64.

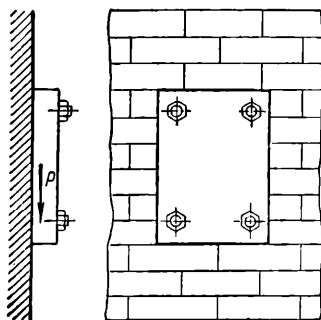


Рис. 65.

полу деревянный ящик весом 200 кг (соответствующий коэффициент трения равен 0,18)?

69. Какую работу совершила лошадь при перевозке дров (вес саней с дровами 1200 кг) по санному пути на расстояние 5 км?

70. Определите затяжку болта (силу, создающую трение между листами), если силы PP , стремящиеся сдвинуть листы (рис. 64), равны 300 кг , а коэффициент трения между листами $0,2$.

71. Определите затяжку каждого из четырех болтов, крепящих чугунную плиту весом $P = 200 \text{ кг}$ к вертикальной кирпичной стене (рис. 65), если коэффициент трения чугуна о кирпич $0,4$.

§ 55. Лабораторная работа № 3. Проверка второго закона Ньютона. Значение работы. Работа позволяет применить на практике законы равноускоренного движения и выяснить зависимость ускорения от движущей силы и массы. Не следует рассматривать эту работу как доказательство или вывод второго закона Ньютона, это только иллюстрация его. Справедливость законов Ньютона подтверждается точностью теоретических выводов механики, техники и астрономии.

Принадлежности. Если в технике нет специального прибора с движущейся тележкой для демонстрации законов динамики, то для проведения лабораторной работы можно воспользоваться установкой (рис. 66), которая состоит из штатива с удлиненным стержнем, легкоподвижного блока, рейки и набора грузов. Штатив укрепляется при помощи струбцины на краю стола с таким расчетом, чтобы грузы при своем движении не задевали за край стола. Для уравнивания трения и инерции блока к грузу справа добавляется небольшой грузик (подбираем опытным путем, добиваясь равномерного движения). Грузы удерживаются в покое при помощи тонкой нити, которая зажимается в бельевой зажим выше рейки. Для отсчета времени пользуемся секундомером.

Выполнение работы. Работа состоит из двух частей:

1. Проверка зависимости ускорения от силы при постоянной массе. 2. Проверка зависимости ускорения от массы при постоянной силе. Добавляем к правому грузу еще перегрузок (10 Г), разжимаем зажим, пуская одновременно секундомер. Система грузов приходит в движение, и когда правый груз достигнет закрепленной на расстоянии $S = 40 \text{ см}$ дощечки, останавливаем секундомер. Опыт повторяем при перегрузках в 20 Г и 30 Г . Изменением массы при смене перегрузков пренебрегаем, так как оно мало по сравнению с общей массой (основные грузы берутся по 500 Г). Ускорение

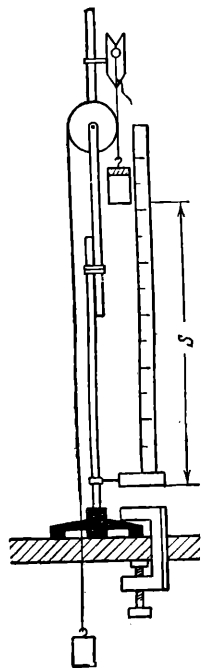


Рис. 66.

вычисляем по величине пройденного пути и времени. Результаты наблюдений сводятся в следующую таблицу:

Сила	Общая масса	Путь	Время	Ускорение	a/F
10 Г		40 см			
20 Г		40 см			
30 Г		40 см			

2. Массы основных грузов последовательно 400, 500 и 600 г. Перегрузок — постоянный 10 Г. Сводка результатов:

Сила	Общая масса	Путь	Время	Ускорение	$m \cdot a$
10 Г		40 см			
10 Г		40 см			
10 Г		40 см			

В данной работе ограничиваемся только установлением прямой пропорциональности силы и ускорения и обратной пропорциональности массы и ускорения, не определяя коэффициентов пропорциональности. Детальное описание работы можно найти в книге: Гирке и Шпрокхоф, Эксперимент по курсу элементарной физики, ч. 1, Учпедгиз, 1959.

ЭЛЕМЕНТЫ СТАТИКИ. ДЕФОРМАЦИИ

§ 56. Равнодействующая сил. Мы уже знаем (§ 39), что две равные прямопротивоположные силы, приложенные к какой-либо точке тела, не производят на него никакого действия, т. е. уравниваются.

Рассмотрим теперь случай, когда уравнивается несколько сил. Повесим грузик на двух расходящихся под углом нитках

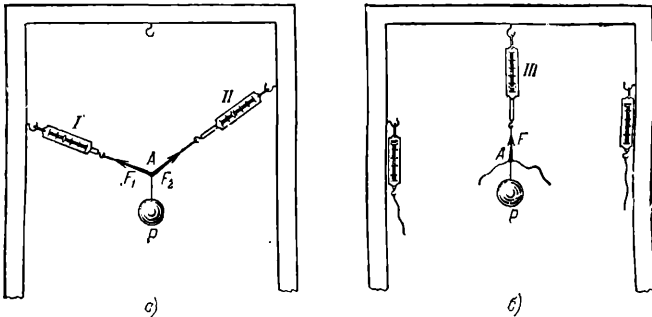


Рис. 67. а) Натяжение нитей F_1 и F_2 , измеряемые динамометрами I и II, уравнивают вес грузика P; б) боковые нити пережжены, и вес грузика P уравнивается натяжением одной нити, измеряемым динамометром III.

(рис. 67, а). На точку A нитки действуют три силы: силы натяжения нитей F_1 и F_2 и вес грузика P. Эти три силы уравниваются. Теперь привяжем в точке A еще одну нитку, закрепим ее в вертикальном положении так, чтобы она не была натянута, и затем пережжем две первые нитки. При этом третья нитка натянется и грузик останется висеть (рис. 67, б), следовательно, вес грузика уравнивается теперь силой F. Итак, действие силы F заменило действие двух сил F_1 и F_2 . Сила, действие которой заменяет совместное действие нескольких сил, называется их равнодействующей.

Сила P , уравнивающая силы F_1 и F_2 , очевидно, равна по величине равнодействующей и прямо противоположна ей по направлению.

Если бы мы подвесили наш грузик на трех нитках, а затем заменили бы их одной ниткой, то очевидно, что натяжение этой одной нитки заменило бы натяжение трех первых, т. е. мы заменили бы одной силой три силы.

Вообще действие на какую-либо точку тела любого числа сил можно заменить действием одной силы — равнодействующей.

§ 57. Перенос точки приложения силы в твердом теле. Все тела, в том числе и твердые, меняют свою форму при их растяжении и сжатии. Это изменение формы тел и вызывает появление упругих

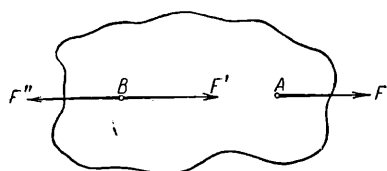


Рис. 68. Перенос точки приложения силы.

сил, уравнивающих приложенные силы. Однако почти всегда изменение формы твердых тел мало. В дальнейшем для упрощения рассуждений мы будем пренебрегать изменениями формы твердых тел при действии сил.

Докажем, что в твердом теле можно переносить точку приложения силы по ее направлению.

Пусть, например, к твердому телу приложена сила F в точке A (рис. 68). Мы можем приложить в точке B две противоположные силы, равные F (F' и F''). Силы F и F'' взаимно уравниваются. Остается сила F' , равная F и приложенная в точке B .

§ 58. Сложение сил. Нахождение равнодействующей нескольких сил называется сложением сил.

Очевидно, что при равновесии равнодействующая всех сил равна нулю.

От чего зависят величина и направление равнодействующей двух сил? Мы можем узнать это, измеряя складываемые силы и силу, уравнивающую их, т. е. равную и противоположную равнодействующей. Подобные измерения показывают, что равнодействующая двух сил зависит, во-первых, от их величин, а во-вторых, от угла между ними.

На рис. 69 изображено построение равнодействующей двух сил. Из конца вектора каждой из сил надо провести линии, параллельные векторам другой силы, т. е. построить параллелограмм. Диагональ этого «параллелограмма сил» и будет равнодействующей.

Равнодействующая двух сил может иметь различную величину в зависимости от угла между направлениями сил. Из геометрических соображений видно, что она не может быть больше суммы этих сил и меньше их разности. Так, например, равнодействующая сил 20 кг

и 15 кг может иметь любые значения в пределах от $20 \text{ кг} - 15 \text{ кг} = 5 \text{ кг}$ до $20 \text{ кг} + 15 \text{ кг} = 35 \text{ кг}$.

В случае, если силы имеют одинаковое направление, параллелограмм вытягивается в прямую и равнодействующая равна сумме сил. Если же силы направлены противоположно, то равнодействующая равна их разности и направлена в сторону большей силы.

Рассмотрим пример применения правила параллелограмма сил. Пусть

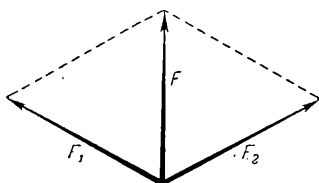


Рис. 69. Сила F является равнодействующей сил F_1 и F_2 .

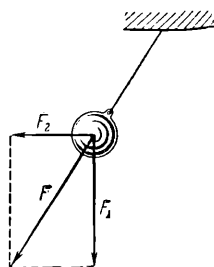


Рис. 70. Графическое определение силы, с которой натянута веревка.

на груз весом $F_1 = 95 \text{ кг}$, висающий на веревке, действует сила $F_2 = 60 \text{ кг}$ в горизонтальном направлении (рис. 70). Определим силу F , с которой натянута веревка.

Она является равнодействующей сил F_1 и F_2 . Построим векторы F_1 и F_2 , пользуясь масштабом $50 \text{ кг} = 1 \text{ см}$, т. е. векторы длиной $1,9 \text{ см}$ и $1,2 \text{ см}$. Измерив вектор F , найдем, что он имеет длину приблизительно $2,2 \text{ см}$, что соответствует 110 кг .

§ 59. Треугольник и многоугольник сил. Вместо сложения сил по правилу параллелограмма часто применяют сложение по правилу треугольника. Из произвольной точки O (рис. 71) проводят на чертеже отрезок, равный и параллельный одному из данных векторов сил F_1 (см. рис. 69), затем из конца этого отрезка проводят отрезок, равный и параллельный вектору F_2 , и, наконец, замыкают треугольник, соединяя начало первого вектора с концом второго. Замыкающая сторона силового треугольника и представит равнодействующую R .

Сложение по правилу параллелограмма или по правилу треугольника называется геометрическим и может быть применено для любых векторных величин: сил, скоростей, ускорений, импульсов и т. д.

Если на тело действует несколько сил, то, применяя правила геометрического сложения, можно последовательно строить параллелограммы, складывая сначала две силы, потом равнодействующую

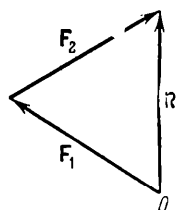


Рис. 71. Сложение сил по правилу треугольника сил.

щую этих сил с третьей силой и т. д. Проще, однако, применить правило многоугольника. Из точки O как начала (рис. 72) провести вектор, изображающий по величине и направлению силу F_1 , потом из конца первого вектора провести второй F_2 , третий F_3 и т. д.

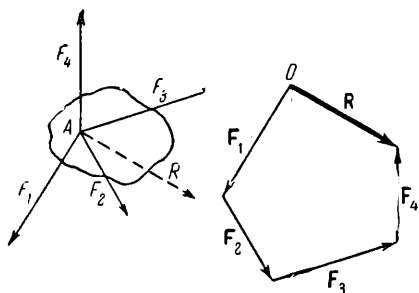


Рис. 72. Многоугольник сил.

Замыкающий полученную ломаную линию вектор R и представит собой равнодействующую силу. Остается перенести эту равнодействующую в точку A , к которой приложены все данные силы.

Порядок, в котором производится последовательное присоединение векторов, не изменит окончательного результата, хотя вид ломаной линии изменится до неузнаваемости.

Предлагаем учащимся самим

убедиться в этом на опыте, складывая данные силы в различной последовательности.

Если при сложении всех сил, действующих на какое-нибудь тело, треугольник или многоугольник сил окажется замкнутым, то равнодействующей проводить не придется — она равна нулю, т. е. силы друг друга уравновешивают.

У п р а ж н е н и я

72. Может ли равнодействующая сила 10 н и 2 н быть равна 15 н, 10 н, 5 н?

73. Определите равнодействующую сил 30 н и 40 н, действующих под углами 90° , 60° , 45° .

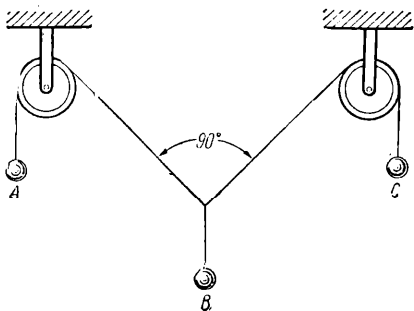


Рис. 73.

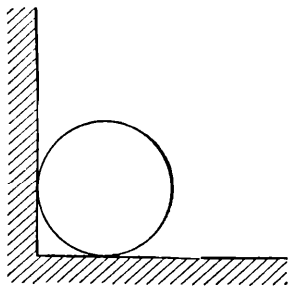


Рис. 74.

74. Изобразите на чертеже силы, действующие на бревно, плавающее в воде. Чему равна равнодействующая этих сил?

75. Изобразите на чертеже силы, действующие на груз, лежащий на наклонной платформе, и их равнодействующую.

76. В установке, показанной на рис. 73, веса грузов A , B и C равны друг другу. Груз B удерживают рукой, а нить, к которой привязан груз B , вертикальна. Куда двинется груз B , если его отпустить?

77. Начертите векторы одинаковых сил, равнодействующая которых равна нулю, в следующих случаях: а) две силы; б) три силы; в) четыре силы, лежащие в одной плоскости.

78. На горизонтальном полу лежит, касаясь вертикальной стены, шар (рис. 74). Можно ли говорить в данном случае о реакции стены?

§ 60. Разложение сил. Выше мы отыскивали по известным силам их равнодействующую. Часто необходимо решать и обратную задачу. Например, фонарь можно повесить на одной проволоке, как показано на рис. 75, *а*. В этом случае сила натяжения проволоки

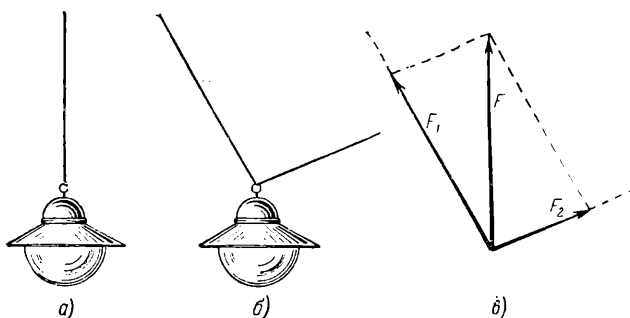


Рис. 75. *а*) Фонарь висит на одной проволоке; *б*) одна проволока заменена двумя; *в*) чертеж для определения натяжений проволок.

известна: она равна весу фонаря. Но можно одну проволоку заменить двумя, например, как показано на рис. 75, *б*. Какова сила натяжения каждой из проволок? Для решения этого вопроса придется произвести разложение силы, т. е. отыскать две или несколько сил, совместное действие которых одинаково с действием данной силы.

Пусть, например, фонарь весит 26 кг. Для его удержания нужно приложить силу 26 кг, направленную вертикально вверх. Проведем вектор F , в определенном масштабе изображающий силу в 26 кг. С боков проведем направления проволок (рис. 75, *в*). Из конца вектора F проведем линии, параллельные проволокам; получится параллелограмм. Измеряя его стороны F_1 и F_2 , найдем, что силы натяжения проволок равны 25 кг и 14 кг. При иных направлениях проволок получились бы другие значения сил.

У п р а ж н е н и я

79. Нить разрывается при нагрузке 1000 Г. Длина нити 1 м. В середине нити подвешен груз P в 500 Г. Если взять концы нити в руки и начать

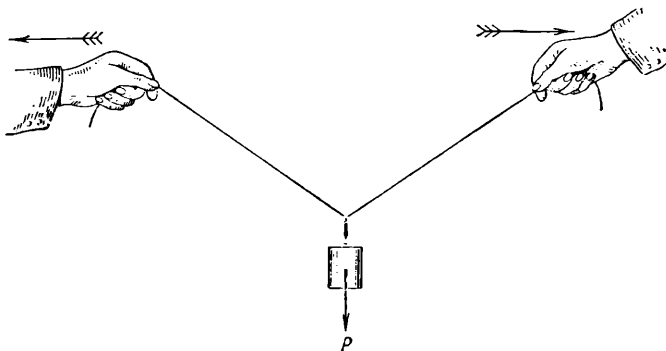


Рис. 76.

разводить их в стороны (рис. 76), то при каком расстоянии между руками нить порвется?

80. Найдите графически силы, действующие на части кронштейна ABC , если сила давления подшипника P на кронштейн равна 240 кгГ (рис. 77).

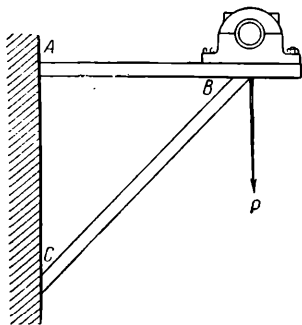


Рис. 77.

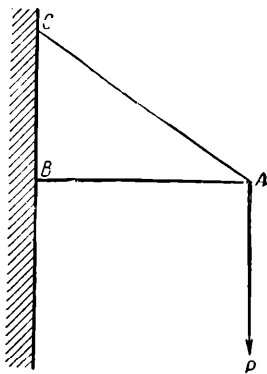


Рис. 78.

81. Найдите графически силы, действующие на трос AC (рис. 78) и стержень AB , если вес груза P равен 20 кгГ.

§ 61. Наклонная плоскость. Заслуживают особого рассмотрения сложение и разложение сил на наклонной плоскости, как часто встречающихся во множестве технических приложений. Всем известно применение наклонной плоскости для облегчения подъема

тяжестей (рис. 79), известна роль подъемов пути в транспорте (железнодорожном, автомобильном и пр.), наконец, известны и бесчис-

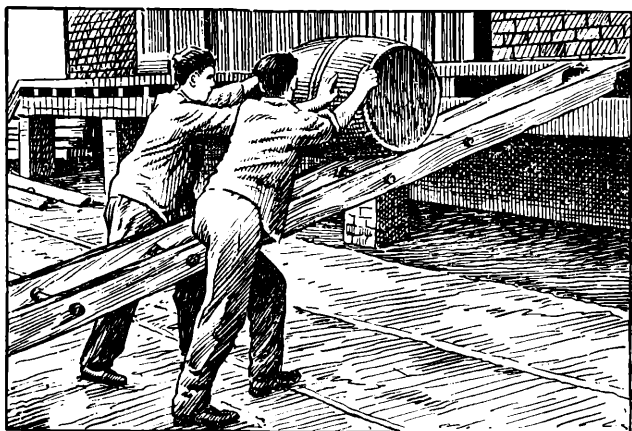


Рис. 79. Наклонная плоскость облегчает подъем тяжестей

ленные применения разновидностей наклонной плоскости в виде клина и различных режущих инструментов, а также в виде винтовой нарезки гаек, болтов, шурупов. Давая огромный выигрыш в силе, винт применяется также в прессах, домкратах, позволяющих поднимать не только автомобили, паровозы и вагоны (рис. 80), но и целые многоэтажные сооружения.

Какие же силы действуют на тело, находящееся на наклонной плоскости? Это прежде всего вес тела, вызванный притяжением тела к Земле. Можно разложить вес P на две составляющие силы F_1 и F_2 (рис. 81), из которых F_1 будет скатывать шар по наклонной плоскости, а F_2 производить давление на наклонную плоскость. Величина этих сил находится в зависимости от веса тела и геометрических соотношений наклонной плоскости. Исходя из подобия треугольника сил и треугольника наклонной плоскости, можно написать:

$$\frac{F_1}{P} = \frac{h}{l} \quad \text{и} \quad \frac{F_2}{P} = \frac{b}{l}.$$

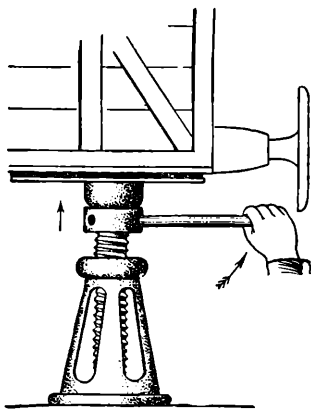


Рис. 80. Действие винтового домкрата.

Для удержания тела на наклонной плоскости надо уравновесить силу F_1 при помощи равной ей тяги T , направленной вверх вдоль наклонной плоскости. Сила F_2 вызовет деформацию наклонной плоскости и как следствие деформации силу реакции опоры N , направленную перпендикулярно (нормально) к наклонной плоскости и действующую на тело (рис. 82, а). Если при сложении сил P , N и T получится замкнутый треугольник сил (рис. 82, б), то равнодействующая всех сил, действующих на тело, равна

нулю и тело будет находиться на наклонной плоскости в равновесии.

Направление силы тяги T мы можем выбирать произвольно и удерживать тело при помощи любой из веревок, привязанных к телу (указаны на рисунке пунктиром). Сила потребуется, конечно, каждый раз разная.

Мы рассмотрели воображаемый (идеальный) случай, не принимая во внимание сил трения между телом и наклонной плоскостью. В действительности же всегда приходится учитывать наличие и этих сил.

Разложение сил на наклонной плоскости дает нам простой способ нахождения коэффициента трения покоя. Это показано в следующей лабораторной работе.

§ 62. Лабораторная работа № 4. Определение коэффициента трения при помощи угла трения. Если бы не было трения, то положенный на наклонную плоскость брусок должен был бы соскользнуть с нее вниз (рис. 83). Однако при небольшом наклоне этого не происходит, так как скольжению препятствует трение покоя. Сила трения покоя равна составляющей F_1 силы тяжести P и будет увеличиваться вместе с F_1 при увеличении угла наклона плоскости. При некотором значении угла наклона α брусок начинает скользить вниз по наклонной плоскости. Отношение максимального значения силы трения покоя при этом к силе нормального

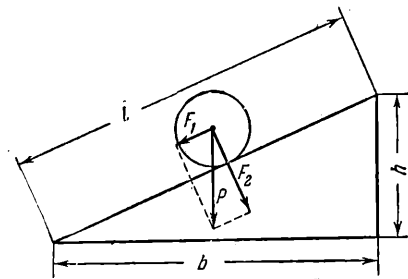


Рис. 81. Разложение силы на наклонной плоскости.

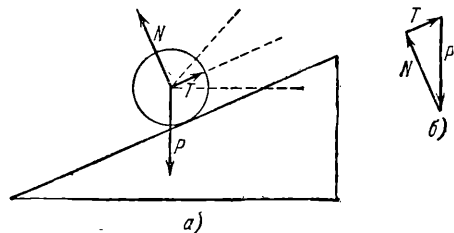


Рис. 82. Равновесие сил на наклонной плоскости.

Сила трения покоя равна составляющей F_1 силы тяжести P и будет увеличиваться вместе с F_1 при увеличении угла наклона плоскости. При некотором значении угла наклона α брусок начинает скользить вниз по наклонной плоскости. Отношение максимального значения силы трения покоя при этом к силе нормального

давления бруска на плоскость F_2 есть коэффициент трения покоя

$$f = \frac{F_1}{F_2}.$$

Угол, при котором началось скольжение, называется углом трения, он равен углу, который сила тяжести составляет с нормальной составляющей. Следовательно, коэффициент трения равен тангенсу угла трения:

$$f = \operatorname{tg} \alpha.$$

Нет необходимости определять угол трения в градусах, тангенс его можно найти как отношение высоты наклонной плоскости h к ее основанию b :

$$f = \frac{h}{b}.$$

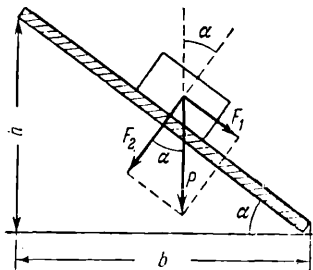


Рис. 83. Определение коэффициента трения при помощи угла трения.

§ 63. Сложение сил, приложенных к разным точкам твердого тела. Сложение параллельных сил, направленных в одну сторону. Центр параллельных сил. Если две силы приложены не к одной, а разным точкам тела, то при этом могут встретиться два случая:

1. Линии действия сил пересекаются. Тогда, перенеся данные силы в точку пересечения их линий действия, мы можем найти равнодействующую, применив правило параллелограмма (рис. 84).

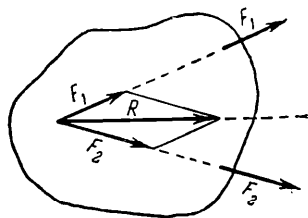


Рис. 84. Сложение сил, приложенных к разным точкам.

2. Силы параллельны, линии действия их не пересекаются. В этом случае найти равнодействующую по правилу параллелограмма уже нельзя. Мы ограничимся только тем случаем, когда параллельные силы направлены в одну сторону и покажем, как равнодействующая таких сил может быть найдена опытным путем. Рис. 85, а показывает схему демонстрации, а рис. 85, б изображает

диаграмму сил в этом опыте. Показание динамометра дает нам величину уравнивающей силы, равной, но противоположно направленной равнодействующей силе. Мы видим, что равнодействующая двух параллельных сил по величине равна сумме данных сил, а линия ее действия находится между линиями действия

составляющих сил на расстояниях, обратно пропорциональных данным силам, т. е. ближе к большей силе во столько раз, во сколько эта сила больше другой силы *).

Применяя последовательно это правило, можно найти равнодействующую любого числа параллельных сил. Однако можно избежать утомительных вычислений с пропорциями, применив понятие момента, о котором говорится в следующем параграфе.

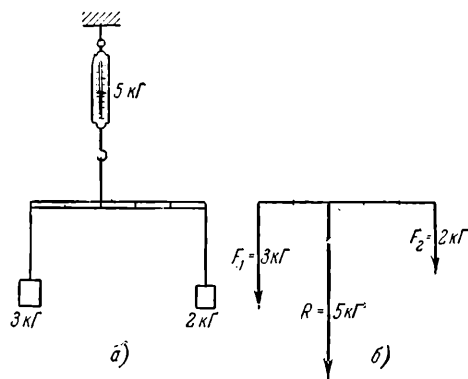


Рис. 85. Сложение параллельных сил: а) схема демонстрации; б) диаграмма сил этого опыта.

теперь поддается туго. Если надавить на дверь выше или ниже, но на таком же расстоянии от петель, то ничего не изменится. Стоит, однако, надавить дальше от петель — и закрыть дверь будет легче.

Велосипедист едет, нажимая ногами сверху на педали. Если педаль находится в таком положении, что направление силы, приложенной ногами, проходит далеко от оси (рис. 87, а), то двигать педаль легко. Если же педаль находится в таком положении, что направление силы ноги проходит близко от оси (рис. 87, б), то двигать педаль трудно. Наконец, если направление приложенной силы проходит через ось, то сила ноги совсем не вызывает никакого вращения. Она только прижимает педаль к оси.

Значит, действие силы на тело, вращающееся около неподвижной оси, зависит не только от того, какова эта

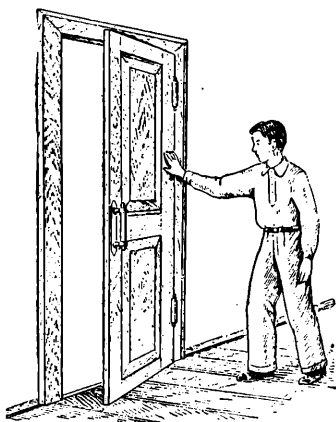


Рис. 86. Чем ближе к петлям нажимать на дверь, тем труднее она поддается.

*) Точка приложения всех параллельных сил называется центром параллельных сил.

сила, но также от того, на каком расстоянии от оси проходит прямая, совпадающая с направлением силы. Расстояние от оси до направления силы называется *плечом силы*. Чем больше плечо силы, тем больше ее действие.

Чтобы одновременно учесть и величину и плечо силы, вводят понятие

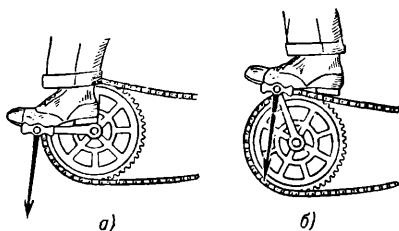


Рис. 87 В положении а) двигать педаль легче, чем в положении б).

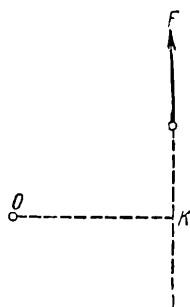


Рис. 88. Момент силы F относительно оси вращения O равен произведению силы F на плечо OK .

момента силы (иногда называемого *вращающим моментом*). *Моментом силы называется произведение силы на плечо* (OK на рис. 88).

Будем считать момент силы, вращающий тело по стрелке часов, отрицательным, а в обратном направлении — положительным. Единицей момента силы в системе СИ является произведение силы в 1 н на плечо в 1 м (*н. м.*). Можно также момент силы выражать в Гсм или в кГм и т. п.

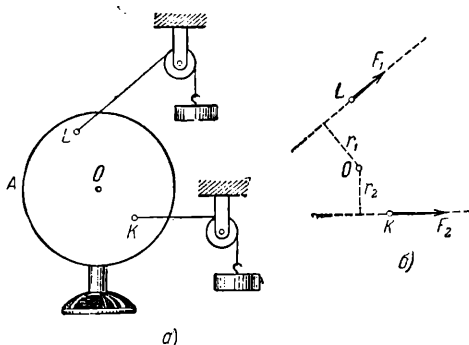
У п р а ж н е н и я

- 82. Почему легче отвернуть гайку длинным ключом, чем коротким?
- 83. Чему равен момент силы 60 н с плечом $3,5\text{ см}$?

§ 65. **Равновесие тел, имеющих ось вращения (правило моментов).** Рассмотрим опыт, показанный на рис. 89 *). Диск A может вращаться около оси O . К точкам L и K диска приложены, как показано на рисунке, силы F_1 и F_2 . Зная эти силы и измерив плечи r_1 и r_2 , можно найти моменты сил $F_1 r_1$ и $F_2 r_2$. Опыт показывает, что в случае равновесия диска моменты сил равны друг другу. Кроме того, легко убедиться, что моменты сил, приложенных к диску, противоположны по знаку: если действие одного из моментов вызывает вращение диска по стрелке часов, то действие другого —

*) Опыт проводится или в качестве демонстрации, или в качестве лабораторной работы, требуемой по программе техникумов.

в противоположном направлении. Итак, равновесие тела, которое может вращаться около неподвижной оси, имеет место, когда моменты действующих на него сил равны по величине и противоположны по знаку.



Теперь приложим к диску не две, а три силы и добьемся равновесия. Мы обнаружим, что сумма моментов сил, вращающих диск в одном направлении, равна моменту третьей силы. Отсюда следует, что две приложенные к вращающемуся телу силы производят такое же действие, как одна сила, момент которой равен алгебраической сумме моментов этих сил.

Например, силы 50 Г с плечом 6 см и 100 Г с плечом

Рис. 89. а) Прибор для изучения условий равновесия сил, действующих на вращающееся тело; б) схема моментов сил.

5 см , вращающие по стрелке часов, можно заменить силой 80 Г с плечом 10 см , вращающей тоже по стрелке часов. Действительно, момент двух первых сил равен $(50 \cdot 6 + 100 \cdot 5) \text{ Гсм} = 800 \text{ Гсм}$. Момент третьей силы равен $80 \cdot 10 \text{ Гсм} = 800 \text{ Гсм}$, т.е. той же величине.

Итак, тело, имеющее неподвижную ось вращения, находится в состоянии равновесия, если сумма моментов сил, вращающих тело в одном направлении, равна сумме моментов сил, вращающих тело в другом направлении (правило моментов сил)*).

Применяя правило моментов сил, можно решать разнообразные задачи по механике. При этом ось, относительно которой определяются моменты сил, надо выбирать в соответствии с условиями задачи; ею может быть любая ось, относительно которой тело находится в равновесии.

Например, на доске, опирающейся на две опоры A и B , поместим, как показано на рис. 90, груз весом P . Это вызовет изменения сил,

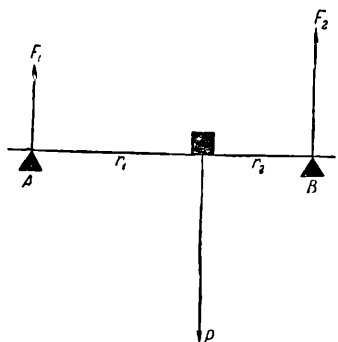


Рис. 90. Чертеж к расчету реакций опор.

*) Принимая во внимание условное обозначение знаков моментов, то же правило можно записать так: тело, имеющее ось вращения, находится в равновесии, если сумма моментов всех сил, действующих на тело, равна нулю.

действующих со стороны опор A и B на доску (реакций), на величины F_1 и F_2 . Найдем F_1 и F_2 при $P = 70 \text{ кг}$, $r_1 = 3 \text{ м}$, $r_2 = 2 \text{ м}$.

Сначала найдем силу F_2 . Для этого воспользуемся тем, что доска покоится относительно оси A . На доску действуют два момента сил, которые могут вызвать вращение относительно оси A . Первый из них, момент силы P , равный Pr_1 , стремится вращать доску по направлению стрелки часов. Второй — момент силы F_2 , равный $F_2(r_1 + r_2)$, — стремится вращать доску против стрелки часов. При равновесии

$$Pr_1 = F_2(r_1 + r_2),$$

откуда

$$F_2 = \frac{Pr_1}{r_1 + r_2} = \frac{70 \cdot 3}{3 + 2} \text{ кг} = 42 \text{ кг}.$$

Теперь найдем силу F_1 . Для этого воспользуемся тем, что доска покоится также и относительно оси B . Рассуждая, как и выше, найдем:

$$F_1(r_1 + r_2) = Pr_2,$$

откуда

$$F_1 = \frac{Pr_2}{r_1 + r_2} = \frac{70 \cdot 2}{3 + 2} \text{ кг} = 28 \text{ кг}.$$

У п р а ж н е н и я

84. Легкий стержень подвешен за середину на проволоке. На нем укреплены грузы весом 2 кг на расстоянии 18 см от подвеса с одной стороны и 3 кг на расстоянии 15 см — с другой. Где следует укрепить груз весом 1 кг , чтобы стержень остался в равновесии?

85. Где надо подпереть легкий стержень длиной 60 см , на концах которого находятся грузы весом 250 г и 1 кг , чтобы имело место равновесие?

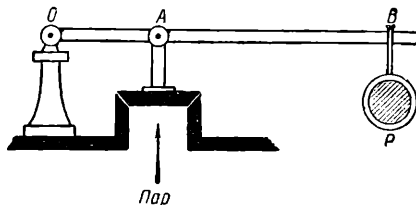


Рис. 91.

86. Рычажный предохранительный клапан (рис. 91) установлен на паровом котле с наибольшим допустимым давлением пара 12 кг/см^2 . Расстояние OA равно 75 мм , OB равно 750 мм . Площадь тарелки клапана, на которую действует пар, 30 см^2 . Достаточен ли груз P в 32 кг , подвешенный на конце рычага?

87. Каковы силы реакции F (рис. 92), действующие при завинчивании гайки ключом, к концу рукоятки которого приложена сила $P = 1 \text{ кг}$? Размеры гайки и ключа даны на чертеже.

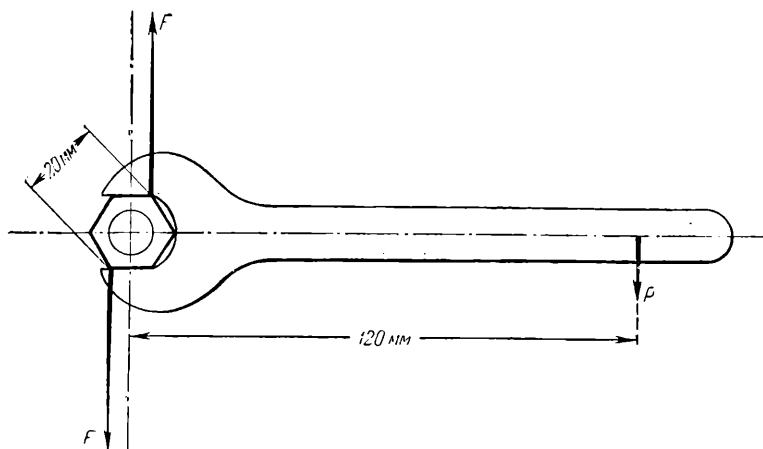


Рис. 92.

§ 66. **Пара сил.** Парой сил называется система двух равных антипараллельных (параллельных, но направленных в разные стороны) сил (рис. 93). Какое действие на твердое тело оказывает пара сил? Пусть на деревянный цилиндр навиты, как показано

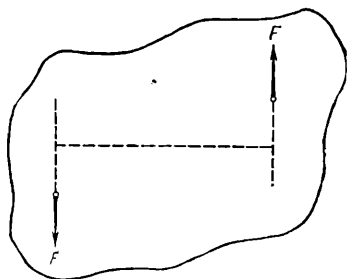


Рис. 93. Пара сил.

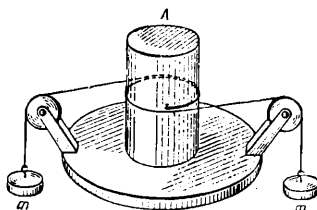


Рис. 94. Две равные антипараллельные силы вращают, но не смещают цилиндр А.

на рис. 94, два шнура, которые натягиваются двумя грузами mm в антипараллельных направлениях. Если дать возможность грузам mm опускаться, то цилиндр получит вращательное движение, оставаясь на месте. Это значит, что в отличие от одной силы, меняющей скорость поступательного движения тела, пара сил меняет только скорость вращения тела, не меняя скорости его поступательного

движения. Отсутствие ускорения поступательного движения указывает, как мы знаем, на отсутствие силы, которая могла бы его вызвать. Поэтому можно сказать, что пару сил нельзя заменить

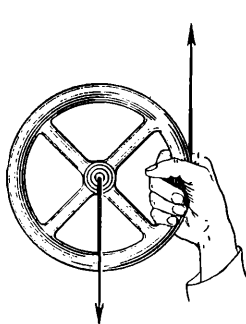


Рис. 95 При действии на колесо силы одной руки появляется антипараллельная сила упругости оси

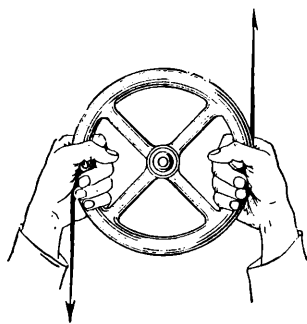


Рис. 96. При действии на колесо пары сил ось не деформируется.

одной силой, приложенной к какой-либо точке тела, иными словами, пара сил не имеет равнодействующей.

Если какое-либо тело, например, руль автомобиля, может вращаться около закрепленной оси, то, прилагая к нему одну силу (одной рукой), мы снова получаем пару сил.

Дело в том, что при действии на рулевое колесо одной силой ось прогибается в ту сторону, в которую действует сила руки, и, стремясь выпрямиться, действует на рулевое колесо в антипараллельном направлении (рис. 95). Если же будем действовать на рулевое колесо двумя руками, т. е. парой сил (рис. 96), то прогибания оси не произойдет. Поэтому во многих случаях, когда надо избежать прогибания оси вращения, пользуются парой сил (например, при ввинчивании бурава).

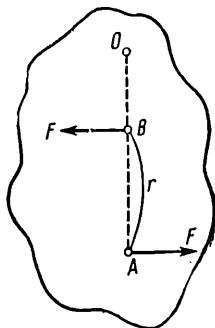


Рис. 97. Момент пары сил.

Определим вращающий момент пары сил. Пусть на тело действуют две равные антипараллельные силы, причем расстояние между их направлениями (плечо пары сил) равно $AB = r$ (рис. 97). Момент первой силы относительно оси O равен $F \cdot OA$, момент второй силы равен $-F \cdot OB$. Общий момент обеих сил

$$F \cdot OA - F \cdot OB = F \cdot (OA - OB) = F \cdot AB = F \cdot r,$$

т. е. момент пары сил равен произведению величины силы на плечо пары. Как видно, он не зависит от положения оси.

§ 67. **Центр тяжести.** Твердое тело можно поставить на пол или подвесить на шнуре так, что оно будет в равновесии, т. е. не будет ни двигаться поступательно, ни вращаться. Это значит, что равнодействующая сил тяжести, действующих на все точки тела, и сил упругости, действующих со стороны опоры, прогнувшейся под тяжестью тела, равна нулю. Кроме того, сумма моментов всех сил, действующих на тело, тоже равна нулю, так как тело не вращается.

Рассмотрение вопроса о равновесии и движении твердого тела сильно облегчается при введении понятия **ц е н т р а т я ж е с т и**

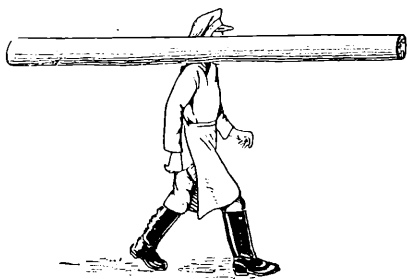


Рис. 98. Рабочий несет бревно, подперев его в одном месте.

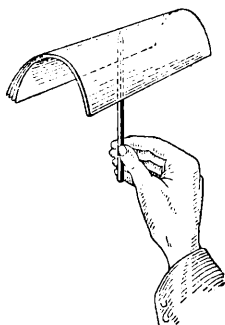


Рис. 99. Тетрадь держится на острине пера.

тела (иногда его называют **ц е н т р о м м а с с** тела). Что подразумевают под этим названием?

Как известно, бревно можно нести, подперев его плечом только в одном месте (рис. 98). Тетрадь или согнутый кусок картона можно удерживать на острине пера (рис. 99). То же самое мы наблюдали бы, если бы вся тяжесть бревна или тетради была сосредоточена в одной точке над той, в которой они подперты.

Рассмотрим еще такой опыт. Подвесим к одному крючку на нитках плоский кусок жести и отвес (рис. 100). Отметив на куске жести при помощи отвеса вертикальное направление, подвесим жечь таким же образом за какие-нибудь другие точки ее. Мы увидим, что все отмеченные направления будут пересекаться в одной точке (на рис. 100 точка *C*). То же самое получилось бы, если бы вся тяжесть куска жести была сосредоточена в точке *C*.

Во многих случаях — и при покое, и при движении — явления происходят так, как будто вся масса твердого тела сосредоточена в одной его точке. Эта точка и называется **центром тяжести тела** *).

*) Если принять, что силы тяжести отдельных материальных точек тела параллельны между собой, то центром тяжести можно назвать центр этих параллельных сил.

Если положение центра тяжести тела известно, то можно забыть, что на все точки тела действуют силы тяжести, и считать, что

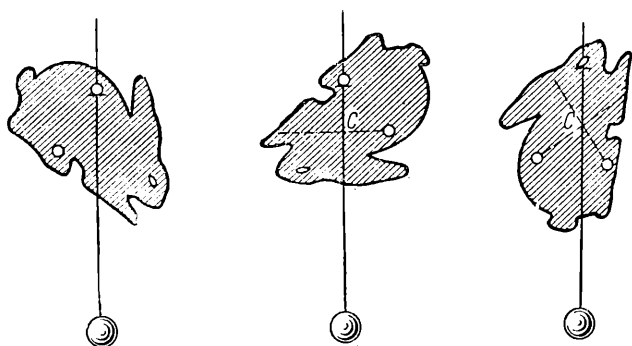


Рис. 100. Кусок жести подвешивается за разные точки. Во всех случаях отвес проходит сквозь точку C куска жести.

есть только общая сила тяжести, приложенная в центре тяжести тела. Легко понять выгоды такого способа расчета. Второе, не менее важное значение понятия центра тяжести заключается в возможности оценивать потенциальную энергию таких тел, размерами которых нельзя пренебречь по сравнению с расстоянием до нулевого уровня. Так как всю массу тела можно считать сосредоточенной в его центре тяжести, то потенциальная энергия любого тела будет равна mgh , где под h подразумевается высота центра тяжести тела над нулевым уровнем (рис. 101).

Положение центра тяжести тела можно определить посредством опыта, например, как было показано на рис. 100, а также расчетом, пользуясь правилом моментов сил.

Приведем сведения о положении центра тяжести некоторых тел (рис. 102).

- 1) Диск и шар — в центре.
- 2) Пластинка в виде параллелограмма и брус в виде параллелепипеда — в точке пересечения их диагоналей.

- 3) Цилиндр — на середине оси.

Отметим, что не всегда центр тяжести тела совпадает с какой-либо из его точек.

Например, центр тяжести трубы находится в середине ее оси, но, поскольку труба полая, в этой точке нет вещества.

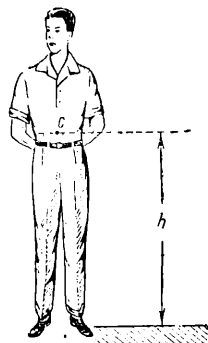


Рис. 101. Центр тяжести выпрямившегося человека находится примерно в точке C .

Если вес человека 50 кг , а высота центра тяжести над нулевым уровнем (пол) равна $0,8 \text{ м}$, то потенциальная энергия стоящего человека равна $50 \text{ кг} \cdot 0,8 \text{ м} = 40 \text{ кгм}$.

Если тело представляет собой систему нескольких жестко скрепленных друг с другом тел и положения центров тяжести каждого из этих тел известны, то положение центра тяжести всей системы можно найти расчетом.

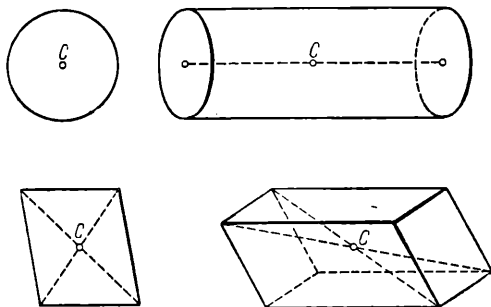


Рис. 102. Положение центров тяжести некоторых тел

Например, пусть требуется найти положение центра тяжести системы из однородного стержня весом 2 кг и длиной 70 см , к концам которого прикреплены, как показано на рис. 103, а, два других стержня, причем левый весит 1 кг , а правый — 4 кг . Положения центров тяжести стержней нам известны, и мы

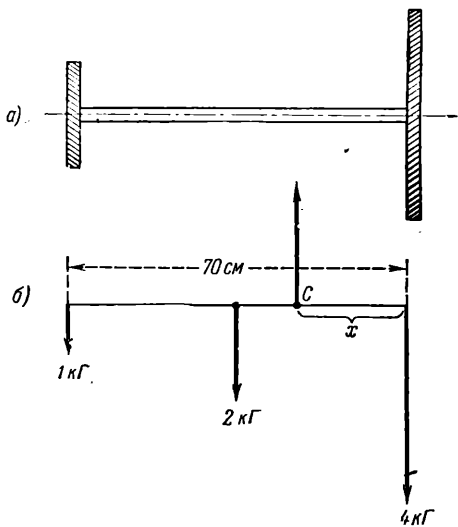


Рис. 103. Пример расчета центра тяжести системы трех тел.

можем силы, действующие в данной системе, изобразить схемой, показанной на рис 103, б. Предположим, что центр тяжести системы находится в точке C . Если приложить в точке C силу, равную весу всей системы и направленную вертикально вверх (например, подвесить систему на шнуре), то система будет находиться в равновесии. Так как система может вращаться около оси, перпендикулярной к плоскости чертежа и проходящей сквозь точку C , то можно применить правило моментов сил (§ 65). Обозначая расстояние от правого конца стержня до точки C через x , найдем плечи сил: сила 1 кг имеет плечо $70 - x$, сила 2 кг имеет плечо $35 - x$, сила 4 кг имеет плечо x . Применяя правило моментов сил, напишем $1 \cdot (70 - x) + 2 \cdot (35 - x) = 4x$, откуда

$$x = 20.$$

Итак, центр тяжести системы находится на расстоянии 20 см от правого конца стержня.

Упражнения

88. На концы штанги длиной 1,8 м и весом 15 кг надеты чугунные диски $A = 30$ кг и $B = 60$ кг (рис. 104). Где находится центр тяжести этой системы? В каком месте и с какой силой надо поднимать штангу?

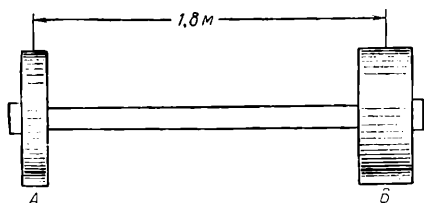


Рис. 104.

89. Центр тяжести тележки мостового крана, весящей 4 т, находится на расстоянии 1 м от точки A (рис. 105). Вес крана 6 т. Найдите реакции опор A и B .

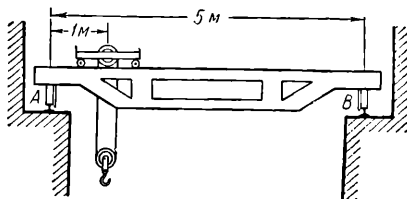


Рис. 105.

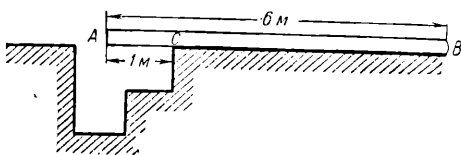


Рис. 106.

90. С какой силой надо поднимать столб длиной 6 м за конец B (рис. 106), если длина свесившейся части столба AC равна 1 м, а вес столба 80 кг?

91. Какую работу надо произвести, чтобы приподнять один конец бревна, лежащего горизонтально на земле, на 40 см? Вес бревна 60 кг.

92. Подсчитайте работу, совершаемую человеком при ходьбе; вес человека 60 кг, подъем центра тяжести при каждом шаге 3 см, длина шага 0,75 м, путь 2 км.

§ 68. **Равновесие подвешенных и поставленных тел.** Рассмотрим подвешенный лист жести (рис. 107). На него действуют следующие силы: сила тяжести P , направленная вниз и приложенная в центре тяжести тела C , и сила натяжения нити F , направленная вверх и

приложенная к точке O . Так как эти силы приложены к разным точкам листа, то они растягивают его (незаметно для глаза). Вследствие растяжения листа появляются силы упругости P' и F' . В результате к каждой из точек O и C приложены две равные противоположные силы, уравновешивающие друг друга. Поэтому лист и находится в равновесии.

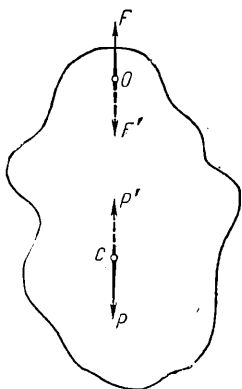


Рис. 107. Силы, действующие на тело, подвешенное в точке O на нити.

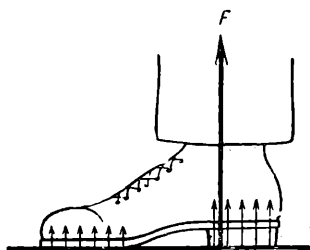


Рис. 108. Множество сил, действующих на отдельные точки нижней поверхности подошвы, можно заменить одной силой F .

Как уравниваются силы в случае, если тело опирается на какое-нибудь основание, например на пол? Под действием тяжести тела пол немного прогибается и, стремясь выпрямиться, действует

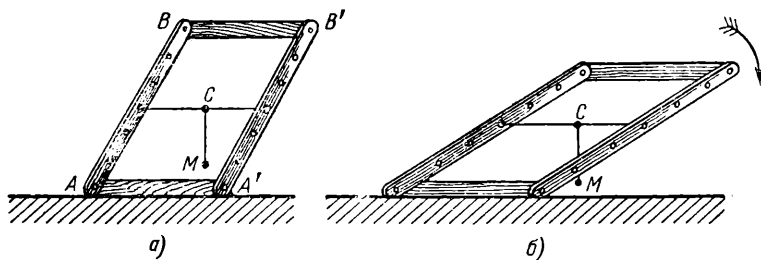


Рис. 109. Центр тяжести дощечек AA' и BB' , соединенных шарнирами с пластинками AB и $A'B'$, находится в C .

на тело снизу вверх. Силы, действующие на все точки нижней поверхности тела, можно заменить одной силой F (рис. 108). Если сила, действующая со стороны пола, равна и противоположна силе, действующей на центр тяжести тела, имеет место равновесие. Легко убедиться на опыте, что тело, опирающееся на несколько точек

стола или пола, находится в равновесии, если вертикальная линия, проведенная через центр тяжести тела, проходит внутри площади опоры (рис. 109). Например, для равновесия человека, стоящего на полу, необходимо, чтобы центр тяжести человека находился над одной из точек, лежащих внутри фигуры $ABCD$ (рис. 110).

Упражнения

93. Почему человек, несущий на спине груз, наклоняется вперед?

94. Попробуйте встать со стула, не наклоняя корпуса вперед. Почему это не удается?

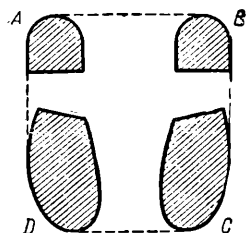


Рис. 110. Площадь $ABCD$ опоры стоящего человека.

§ 69. Три вида равновесия. Осмотримся в комнате; нас окружают различные предметы: мебель, посуда, лампы и т. д. Они или стоят на полу и на столах, или подвешены к стене или потолку. Все они неподвижны, т. е. находятся в состоянии равновесия. Но можно ли назвать их равновесие одинаковым?

Нет. Разница в характере их равновесия скажется тотчас же, как только мы попробуем отклонить предметы из равновесных положений. Если, например, отклонить лампу, подвешенную к потолку (рис. 111), или шарик на дне круглой чашки (рис. 112, *a*), то они будут стремиться возвратиться в положение равновесия. То же самое можно сказать и о ящике, показанном на рис. 113, *a*. Если его немного наклонить, то он будет стремиться стать обратно. Равновесие тела, стремящегося при смещении возвратиться в свое начальное положение, называют устойчивым равновесием.

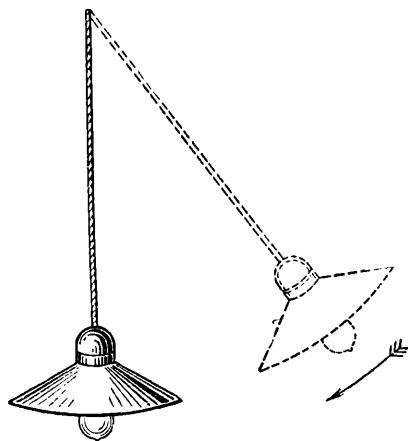


Рис. 111. Лампа, отклоненная от положения равновесия, стремится вернуться обратно.

В ином положении находится ящик, показанный на рис. 113, *b*. Его устойчивость очень мала. Достаточно небольшого толчка, и он опрокинется. Неустойчив шарик, находящийся на вершине круглой горки (рис. 112, *b*). Он держится только благодаря трению. Малейший толчок — и он летит вниз. Равновесие тела, стремяще-

гося при смещении удалиться от своего начального положения, называется **н е у с т о й ч и в ы м** равновесием.

Есть и третий вид равновесия. Шарик на горизонтальной плоскости, если его сместить, не стремится ни возвратиться в начальное положение, ни удалиться от него (рис. 112, в). Такое равновесие тела носит название **б е з р а з л и ч н о г о**.

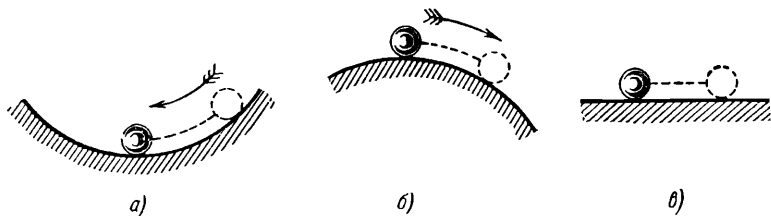


Рис. 112. Равновесия шарика: а) устойчивое; б) неустойчивое; в) безразличное.

Чем вызвано различие в характере равновесия в разных случаях? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим силы, действующие на шарик на дне круглой чашки, отклоненный от положения

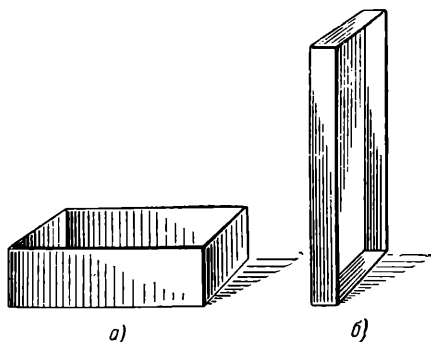


Рис. 113. Два случая различной устойчивости.

равновесия (рис. 114). Этих сил две: сила тяжести P и сила упругости N чашки, прогнувшейся под шариком. Равнодействующая этих сил F направлена обратно к середине чашки. Рассматривая те же силы в случае шарика, находящегося вблизи вершины горки (рис. 115), мы видим, что их равнодействующая удаляет шарик от вершины.

Итак, в случае устойчивого равновесия смещение вызывает появление силы, возвращающей тело в положение равновесия. В случае неустойчивого равновесия, наоборот, смещение вызывает появление силы, еще более отклоняющей тело от положения равновесия.

Легко понять, что при безразличном равновесии смещение тела не вызывает появления неравновешенных сил.

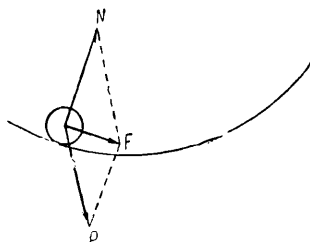


Рис. 114. При смещении шарика от середины чашки сила тяжести P вместе с упругой силой N дают равнодействующую F , приближающую шарик к положению равновесия.

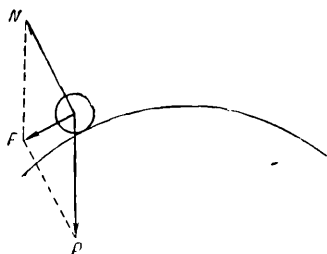


Рис. 115. При отклонении шарика от вершины горки сила тяжести P вместе с упругой силой N дают равнодействующую F , отдаляющую шарик от положения равновесия.

Вопрос об устойчивости тела можно рассмотреть и с иной точки зрения. Если шарик находится на дне чашки (устойчивое равновесие), то его центр тяжести при отклонении поднимается. Если шарик находится на вершине горки (неустойчивое равновесие), то его центр тяжести при отклонении, наоборот, опускается. Наконец, при безразличном равновесии центр тяжести тела при отклонении не поднимается и не опускается. При неустойчивом равновесии центр тяжести занимает самое высокое, а при устойчивом равновесии — самое низкое из возможных положений. Это значит, что при неустойчивом равновесии потенциальная энергия тела (или системы тел) имеет наибольшее, а при устойчивом равновесии — наименьшее из возможных значений. Но любая система стремится перейти в устойчивое состояние. Отсюда следует важный вывод, который можно распространить и на другие разделы физики. *Всякая система стремится перейти в состояние, соответствующее минимуму ее потенциальной энергии.*

Возвратимся к ящикам, изображенным на рис. 113. При опрокидывании (каптовании) ящика его центр тяжести движется, сперва поднимаясь, а затем опускаясь (рис. 116). Чем ниже находится

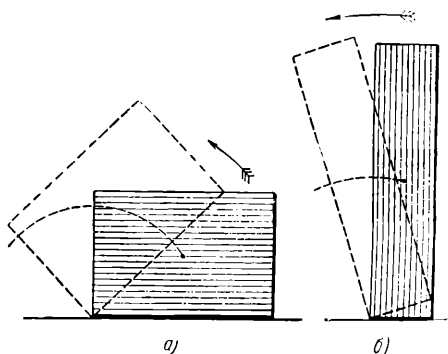


Рис. 116. Движения центров тяжести низкого (а) и высокого (б) ящиков при их опрокидывании (пунктир).

центр тяжести и чем шире основание тела, тем больше надо наклонить тело, чтобы центр тяжести перешел высшую точку и тело начало опрокидываться; следовательно, тем устойчивее тело. Отсюда



Рис. 117. Потенциальный барьер.

видно, что при опрокидывании ящика потенциальная энергия сначала увеличивается, а затем уменьшается. В подобных случаях говорят, что для перевода системы из одного состояния в другое надо преодолеть потенциальный барьер. Особенно наглядным является это понятие в случае шарика, находящегося в ямке

на вершине горки (рис. 117). Чтобы выкатить шарик из ямки, надо сперва увеличить его потенциальную энергию (преодолеть потенциальный барьер), после чего шарик сам покатится вниз, стремясь к положению, в котором его потенциальная энергия имеет наименьшее значение. Чем выше потенциальный барьер, тем устойчивее равновесие системы. Например, для ящика, изображенного на рис. 113, а, потенциальный барьер выше, чем для ящика на рис. 113, б.

У п р а ж н е н и я

95. В каком равновесии находится система из карандаша и ножа (рис. 118)? Как движется при отклонении ножа центр тяжести?

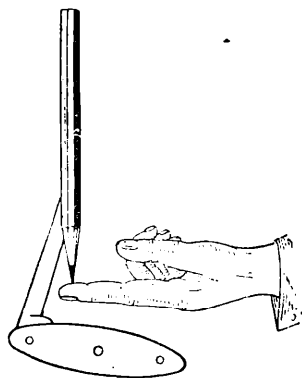


Рис. 118.

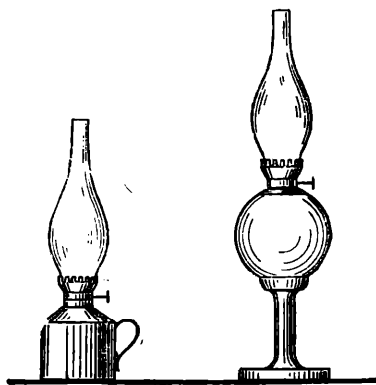


Рис. 119.

96. Равновесие какой из двух ламп, изображенных на рис. 119, устойчивее? Как изменяется устойчивость ламп при наполнении их керосином?

§ 70. Деформации тела. Из предыдущего мы знаем, что взаимодействие тел связано с некоторым изменением формы или объема

соприкасающихся тел. Соприкасающиеся тела действуют друг на друга только, когда они деформированы.

В статике мы не интересуемся деформациями тел, мы только отмечаем, что причиной появления сил взаимодействия тел являются именно деформации их. В практическом же приложении механики мы должны учитывать, какие деформации возникают в различных частях построек и машин, так как от этого зависят их надежность и прочность.

§ 71. Виды деформаций. Из многочисленных видов деформаций назовем лишь основные.

1. **Р а с т я ж е н и е и с ж а т и е.** Эти два вида деформации возникают, когда на тело действуют две равные силы, направленные по одной прямой в противоположные стороны прочь друг от друга при растяжении (рис. 120, *а*) и навстречу друг другу при сжатии (рис. 120, *б*). Примеры растяжения — трос подъемного крана,

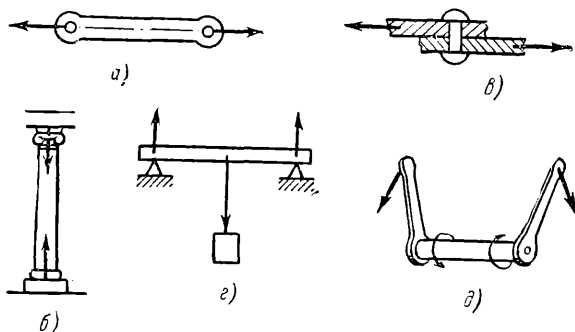


Рис. 120. Виды деформаций: *а*) растяжение, *б*) сжатие, *в*) сдвиг, *г*) изгиб, *д*) кручение.

сцепы вагонов поезда; примеры сжатия — колонны, фундаменты зданий и машин.

При растяжении тела расстояния между молекулами увеличиваются, в результате проявляются молекулярные силы притяжения, препятствующие растяжению. При сжатии молекулы тела приближаются друг к другу, но при этом силы отталкивания растут быстрее сил притяжения и препятствуют сжатию.

2. **С д в и г.** Эта деформация возникает, если на тело действуют параллельные противоположно направленные силы, вызывающие смещение одних слоев относительно других (рис. 120, *в*). Деформации сдвига возникают при резании ножницами, в болтовых и заклепочных соединениях. Деформация сдвига может при достаточной величине привести к срезу.

3. **И з г и б.** Деформации изгиба подвержены балки, оси под действием собственного веса или внешних нагрузок. (Изгиб вызывается парами сил, образованными нагрузками и реакциями опор (рис. 120, *з*). При деформации изгиба слои на выпуклой стороне деталей растягиваются, на вогнутой сжимаются.)

4. **К р у ч е н и е.** Эта деформация имеет место во всех деталях, подверженных действию двух равных противоположно направленных моментов (рис. 120, *д*). Наиболее распространенным примером являются валы, передающие вращательное движение.

Наиболее удобно рассмотреть общие понятия и законы учения о деформациях на наиболее простом виде деформации растяжения.

§ 72. Упругая и пластическая деформации. Рассмотрим деформацию пружины в пружинных весах. При взвешивании какого-либо груза пружина растягивается, после взвешивания она укорачивается до прежней длины. Такая способность тела возвращаться к первоначальной форме и объему называется упругостью. Деформация, полностью исчезающая после прекращения воздействия на данное тело других тел, называется **упругой деформацией**.

Опыт показывает, что деформации твердых тел являются упругими, если вызывающие их силы (нагрузки) не превосходят некоторой характерной для данного материала величины.

При увеличении нагрузок или при продолжительном их действии в теле появляются деформации, не исчезающие полностью при удалении нагрузок. Такие деформации называются остаточными или **пластическими**. Еще большие нагрузки могут привести к разрушению материала.

§ 73. Силы в деформированном теле. Напряжение. Рассмотрим проволоку, растянутую двумя силами F_1 и F_2 , приложенными к ее концам (рис. 121, *а*). Выделим мысленно некоторый малый участок этой проволоки. Как и вся проволока, он тоже растянут силами, приложенными к его концам (F_3 и F_4 на рисунке). При этом сила F_3 равна силе F_1 , сила F_2 — силе F_4 .

Силы, действующие в деформированном теле, называются **силами внутреннего напряжения**. Какова их природа?

Во всяком твердом теле частицы, составляющие тело, находятся под действием сил взаимного притяжения и отталкивания. В изучение природы этих сил мы пока входить не будем. В деформированном теле силы притяжения и отталкивания не равны друг другу. Например, при растяжении тела силы притяжения оказываются больше сил отталкивания, при сжатии наоборот. В результате возникают силы внутреннего напряжения, передающие действие внешней силы (нагрузки) с одного конца тела на другой.

В отличие от сил давления в жидкостях для сил внутреннего напряжения в твердых телах не справедлив закон Паскаля (например, на боковую поверхность сжатой колонны не действуют никакие силы).

Инженер-конструктор или строитель при проектировании какого-либо сооружения никогда не допустит, чтобы нагрузки на детали машин или сооружения превосходили прочность материала или чтобы возникали не исчезающие деформации. Но как определить ту или иную часть предела допустимости? Для этого прежде всего необходимо выяснить, какова интенсивность возникающих в материале внутренних напряжений.

Величина, показывающая интенсивность напряженного состояния материала, называется напряжением и рассчитывается как отношение силы внутреннего напряжения в поперечном сечении какой-нибудь детали к площади этого сечения (в системе СИ в $\text{н}/\text{м}^2$, в технике — в $\text{кг}/\text{см}^2$). Обозначается напряжение буквой σ (сигма). Вместо силы внутреннего напряжения можно брать равную ей величину нагрузки F . Тогда

$$\sigma = \frac{F}{S}.$$

Пусть, например, проволока, имеющая площадь поперечного сечения 2 см^2 , растягивается силой в 1000 кг . Напряжение

$$\sigma = \frac{1000}{2} = 500 \text{ кг}/\text{см}^2.$$

Если другая проволока площадью сечения $0,5 \text{ см}^2$ нагружена силой 500 кг , то

$$\sigma = \frac{500}{0,5} = 1000 \text{ кг}/\text{см}^2.$$

Вторая проволока более напряжена, чем первая, и если материал обеих проволок одинаков, то можно утверждать, что вторая проволока ближе к разрушению, чем первая.

§ 74. Абсолютное и относительное удлинение. На конце проволоки длиной l_0 подвешен груз (рис. 121, б). Обозначим приращение длины, вызванное приложенной к телу нагрузкой, Δl . Это приращение длины называется абсолютным удлинением. Однако оно еще не полностью характеризует деформацию. Два стержня одинакового сечения, но различной длины получают под действием одного

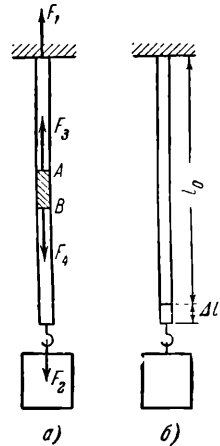


Рис. 121. На участок AB растянутой проволоки действуют силы внутреннего напряжения F_3 и F_4 .

и того же груза различные удлинения. Но отношение приращения длины к первоначальной длине оказывается для данного материала постоянным. Это отношение называется относительным удлинением. Оно обозначается буквой ϵ (эпсилон):

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0};$$

ϵ — число отвлеченное и выражается десятичной дробью или в процентах.

§ 75. Закон Гука. Модуль Юнга. Испытание материалов производят на специальных машинах. Для испытания на растяжение образец материала в виде стержня определенного размера подвергается растяжению в так называемой разрывной машине (рис. 122).

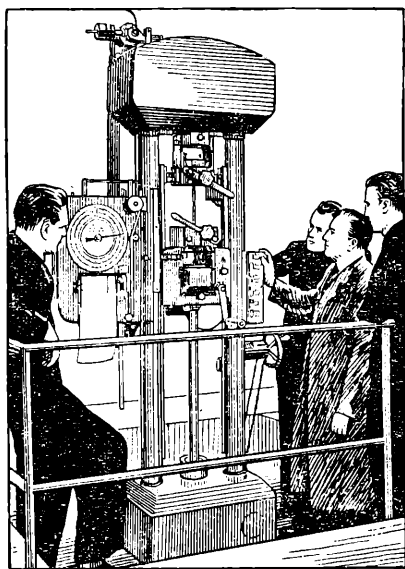


Рис. 122. Испытание материала на разрыв.

Величина нагрузки и вызванные ею удлинения определяются по показанию приборов. Результаты наблюдений удобно представить графически. Для этого на осях координат откладывают: на горизонтальной — приращение длины Δl , на вертикальной — нагрузку P . Можно вместо приращения длины откладывать по горизонтальной оси относительное удлинение ϵ , а по вертикальной оси вместо нагрузки напряжение σ . Это изменит только масштаб, так как

$$\sigma = \frac{P}{S} \quad \text{и} \quad \epsilon = \frac{\Delta l}{l}.$$

Рассмотрение вычерченной диаграммы (рис. 123) приводит к следующим выводам:

1. При увеличении нагрузки от нуля до величины, соответствующей точке A , приращение длины происходит пропорционально приложенной силе (график OA — прямая линия). Если снимать нагрузку, то образец снова сжимается и возвращается к первоначальному размеру. Таким образом деформация на этом участке вполне упругая:

$$\Delta l \sim P.$$

Можно доказать, что и для других деформаций справедлив закон: в пределах упругости деформация пропорциональна силе, вызывающей ее. Этот закон известен под именем закона Гука *).

Закон Гука можно выразить и так:

$$\sigma \sim \varepsilon,$$

т. е. напряжение прямо пропорционально относительной деформации или, вводя коэффициент пропорциональности:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon.$$

Коэффициент пропорциональности E называется модулем упругости или модулем Юнга. Поскольку ε — число безразмерное, то модуль Юнга выражается в тех же единицах, что и напряжение:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ кг/см}^2.$$

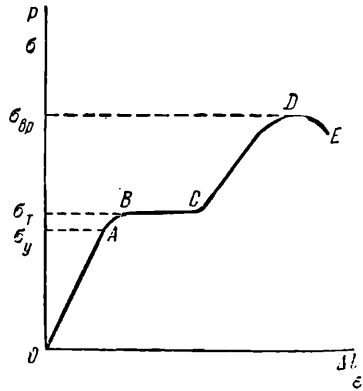


Рис. 123. Диаграмма растяжения стали.

Модуль Юнга характеризует сопротивляемость материала деформации: чем больше E , тем меньше относительное удлинение (ε) при данной нагрузке на образец одинаковой площади сечения.

Приводим округленные значения модуля Юнга для некоторых материалов:

Материал	Модуль Юнга, $10^6 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$ или $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$
Сталь	$2 \cdot 10^6 - 2,2 \cdot 10^6$
Медь	$1 \cdot 10^6$
Алюминий	$0,99 \cdot 10^6$
Дерево вдоль волокон . .	$0,1 \cdot 10^6$
Дерево поперек волокон	$0,05 \cdot 10^6$
Резина	10

Закон Гука справедлив только до определенного предела — предела упругости. При увеличении нагрузки выше этого предела в материале появляются неисчезающие деформации — после снятия нагрузки образец не возвращается к первоначальным размерам.

*) Роберт Гук — английский физик, современник Ньютона, открыл этот закон в 1660 г.

2. На участке диаграммы BC наблюдается поразительное явление — без дополнительной нагрузки материал «течет», образец продолжает удлиняться до некоторого предела (точка C), после чего течение прекращается и для дальнейшего растяжения надо снова увеличивать нагрузку. Объяснение процессу течения и наступающему затем упрочнению материала дает молекулярная теория строения вещества.

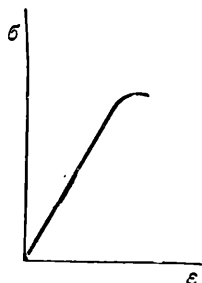


Рис. 124. Диаграмма растяжения чугуна.

У хрупких материалов, например у чугуна, площадки текучести не наблюдается (рис. 124).

3. Продолжая увеличивать нагрузку еще больше, мы увидим, что закон Гука уже больше неприменим — удлинения растут быстрее нагрузок. Точка D (см. рис. 123) на диаграмме соответствует такому напряжению материала, при котором наступает разрушение. Напряжение, соответствующее точке, называется пределом прочности. Процесс разрушения длится некоторое время. На образце наблюдается образование шейки, диаметр шейки все более и более уменьшается, и наконец образец разрывается. Нагрузка, соответствующая пределу прочности, называется разрушающей нагрузкой.

§ 76. Допускаемое напряжение. Запас прочности. Понятно, какое большое практическое значение имеет исследование материалов на прочность. Для каждого материала установлены соответствующие допускаемые напряжения. Допускаемое напряжение $[\sigma]$ не может быть равно или близко к пределу прочности, оно должно составлять только некоторую часть предела прочности:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{пч}}{K}.$$

Число K называют запасом прочности или коэффициентом безопасности. Оно показывает, во сколько раз допускаемое напряжение меньше предела прочности, при котором начинается разрушение материала:

$$K = \frac{\sigma_{пч}}{[\sigma]}.$$

Расчетной формулой для определения площади поперечного сечения какой-нибудь части конструкции будет

$$S \geq \frac{P}{[\sigma]}.$$

Величина запаса прочности зависит от многих причин: от рода материала, от ответственности сооружения, от условий работы (спокойная, статическая или ударная, динамическая или переменная

нагрузку). Необходимо учитывать и экономические соображения — большие запасы прочности экономически невыгодны.

При статической нагрузке можно принимать для стали коэффициент запаса прочности 1,4—1,6, для чугуна 4—6, для бетона и железобетона 2—3,5. Более точные значения коэффициентов безопасности имеются в специальных узаконенных нормах для проектирования сооружений и для некоторых отраслей машиностроения.

Приведем средние значения (в единицах 10^5 н/м^2 или кг/см^2) пределов прочности и допускаемых напряжений для некоторых строительных материалов при растяжении и при сжатии.

Материал	$\sigma_{\text{пч. р}}$	$\sigma_{\text{пч. сж}}$	$[\sigma]_{\text{р}}$	$[\sigma]_{\text{сж}}$
Сталь конструкционная	3800—4500	—	1600	1600
Чугун (серый)	1200—2500	6000—10 000	200—800	1200—21 500
Сосна (вдоль волокон)	112—192	400—600	700—1000	1000—1200
Кирпич	—	80—300	2	6—25

У п р а ж н е н и я

97. Груз в $2 T$ подвешен на стальном тросе, площадь поперечного сечения которого 10 см^2 . Определить напряжение троса.

98. Какие виды деформации испытывают горизонтальная балка и подкос стенового поворотного крана (рис. 125). Каковы должны быть минимальные

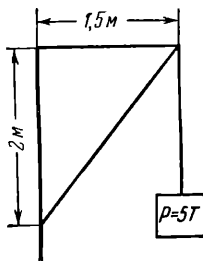


Рис. 125.

сечения балки и подкоса, если нагрузка на кран равна $5 T$, а допустимые напряжения материала крана на растяжение $[\sigma]_{\text{р}} = 300 \text{ кг/см}^2$, на сжатие $[\sigma]_{\text{сж}} = 900 \text{ кг/см}^2$?

99. Каково должно быть минимальное поперечное сечение стальной проволоки, на которой подвешен груз в 800 кг , если предел прочности стали $\sigma_{\text{пч}} = 4000 \text{ кг/см}^2$? Запас прочности принять 2,5.

РАБОТА, МОЩНОСТЬ И ЭНЕРГИЯ

§ 77. Работа. Рассмотрим такие процессы, как поднятие гири стенных часов, выталкивание пули из ствола ружья пороховыми газами, нагревание древесных опилок трением — способ, которым когда-то пользовались люди для добывания огня (рис. 126).

Результаты всех этих процессов на первый взгляд представляются совсем различными. Однако, присмотревшись, можно найти и общие их черты: во всех этих процессах меняется состояние си-



Рис. 126. Добывание огня трением.

стемы тел, принимающих участие в процессе. В случае поднятия гири стенных часов состояние системы гирия — Земля иное, когда гиря поднята, по сравнению с тем, когда гиря опущена: в последнем случае часы стоят, а при поднятой гире они могут идти. Пуля после выстрела приобретает способность лететь, преодолевая сопротивление воздуха или других тел, в которые она попадает. При трении палочки о дерево меняется состояние трущихся тел: они нагреваются.

Вместе с тем мы можем отметить во всех рассмотренных процессах

общие механические черты: 1) наличие некоторой силы, приложенной к телу; 2) перемещение тела под действием этой силы.

Процесс перемещения тела при действии на него силы называется механической работой (или просто работой). Во всех случаях, подобных указанным, мы говорим, что сила производит механическую работу, в результате которой так или иначе меняются состояния тел, участвующих в процессе.

В разных случаях результаты работы, т. е. вызванные ею изменения состояния системы тел, могут быть различны. Это можно показать на примере поднятия гири стенных часов. Очевидно, подняв гирю на вдвое большую высоту, мы получим и вдвое большее изменение состояния системы гирия — Земля, так как часы в этом

случае будут идти вдвое дальше. Очевидно также, что, подняв на одну и ту же высоту не одну гирию, а несколько гирь (например, три), мы тоже получим втрое большее изменение состояния системы гири — Земля, так как три гири заставят идти не одни, а трое часов. Из этих соображений ясно, что изменение состояния системы может быть и большим, и малым. Иными словами, результат механической работы есть физическая величина, определяемая теми изменениями состояния системы, которые произошли в процессе работы. Из рассмотренного примера ясно, что *работа тем больше, чем больше приложенная сила и чем значительнее перемещение тела при действии этой силы*. Обозначив работу A , можем написать:

$$A = Fs.$$

Это — формула для расчета работы. Отметим, что под s подразумевается перемещение в том направлении, в котором действует сила, производящая работу. Например, если подсчитывается работа, производимая при опускании гири стальных часов, то под s надо подразумевать перемещение гири в вертикальном направлении, так как действующая на гирию сила тяжести направлена вертикально вниз. Если та же гирия перемещается под действием какой-либо другой силы, например силы руки, по горизонтальному направлению, то при этом производится работа силой руки, а сила тяжести работы не производит.

Эта формула пригодна для расчетов в любых системах единиц. В системе единиц СИ сила выражается в ньютонах, расстояние — в метрах, а работа — в джоулях (сокращенно *дж*). 1 *дж* есть работа силы в 1 *н* при перемещении на 1 *м*.

За единицу работы в системе СГС принимают работу силы в 1 *дин* при перемещении тела на 1 *см*. Эта единица называется э р г о м (*эрг*). Если действует сила F *дин*, то при перемещении на 1 *см* производится работа F *эрг*, а если та же сила вызывает перемещение на s *см*, работа будет еще в s раз больше, т. е. будет равна Fs *эрг*. В системе единиц МКГСС сила выражается в *кГ*, перемещение — в метрах, а работа — в килограммометрах (сокращенно *кГм*). 1 *кГм* есть работа силы в 1 *кГ* при перемещении на 1 *м*.

Легко найти соотношения между единицами работы:

$$1 \text{ дж} = 10^8 \text{ дин} \cdot 10^3 \text{ см} = 10^7 \text{ эрг},$$

$$1 \text{ кГм} = 9,8 \text{ н} \cdot 1 \text{ м} = 9,8 \text{ дж} = 9,8 \cdot 10^7 \text{ эрг}.$$

У п р а ж н е н и я

100. Как на графике выражается работа постоянной силы F на пути s ? Определите работу по графику рис. 127.

101. Какую работу произвела сила тяги лошади, равная 200 *н*, если телега проехала 300 *м*?

Б Д. И. Сахаров, М. И. Блудов

102. Какую работу произведет подъемный кран при подъеме контейнера с кирпичом весом 750 кг на высоту 12 м ?

103. Чтобы тянуть воз весом 500 кг по шоссе, надо прилагать силу в 15 кг . На какую высоту можно было бы поднять воз, если произвести такую же работу, как для перемещения воза по шоссе на 100 м ?

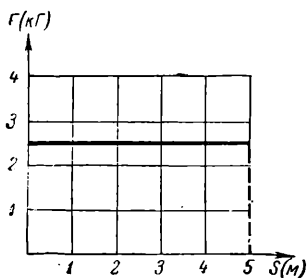


Рис. 127.

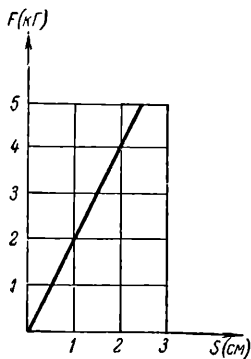


Рис. 128.

104. Найдите, пользуясь графиком (рис. 128), показывающим зависимость деформации пружины от величины приложенной силы, работу сжатия пружины на 4 см .

105. Какую работу совершает ленточный транспортер, подающий бетонную смесь (рис. 129), если направление движения ленты транспортера

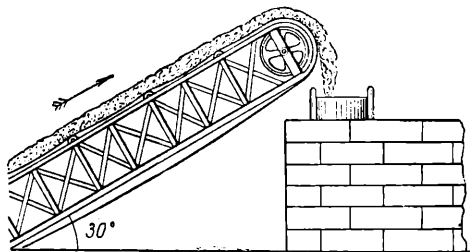


Рис. 129.

образует угол 30° с горизонтом, длина одной половины ленты 8 м , а за смену укладывается 50 т бетона?

§ 78. Работа силы, направленной под углом к перемещению тела. Если по условиям, в которых происходит перемещение тела, направление силы не совпадает с направлением перемещения, то работу перемещения совершает только часть приложенной силы, именно та составляющая сила, которая совпадает с направлением перемещения. Пусть, например, вагонетка (рис. 130) может двигаться по рельсам. Она приводится в движение тягой F каната, направление которой составляет с рельсами угол α . Разложим силу

тяги на две составляющие: силу R , направленную вдоль рельсов, и силу Q , перпендикулярную к ним. Только сила R перемещает вагонетку и совершает работу. Сила Q работы перемещения не

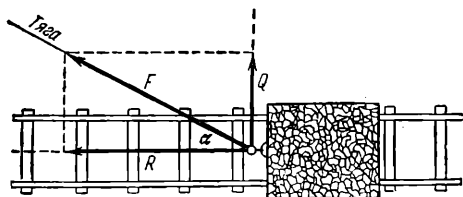


Рис. 130. Разложение силы, тянущей вагонетку.

производит, так как перпендикулярно к рельсам вагонетка не перемещается.

Работа приложенной к вагонетке силы F может быть вычислена по формуле

$$A = R \cdot s.$$

Применяя формулы тригонометрии, можем написать

$$R = F \cdot \cos \alpha.$$

Подставляя, имеем

$$A = (F \cdot \cos \alpha) s \quad \text{или} \quad A = F \cdot s \cdot \cos \alpha.$$

Работа силы, направление которой не совпадает с перемещением, равна произведению силы на перемещение и на косинус угла между направлениями силы и перемещения.

У п р а ж н е н и е

106. Человек идет по берегу и тянет за веревку лодку с силой 5 кг . Руль лодки повернут так, что она перемещается в направлении, составляющем угол 25° с направлением веревки. Какая произведена работа при перемещении лодки на 100 м ?

§ 79. Мощность. Одна и та же работа в разных случаях может совершаться за различное время. Например, рабочий будет носить партию кирпичей на крышу здания несколько минут, а подъемник сделает эту работу за несколько секунд. Чтобы охарактеризовать быстроту, с которой производится механическая работа, вводят понятие м о щ н о с т и. Эта величина является одной из важнейших характеристик различных машин.

Мощностью называется отношение работы к отрезку времени, в течение которого эта работа была произведена.

Обозначая мощность через N , работу через A и время работы через t , имеем

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

В системе СИ пользуются единицей мощности, которая называется в а т т о м (обозначается *вт*). 1 *вт* есть мощность двигателя, производящего за 1 *сек* работу 1 *дж*. Часто употребляется также внесистемная единица мощности к и л о в а т т, равная 1000 *вт* (обозначается *квт*).

В системе единиц СГС в качестве единицы мощности принимается мощность двигателя, производящего за 1 *сек* работу 1 *эрг* (обозначается *эрг/сек*). Для технических расчетов эта единица неудобна, так как она слишком мала.

Вспоминая, что

$$1 \text{ дж} = 10^7 \text{ эрг} = \frac{1}{9,8} \text{ кгМ},$$

найдем

$$1 \text{ вт} = 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{сек}} = \frac{1}{9,8} \frac{\text{кгМ}}{\text{сек}} = 0,102 \frac{\text{кгМ}}{\text{сек}};$$

$$1 \text{ квт} = 102 \frac{\text{кгМ}}{\text{сек}}.$$

Укажем, что часто употреблявшаяся ранее единица мощности — лошадиная сила (*л. с.*) — равна $75 \frac{\text{кгМ}}{\text{сек}} = 736 \text{ вт}$.

В технике употребляются двигатели мощности от нескольких ватт до сотен тысяч киловатт. Мощность человека составляет несколько десятков ватт, а лошади — несколько сотен ватт. При кратковременной работе мощности человека и лошади могут во много раз превышать те, которые они могут развивать в течение длительного времени.

Используя формулу мощности, можно написать выражение для работы

$$A = N \cdot t,$$

позволяющее выражать работу в таких часто применяемых единицах, как ватт-час, киловатт-час, лошадиная сила-час. Полезно помнить, что 1 джоуль = 1 ватт-секунде.

§ 80. Связь мощности со скоростью движения. Из формул $A = Fs$ и $N = A/t$ следует:

$$N = F \frac{s}{t}.$$

Но s/t есть скорость v . Отсюда

$$N = Fv.$$

Следовательно, мощность определяется произведением силы на скорость.

У п р а ж н е н и я

107. С какой мощностью работает человек, поднимая из колодца ведро с водой весом 12 кг со скоростью 0,5 м/сек?

108. Определите силу тяги трактора С-80 (тяговая мощность 69 л. с.) при скоростях 2,25 км/час (1-я передача) и 5,51 км/час (3-я передача).

109. Подсчитайте мощность автомашины «Победа», если вес самой машины 1350 кг, вес пяти пассажиров 300 кг, коэффициент тяги (учитывающий все виды сопротивления движению) равен 0,1, скорость 54 км/час.

110. Человек весом 50 кг поднялся по лестнице на 12 м за минуту. Найдите его мощность при подъеме.

111. Определите тяговую мощность трактора по тяговой диаграмме (рис. 131) при скорости 5,5 км/час.

У к а з а н и е. Для определения площади диаграммы воспользуйтесь весовым методом. Вычертив график на плотной бумаге, вырежьте фигуру по ее контурам, взвесьте и сравните с весом квадратного куска той же бумаги площадью 1 дм². (На практике для определения площадей криволинейных фигур пользуются планиметром.)

112. Автомобиль весом 1,5 т равномерно движется по подъему 0,08 (это число равно отношению высоты подъема к его длине). Какова мощность, развиваемая двигателем автомобиля при этом движении, если скорость автомобиля 54 км/час и если при движении автомобиля с той же скоростью по горизонтальному пути мощность двигателя равна 10 л. с.?

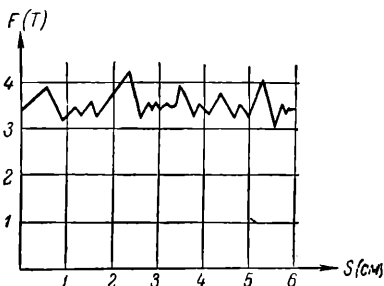


Рис. 131.

§ 81. Коэффициент полезного действия. Мы уже знаем, что механическая работа ведет к изменению состояния системы тел, участвующих в процессе. Производя ту или иную работу посредством механизмов, мы, кроме нужных нам изменений состояния системы, получаем еще и ненужные, бесполезные для нас изменения. Так, например, поднимая автомобиль домкратом, мы, кроме поднятия автомобиля, получаем еще бесполезное нагревание домкрата вследствие трения. Таким образом, механический двигатель (в нашем примере рука, вращающая рукоятку домкрата) всегда производит не только полезную, но и лишнюю работу; иными словами, *полезная работа механизма всегда меньше полной работы, произведенной двигателем.*

Отношение полезной работы к полной работе называется коэффициентом полезного действия (кпд) механизма. Если, например, механизм произвел работу 300 дж, а полезная работа равна 210 дж, то кпд равен $\frac{210}{300} = 0,7 = 70\%$; остальные 30% пошли на бесполезную работу.

Коэффициент полезного действия механизмов сильно зависит от их конструкции, состояния поверхности движущихся частей и т. д.

Поэтому в нижеприведенной таблице даны два числа — наибольшие и наименьшие кпд (в %):

Домкрат	40—50
Полиспаст	50—70
Водяной насос (поршневой)	60—75
Гидравлический пресс	80—90

Приведем пример применения кпд при расчетах. Какую работу надо произвести, чтобы поднять 300 кг воды на высоту 5 м, пользуясь насосом с кпд 60%? Полезная работа равна $3000 \text{ дж} \times 5 \text{ м} = 15\,000 \text{ дж}$. Это составляет 60% от затраченной работы. Следовательно, надо произвести работу

$$\frac{15\,000 \cdot 100 \text{ дж}}{60} = 25\,000 \text{ дж}.$$

У п р а ж н е н и я

113. Найдите кпд неподвижного блока, если для равномерного поднятия груза в 16 кг надо тянуть за другой конец веревки с силой 16,3 кг (рис. 132).

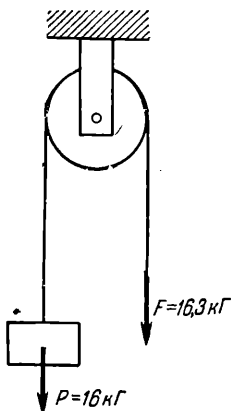


Рис. 132.

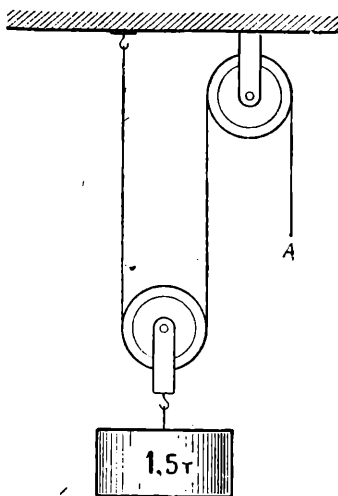


Рис. 133.

114. Груз в 1,5 т поднимается при помощи системы блоков, показанной на рис. 133, на высоту 4 м. Какую работу надо совершить при этом и с какой силой тянуть за конец троса А, если кпд системы равен 82%?

115. Какой мощности двигатель надо поставить на водокачку, чтобы за 30 минут наполнить бак емкостью 2500 ведер? Высота подъема равна 30 м, кпд двигателя 0,75, емкость ведра 12 л.

§ 82. **Работа силы тяжести при опускании тела.** Когда гиря стеновых часов опускается вниз, производится работа: механизм часов движется, слегка нагреваясь при этом; мы слышим звук тиканья часов. Эта работа производится силой тяжести, действующей на гирию. Когда на гидроэлектростанции вода спускается из верхнего канала в нижний, за счет производимой работы вращаются валы турбин и связанных с ними электрических машин, вода и турбины слегка нагреваются. Эта работа производится силой тяжести, действующей на текущую воду. Вообще, *когда какое-нибудь тело опускается, сила тяжести производит работу.*

От чего зависит величина работы силы тяжести? Отметим, прежде всего, что при расчете работы силы тяжести надо принимать во внимание только перемещение в направлении вертикали (см. § 77). При движении по горизонтальному направлению тело по вертикальному направлению не перемещается (высота его остается неизменной). Поэтому при движении по горизонтальному направлению сила тяжести работы не производит.

Пусть тело из точки A (рис. 134) перемещается в точку C , не лежащую на одной вертикали с точкой A . Мы можем рассматривать это перемещение как два перемещения: 1) тело из точки A сперва перемещается в точку B , лежащую на той же вертикали на такой же высоте, как и точка C ; 2) затем из точки B тело перемещается по горизонтали в точку C . Как указано, при перемещении по горизонтали в точку C сила тяжести никакой работы не производит. Следовательно, работа силы тяжести при перемещении из точки A в точку C такова же, как и при перемещении из точки A в точку B . Обозначив работу силы тяжести через A_g (индекс g означает, что мы имеем в виду силу тяжести), силу тяжести через P и высоту, с которой опустилось тело, через h , можем написать:

$$A_g = Ph.$$

Но согласно сказанному в § 44

$$P = mg,$$

и поэтому

$$A_g = mgh.$$

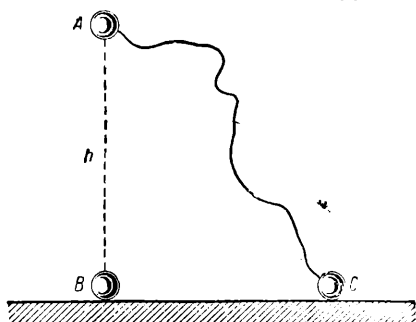


Рис. 134. Работа силы тяжести при перемещении тела из положения A в положение C такая же, как и работа силы тяжести при перемещении тела из положения A в положение B .

Итак, работа силы тяжести, действующей на тело с массой m при опускании его с высоты h , равна произведению mgh . Необходимо отметить, что работа силы тяжести не зависит ни от того, по какой траектории двигалось тело (были ли, например, трубы для воды на гидроэлектростанции прямыми или кривыми), ни от скорости, с которой двигалось тело, ни от плотности тела (если бы вместо воды на гидроэлектростанции текла ртуть, то при одинаковых массах протекшей жидкости работа силы тяжести была бы одинаковой).

§ 83. Потенциальная энергия поднятого тела. Итак, при опускании тела с уровня на высоте h (рис. 134), на уровень, от которого мы отсчитываем высоту (нулевой уровень), сила тяжести всегда производит одну и ту же работу mgh , независимо от условий, в которых происходило движение тела (форма траектории, продолжительность и т. п.). Следова-

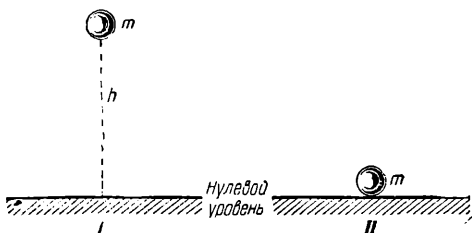


Рис. 135. Два состояния системы камень — Земля.

тельно, состояние I системы Земля — тело, показанное на рис. 135, отличается от состояния II тем, что при переходе любым способом из первого состояния во второе производится работа mgh . Это и дает возможность характеризовать состояние системы величиной ее энергии. Энергией системы в некотором состоянии называется величина, показывающая, какая работа будет произведена, если система из этого состояния перейдет в нулевое состояние (на рис. 135 — из состояния I в состояние II). В данном случае энергия системы зависит от взаимного расположения тел. Энергия, зависящая от расположения тел, называется потенциальной энергией (обозначается $E_{\text{п}}$). Итак, система Земля — тело, поднятое на высоту h , обладает потенциальной энергией

$$E_{\text{п}} = mgh = Ph,$$

где P — вес тела.

Необходимо сразу указать, что в определении потенциальной энергии поднятого тела есть некоторый произвол: произволен выбор нулевого уровня. Можно условиться считать нулевым уровнем или поверхность Земли (рис. 136, а), или дно ямы (рис. 136, б), или поверхность стола (рис. 136, в) и т. п.

Так как изменение энергии показывает, какая работа производится при переходе системы из одного состояния в другое, то энергия выражается в тех же единицах, что и работа. В системе

единиц СИ в джоулях СГС энергия выражается в эргах, в системе МКГСС — в килограммометрах. Например, найдем, какой потенциальной энергией обладает камень массой 2 кг на высоте 5 м. В системе СИ

$$E_{\text{п}} = mgh = 2 \cdot 9,8 \cdot 5 \text{ дж} = 98 \text{ дж}.$$

Мы предполагали до сих пор, что речь идет о телах, размеры которых малы по сравнению с высотой h . Поэтому нас не интересовал вопрос, какую именно точку тела надо брать, чтобы отсчитать высоту тела над нулевым уровнем; для этого можно было взять

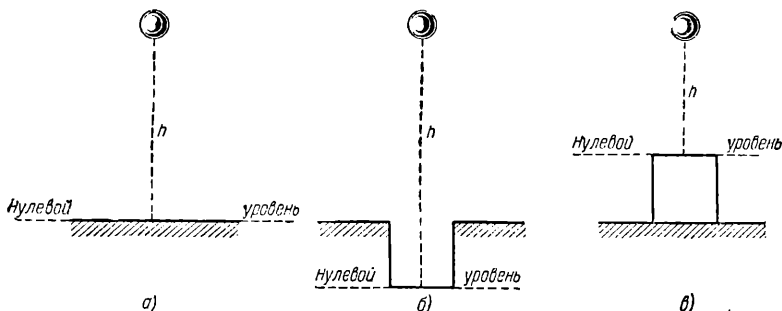


Рис. 136. Условность понятия нулевого уровня потенциальной энергии.

любую точку. Однако это не всегда так, если размеры тела велики, то нельзя взять для отсчета высоты любую его точку. Как же быть в таких случаях?

Об этом мы уже подробно говорили в § 67, когда вводили понятие центра тяжести тела.

У п р а ж н е н и я

116. При поднятии груза на некоторую высоту мы совершаем работу и запасаем в поднятом грузе потенциальную энергию. За счет чего берется эта энергия?

117. Имеет ли смысл утверждение, что тело обладает определенной потенциальной энергией, если не указано, относительно какого уровня?

118. На столе высотой 80 см от пола комнаты, расположенной на втором этаже, лежит груз 5 кг. Определите потенциальную энергию груза по отношению к полу комнаты и по отношению к поверхности Земли, если пол второго этажа находится на высоте 4 м над Землей.

§ 84. Кинетическая энергия. Мы видели, что результатом работы в случае подъема груза является увеличение его потенциальной энергии. Это не всегда бывает так: иногда производится работа, при которой потенциальная энергия не меняется. Примером может служить работа силы, выталкивающей пулю из горизонтально

расположенного ствола ружья. Но в этом случае состояние пули меняется иначе: увеличивается скорость пули. Благодаря наличию скорости пуля может пробить препятствие, например доску, т. е. сама произвести работу, причем скорость пули при этом уменьшается.

Отсюда следует, что изменение скорости тел тоже связано с изменением энергии системы. Если потенциальная энергия системы во время уменьшения скорости тел не меняется, то можно утверждать, что при наличии движения одной части системы по отношению к другой энергия системы больше, чем при отсутствии этого движения.

Энергия, которой обладает система при движении ее частей, называется к и н е т и ч е с к о й э н е р г и е й. Как уже говорилось, в физике обычно принимают за тело отсчета, а следовательно, считают неподвижной, поверхность Земли и под скоростью какого-нибудь тела подразумевают его скорость относительно поверхности Земли. Ради краткости кинетическую энергию тела относительно Земли называют кинетической энергией этого тела.

Из сказанного следует, что кинетическая энергия тела равна той работе, которая будет произведена им при уменьшении его скорости до нуля. Например, кинетическая энергия молотка, которым забивают гвоздь, равна той работе, которая будет произведена при полной остановке молотка.

От чего зависит величина кинетической энергии тела? Предположим, что изменение кинетической энергии есть единственное изменение, которое произойдет в системе в результате работы. В таком случае кинетическая энергия тела равна той работе, которую нужно произвести, чтобы вывести его из состояния покоя и заставить двигаться со скоростью v :

$$E_k = A = Fs.$$

Но, как мы видели в §§ 42 и 33, $F = ma$; $v^2 = 2as$. Отсюда

$$s = \frac{v^2}{2a} \quad \text{и} \quad A = ma \frac{v^2}{2a} = \frac{mv^2}{2}.$$

Следовательно,

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

Итак, кинетическая энергия тела равна половине произведения массы тела на квадрат его скорости. Обратим внимание, что в формулу кинетической энергии скорость входит во второй степени. Это значит, что кинетическая энергия тела резко возрастает с его скоростью. Если скорость тела увеличится, например, в 10 раз, то кинетическая энергия возрастет в 100 раз.

Вычислим для примера кинетическую энергию пули массой 10 г, движущейся со скоростью 0,5 км/сек. Выберем систему единиц СИ:

$$m = 10 \text{ г} = 0,01 \text{ кг},$$

$$v = 0,5 \frac{\text{км}}{\text{сек}} = 500 \frac{\text{м}}{\text{сек}}, \quad E_k = \frac{0,01 \cdot 250\,000}{2} \text{ дж} = 1250 \text{ дж}.$$

§ 85. Уравнение кинетической энергии. Рассмотрим случай, когда на тело массы m действует постоянная сила F , направление которой совпадает с направлением скорости тела v . В таком случае тело движется прямолинейно с постоянным ускорением a . Пусть тело прошло путь s . Пользуясь выводами § 33, можем написать:

$$v^2 - v_0^2 = 2as,$$

или, умножив на $\frac{m}{2}$,

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = mas.$$

Заменяя произведение ma силой F , имеем:

$$Fs = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2},$$

или, так как $Fs = A$,

$$A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}.$$

Это уравнение показывает, что изменение кинетической энергии тела равно работе, действующей на него силы. Можно показать, что это уравнение имеет место не только при действии постоянной силы, но и вообще всегда. При этом под A нужно подразумевать сумму работ всех сил, действующих на тело.

Подобное же соотношение имеет место для любого изменения механической энергии. Преобразование потенциальной энергии в кинетическую или обратно, передача энергии от одной системы тел к другой есть результат совершения работы. Таким образом, *работа есть процесс изменения энергии*.

У п р а ж н е н и я

119. Что больше: кинетическая энергия пули с массой 10 г, летящей со скоростью 800 $\frac{\text{м}}{\text{сек}}$, или велосипедиста с массой 70 кг, едущего со скоростью 6 м/сек?

120. Какой путь пройдет поезд, идущий со скоростью 36 км/час, после прекращения подачи пара, если сопротивление движению составляет 0,05 веса поезда?

121. Футбольный мяч весом 0,5 кг летит в направлении ворот со скоростью 10 $\frac{\text{м}}{\text{сек}}$. Навстречу ему движется вратарь со скоростью 4 м/сек. Какова

скорость мяча относительно вратаря? Определите кинетическую энергию мяча: а) относительно ворот и б) относительно вратаря.

122. Какую работу произведут газы в стволе орудия при выстреле, если снаряд весом 20 кг вылетает из дула орудия со скоростью 1000 м/сек? Откатом орудия пренебрегите.

123. Молот весом 1,5 кг ударяет по костьлю и вгоняет его в шпалу на глубину 2 см. Определите среднюю силу, с которой молот действует на костьль, если скорость молота в момент удара равна 10 м/сек.

§ 86. Переход кинетической энергии в потенциальную и обратно.

Рассмотрим движение брошенного вверх камня. Когда камень летит вверх, его скорость, а следовательно, и кинетическая энергия уменьшаются. Но зато он поднимается все выше, т. е. возрастает его потенциальная энергия. Когда камень достигнет верхней точки и остановится, его кинетическая энергия будет наименьшей, а потенциальная — наибольшей. Затем, при движении камня вниз, потенциальная энергия его будет уменьшаться, а кинетическая — увеличиваться. Таким образом, потенциальная энергия тела может переходить в кинетическую и обратно.

Если сопротивление воздуха мало, то брошенный вверх камень упадет на Землю практически с той же скоростью, с какой был брошен. Значит, в этом случае сумма кинетической и потенциальной энергий камня относительно Земли остается неизменной.

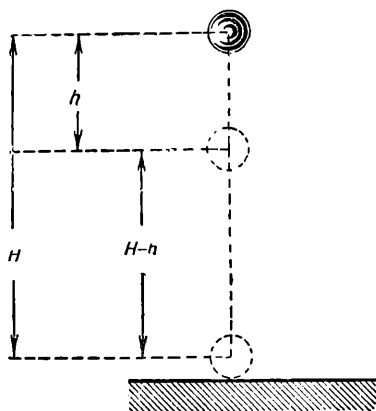


Рис. 137. Чертеж в таблице.

Положение камня	$E_{\text{п}}$	$E_{\text{к}}$	$E_{\text{п}} + E_{\text{к}}$
I	PH	0	PH
II	$P(H - h)$	$\frac{mv_{\frac{3}{2}}^2}{2} = Ph$	$P(H - h) + Ph = PH$
III	0	$\frac{mv_{\frac{3}{2}}^2}{2} = PH$	PH

Покажем правильность этого утверждения для трех точек траектории падающего камня. В таблице дана сводка кинетических и

потенциальных энергий камня для верхней, некоторой средней и нижней точек траектории камня, показанных на рис. 137. В последнем столбце приведены суммы кинетической и потенциальной энергий. Видно, что сумма энергий и в верхней, и в нижней, и в произвольно выбранной средней точках траектории одна и та же.

Напомним, что эти выводы справедливы лишь тогда, когда сопротивлением воздуха можно пренебречь.

§ 87. Различие понятий работы и энергии. Понятия работы и энергии надо четко различать.

Энергия есть величина, характеризующая *состояние* системы (камень поднят над поверхностью Земли высоко или низко, пуля летит относительно поверхности Земли быстро или медленно, пружина часового механизма деформирована сильно или слабо и т. п.). Говоря об энергии тел, всегда необходимо условиться, в каком случае мы считаем энергию системы равной нулю (например, мы можем условиться, что энергию системы гири — Земля мы считаем равной нулю, если гиря лежит на полу третьего этажа дома).

Работа есть величина, которая характеризует *процесс*, при котором меняется энергия системы (происходит подъем камня, увеличивается скорость пули и т. п.). В отличие от энергии, никакого соглашения о том, когда считать работу равной нулю, не требуется. Работа равна нулю, если состояние системы не изменилось (камень остался на прежней высоте, скорость пули не изменилась и т. п.). Величина работы показывает, на сколько изменилась энергия системы. Работа есть мера изменения энергии.

§ 88. Передача энергии от одной системы к другой. Пусть движущийся железнодорожный вагон ударяет буферами в другой одиночный вагон, неподвижно стоящий на рельсах. При этом движущийся вагон останавливается, а неподвижный начинает двигаться. Нечто подобное мы можем наблюдать, положив на гладкий стол монету и пустив по столу другую монету так, чтобы она ударила по первой. В результате соударения вторая монета останавливается, а первая отлетает со скоростью, близкой к скорости, которую имела вторая монета. Во всех таких случаях мы наблюдаем увеличенные кинетической энергии какого-нибудь тела и одновременное уменьшение кинетической энергии другого тела. Эти изменения энергии тел являются результатом работы упругих сил, возникающих при деформации буферов или монет во время их соударения. Часто внутреннее состояние соударяющихся тел после соударения изменяется настолько мало, что этими изменениями можно пренебречь (например, буфера вагонов после удара полностью восстанавливают свою форму и не нагреваются). Если это так, то единственным результатом соударения является увеличение кинетической энергии одного

из тел и уменьшение кинетической энергии другого тела. В таких случаях мы говорим, что произошла передача кинетической энергии от одного тела другому.

§ 89. Различные виды энергии. До сих пор мы рассматривали энергию, зависящую от взаимного расположения тел и от их относительной скорости. Такую энергию принято называть механической энергией, так как этим понятием приходится пользоваться в механике.

Однако состояние системы тел определяется не только их взаимным расположением и их скоростями. Состояние системы тел зависит еще от внутреннего состояния тел (внутренняя энергия). Перечислим некоторые физические величины, при изменении которых меняется внутренняя энергия тел.

1. Температура. Когда мы производим работу, поднимая тело, увеличивается его потенциальная энергия. Когда мы производим работу, заставляя тело увеличивать скорость, увеличивается его кинетическая энергия. Какое же изменение состояния происходит в случае, если мы производим работу, равномерно двигая ящик по горизонтальному полу? При этом не меняются ни потенциальная энергия, ни кинетическая энергия ящика. Но вследствие трения ящика о пол ящик и пол нагреваются. Нагревание трущихся тел обнаружить легко. Например, оно ощущается, если сильно потереть ладони друг о друга. Из-за трения нагреваются пилы при пилке дров, колеса железнодорожных вагонов и т. д.

Итак, при наличии трения работа ведет к изменению теплового состояния тел. А различие в тепловом состоянии тел обуславливает возможность произвести работу. Мы увидим далее, что нагревание воздуха в атмосфере вызывает движение воздуха, т. е. ветер, который может приводить в движение ветряные двигатели и производить работу. Нагревание воды в котлах дает пар, который может двигать поршень в паровой машине, и т. п. Итак, нагретое тело отличается от холодного тела тем, что при его охлаждении может быть произведена работа.

2. Упругие деформации тел. Растягивая горизонтально расположенную пружину, мы не меняем ее механическую энергию; вместе с тем она остается холодной. Однако состояние пружины все же изменилось, и при возвращении пружины к прежней длине будет произведена работа. Подобно этому любое другое упругое тело, возвращаясь от деформированного состояния к нормальному, производит работу; например, натянутый лук бросает стрелу. Итак, энергия деформированного упругого тела больше энергии того же тела в недеформированном состоянии. Это связано с изменением внутреннего состояния тел при деформации: в деформированном теле составляющие его частицы расположены иначе, чем в недеформированном.

Однако абсолютно упругих тел не существует. Все тела не вполне восстанавливают свою форму при исчезновении деформирующих сил, что особенно заметно при длительном действии сил. Многие вещества не восстанавливают свою форму полностью даже при очень кратковременных действиях деформирующих сил (например, свинец). Как обстоит дело с энергией таких тел? Согнем и разогнем несколько раз свинцовую или медную пластинку. На ощупь легко заметить, что в месте изгиба пластинка нагрелась. Значит, в случае деформации не вполне упругих тел, кроме энергии, зависящей от расположения частиц, появляется еще энергия, связанная с повышением температуры тела; это, как мы узнаем в разделе «Молекулярная физика», зависит от увеличения скорости частиц, из которых состоит тело.

3. Степень раздробленности вещества. Часто одним из результатов работы является раскалывание и размельчение вещества. Переход вещества из твердого состояния в жидкое или из жидкого в парообразное тоже можно рассматривать как чрезвычайно тонкое его размельчение.

Опыт показывает, что энергия вещества в раздробленном состоянии больше, чем энергия того же вещества в нераздробленном состоянии. Особенно велика разница в энергиях твердого и расплавленного вещества или жидкости и ее пара. Мы возвратимся к этим вопросам в разделе II.

4. Х и м и ч е с к и й с о с т а в. Когда в цилиндре автомобильного двигателя из смеси паров бензина и кислорода образуются пары воды и углекислый газ, то производится работа, обеспечивающая в конечном счете ход автомобиля. Значит, внутренняя энергия смеси паров бензина с кислородом больше энергии образовавшихся из нее воды и углекислого газа (если, конечно, их температуры одинаковы). Подобно этому и энергия пороха больше энергии образовавшихся из него пороховых газов (температуры и здесь предполагаются одинаковыми). Внутренняя энергия, зависящая от химического состава тел, называется х и м и ч е с к о й э н е р г и е й.

Список величин, от которых зависит внутренняя энергия тел, в дальнейшем придется расширить.

§ 90. Закон превращения и сохранения энергии. Мы видели (§ 86), что при отсутствии сопротивления воздуха сумма кинетической и потенциальной энергий брошенного камня остается постоянной. Однако это не будет иметь места при наличии сопротивления воздуха. В этом случае камень поднимается на меньшую высоту, а падая вниз, приобретает меньшую скорость, чем при отсутствии сопротивления воздуха. Зато вследствие трения нагреваются и воздух, и камень. Количество теплоты, получающейся при работе по преодолению трения, было много раз тщательно измерено. опыты

показали, что при одинаковой работе по преодолению трения всегда получается одно и то же количество теплоты. Отсюда можно вывести, что при движении камня в воздухе остается постоянной сумма потенциальной и кинетической энергий, а также энергии, зависящей от температуры тел, участвующих в данном процессе (внутренней энергии).

Выше мы считали, что в этом процессе нет передачи энергии извне. Если бы это было не так, например, если бы воздух и камень во время процесса бросания камня нагревались лучами Солнца, то сумма всех видов энергии не была бы постоянной, а увеличилась бы. Итак, энергия системы камень — Земля — воздух может измениться только при условии передачи энергии извне или вовне. При отсутствии указанной передачи сумма всех видов энергии этой системы есть величина постоянная.

Будем называть систему тел, не получающих энергии извне, не отдающих энергии вовне и не производящих никакой работы в окружающей среде, замкнутой системой. Тщательное и подробное изучение явлений природы привело физиков к убеждению, что положение, которое мы только что установили для системы камень — Земля — воздух, имеет место для всех замкнутых систем. *В замкнутой системе сумма всех видов энергии тел, составляющих систему, есть величина постоянная.*

Иначе эту мысль можно выразить так: *энергия никуда не исчезает и не создается из ничего.* Она лишь передается от одного тела к другому или переходит из одного вида в другой.

Это — один из важнейших законов природы: закон превращения и сохранения энергии.

Закон сохранения энергии был с изумительной прозорливостью указан (в качественной форме) в середине XVIII в. М. В. Ломоносовым. В то время физика еще не достигла такого развития, чтобы была возможна полная количественная формулировка. Спустя сто лет немецкие ученые Р. Майер и Г. Гельмгольц на основании открытых к этому времени законов физики и английский исследователь Д. Джоуль в результате специальных опытов дали формулировку, близкую к современной.

Отметим, что окончательному установлению закона сохранения энергии предшествовали новые шаги русских ученых в этом направлении. В 1834 г. Б. С. Якоби отчетливо выразил закон сохранения энергии для механических и тепловых явлений, а за год до этого Э. Х. Ленц открыл закон (о нем речь пойдет дальше в § 299), который, по существу дела, является законом сохранения энергии для электромагнитных явлений.

Закон сохранения энергии является путеводной нитью, позволяющей разбираться в новых, еще неизведанных областях. Для техники он является основным средством расчета машин.

У п р а ж н е н и е

124. Проследите за превращениями энергии в следующих процессах: а) упавший на Землю мяч при каждом новом отскоке от нее поднимается на меньшую высоту, чем в предыдущий раз; б) выстрел из ружья.

§ 91. **Масса и энергия. Закон Ломоносова.** Мы познакомились с новой величиной, характеризующей явления в окружающем нас мире, — с энергией. Каково отношение этого понятия к понятиям, изученным ранее, в частности к понятию массы.

Как будет разъяснено в главе XXXVIII, масса и энергия какой-либо системы тел неразрывно связаны между собой. Мы увидим, что нельзя увеличить (или уменьшить) энергию системы, не увеличив (или не уменьшив) ее массы. И наоборот, изменение массы системы всегда связано с изменением ее энергии. Правда, в обычных условиях даже значительному изменению энергии сопутствует лишь ничтожное, не поддающееся измерению изменение массы. Современная физика, сумевшая использовать движение частиц, из которых состоят атомы, столкнулась, однако, с необходимостью учитывать связь энергии и массы. Эту связь можно формулировать так: *материи, в какой бы форме она ни находилась, всегда присущи и масса, и энергия.* Нет материи, обладающей массой, но не обладающей энергией, и нет также материи, обладающей энергией, но не обладающей массой.

Таким образом, закон сохранения энергии и закон сохранения массы объединяются в один общий закон. Этот общий закон советский ученый С. И. Вавилов с полным основанием назвал з а к о н о м Л о м о н о с о в а, высказавшего идею о сохранении энергии и установившего также закон сохранения масс при химических превращениях: *материя и присущие материи масса и энергия не создаются и не уничтожаются.*

Закон Ломоносова есть составная часть материалистического миропонимания.

§ 92. **Невозможность создания вечного двигателя.** И в наше время находятся люди, старающиеся изобрести машину, которая работала бы, не требуя подачи к ней энергии извне. Было придумано, например, водяное колесо, которое должно было не только производить полезную работу, но также приводить в движение насос, который подавал бы воду обратно на водяное колесо и таким образом приводил бы его в вечное движение без помощи постороннего источника энергии. Из всех подобных проектов, иногда чрезвычайно остроумных, никогда ничего не получалось. Изобретатели полагали, что неудача их заключена в каких-нибудь недостатках конструкции двигателей.

После установления закона сохранения энергии стало ясно, что неудачи всех попыток создать вечный двигатель не случайны. Машины могут работать только в том случае, если в окружающем мире происходят изменения: опускается вода, питающая гидростанцию, т. е. уменьшается потенциальная энергия воды; уменьшается скорость воздуха, вращающего крылья ветряной мельницы, т. е. уменьшается его кинетическая энергия; сжигается топливо в топке паровоза, т. е. уменьшается химическая энергия системы топливо — кислород, и т. п.

Таким образом, *неудачи изобретателей вечных двигателей — одно из подтверждений закона сохранения энергии.*

КРИВОЛИНЕЙНОЕ И ВРАЩАТЕЛЬНОЕ
ДВИЖЕНИЯ

§ 93. **Направление скорости при криволинейном движении.** Когда тело движется по криволинейной траектории, скорость его все время меняет направление. Напомним (см. § 23), что в любой точке траектории скорость направлена по касательной к траектории. В этом можно убедиться на простом опыте. Пусть шарик

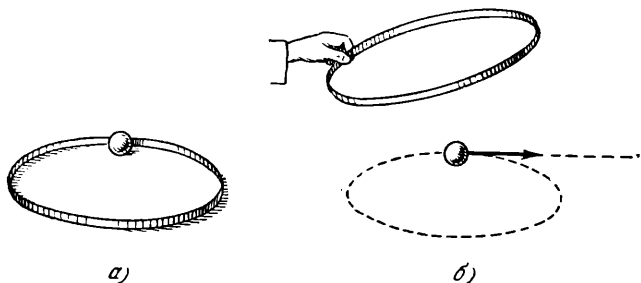


Рис. 138. *а)* Шарик катится по окружности внутри обруча; *б)* если снять обруч, то шарик движется по касательной к окружности.

катиться по окружности внутри положенного на горизонтальную поверхность обруча. Снимем обруч в какой-нибудь момент, и мы увидим, что не связанный в своем движении шарик покатится по касательной к окружности в той точке, где он находился в момент снятия обруча (рис. 138). Криволинейное движение может быть только вынужденным под действием сил под углом к направлению движения. Силы реакции связи, действовавшие со стороны стенок обруча на шарик, были такими силами в описанном опыте.

§ 94. **Движение тела, брошенного горизонтально.** Силами, искривляющими траекторию тела, могут быть и силы тяжести. Рассмотрим движение тела, брошенного с некоторой высоты над

землей в горизонтальном направлении. Скатившийся со стола шарик, которому мы сообщили толчком скорость в горизонтальном направлении (рис. 139), будет двигаться по кривой линии, называемой параболой. Его движение по параболе может рассматриваться как результат двух независимых друг от друга движений — одного равномерного в горизонтальном направлении со скоростью, какую ему сообщили, и другого в вертикальном направлении по законам свободного падения.

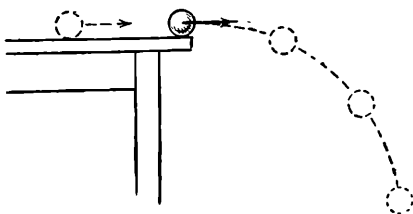


Рис. 139. Движение шарика, сброшенного со стола.

С какой бы скоростью ни бросали тело горизонтально, полет до земли будет продолжаться столько времени, сколько требуется для свободного падения с данной высоты. Рис. 140 изображает опыт, подтверждающий это.

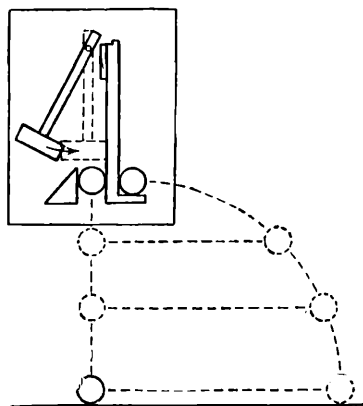


Рис. 140. Свободно падающий и горизонтально брошенный с той же высоты шарик одновременно достигают пола.

Если отвести в сторону висящий сбоку молоток и потом выпустить его, то при ударе молотка о пружинящую пластинку один из шариков будет сброшен в горизонтальном направлении, а другой, прежде зажатый пружиной, освободившись, провалится через отверстие вниз и будет падать свободно. Оба шарика одновременно начнут движение и одновременно достигнут пола.

§ 95. Движение тела, брошенного под углом к горизонту. Рассуждением, аналогичным предыдущему, мы можем выяснить, как будет двигаться тело, брошенное под каким-нибудь углом к горизонту. Результирующее движение здесь будет складываться из движения, равномерного вдоль направления начальной скорости, и полета под действием силы тяжести вниз (рис. 141). Для выяснения закономерности полета разложим начальную скорость v на две составляющие — вертикальную и горизонтальную (рис. 142):

$$v_y = v \sin \alpha \quad \text{и} \quad v_x = v \cdot \cos \alpha.$$

При отсутствии сопротивлений воздуха горизонтальная скорость будет оставаться постоянной, вертикальная же сначала будет убывать, как при полете тела, брошенного вверх.

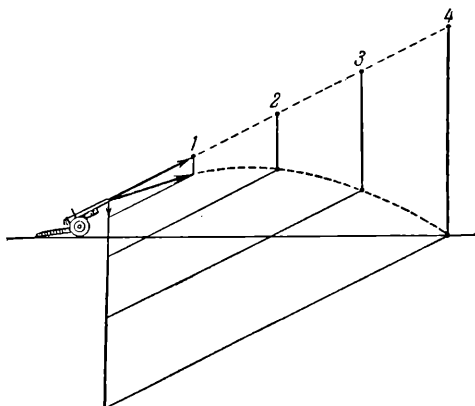


Рис. 141. Построение траектории движения тела, брошенного под углом к горизонту.

Время подъема и наибольшую высоту подъема найдем по формулам равнозамедленного движения:

$$t_1 = \frac{v_y}{g} = \frac{v \sin \alpha}{g},$$

$$H = \frac{v_y^2}{2g} = \frac{v^2 \cdot \sin^2 \alpha}{2g},$$

а дальность полета рассчитаем по формуле равномерного движения

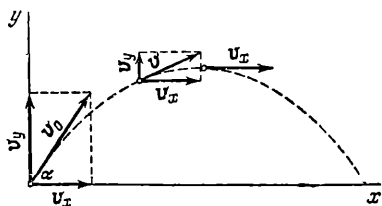


Рис. 142. Разложение начальной скорости на составляющие.

угла, под которым брошено тело. Из тригонометрии известно, что

$$2 \cos \alpha \cdot \sin \alpha = \sin 2\alpha.$$

Максимальное значение синуса, равное 1, соответствует углу 90° . Следовательно, максимальная дальность полета будет при $2\alpha = 90^\circ$

$$S = v_x \cdot t,$$

где

$$t = 2t_1;$$

$$S = \frac{2v \cos \alpha \cdot v \sin \alpha}{g} = \frac{v^2}{g} \sin 2\alpha.$$

Из полученной формулы можно выяснить, при каком условии будет достигнута наибольшая дальность полета. Она зависит от

или $\alpha = 45^\circ$. Этот вывод легко иллюстрировать на опыте с пружинным пистолетом или направляя под разными углами струю воды. Полет тела в воздухе происходит вследствие сопротивления

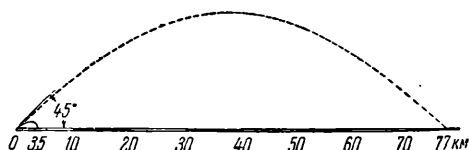


Рис. 143. Баллистическая кривая

воздуха по другим, гораздо более сложным законам. Вместо параболы получается несимметричная траектория, круче загибающаяся вниз после наивысшей точки. Приходится учитывать и форму и массу летящего тела. Траектория, по которой движутся выпущенные из орудия артиллерийские снаряды, называется баллистической кривой (рис. 143).

У п р а ж н е н и я

125. На каком расстоянии от места бросания упадет на землю камень, брошенный горизонтально со скоростью 10 м/сек с высоты $1,5 \text{ м}$?

126. Насколько увеличится дальность полета брошенного горизонтально камня, если увеличить скорость бросания в два раза? Постройте график полета с начальной и с удвоенной скоростью.

127. С самолета, летящего на высоте 400 м со скоростью 300 км/час , надо сбросить вымпел на судно, которое движется со скоростью 22 км/час навстречу самолету. На каком расстоянии от судна нужно сбросить вымпел?

128. Бросив мяч в горизонтальном направлении и сделав все необходимые измерения, вычислите начальную скорость мяча.

129. Мяч брошен под углом 30° к горизонту со скоростью 10 м/сек . Определить наибольшую высоту подъема и дальность полета.

§ 96. Вращение твердого тела. Приступая к изучению механики, мы познакомились с двумя видами движения твердых тел — поступательным и вращательным (§ 24). Мы видели, что при поступательном движении все точки твердого тела движутся одинаково. Это значит, что все точки твердого тела, двигающегося поступательно, за данный отрезок времени смещаются одинаково, имеют в каждый момент одну и ту же скорость и одно и то же ускорение. Иными словами, при поступательном движении, чтобы охарактеризовать движение всего тела, нужно указать только *одно* смещение, *одну* скорость и *одно* ускорение. Иначе обстоит дело при вращательном движении. При таком движении точки тела движутся по окружностям разных диаметров, и поэтому смещения точек за данный отрезок времени различны; различны также скорости и ускорения разных точек вращающегося тела. Отсюда ясно, что при

вращательном движении нельзя охарактеризовать движение всего тела указанием смещения, скорости и ускорения какой-либо одной его точки. Для характеристики вращательного движения всего тела величины смещения, скорости и ускорения, введенные нами при изучении поступательного движения, явно непригодны. Надо искать новые величины.

Присматриваясь к вращательному движению более внимательно, можно найти общее в движениях отдельных точек тела. Пусть на рис. 144 точка O есть точка пересечения оси вращения, перпендикулярной к плоскости чертежа, с этой плоскостью. Рассмотрим точки тела A и B , находящиеся

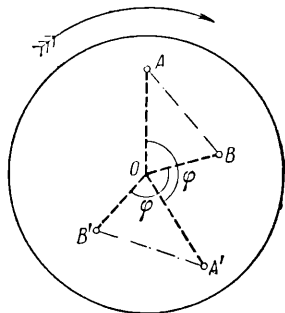


Рис. 144. Радиусы OA и OB за некоторый отрезок времени поворачиваются на одинаковый угол $\varphi = \angle AOA' = \angle BOB'$.

на разных расстояниях от оси O . Через некоторый отрезок времени точки A и B займут положения A' и B' . Так как тело твердое, то расстояние между A и B с течением времени не меняется: $AB = A'B'$. Далее, так как расстояния точек A и B от оси тоже не меняются ($OA = OA'$ и $OB = OB'$), то треугольники AOB и $A'OB'$ равны друг другу. Отсюда следует равенство углов AOB и $A'OB'$. Прибавляя к этим углам угол $A'OB$, получим:

$$\angle AOA' = \angle BOB' = \varphi.$$

Это значит, что радиусы, проведенные из точки O в точки A и B , повернулись за данный отрезок времени на один и тот же угол. То же можно доказать для любых других точек вращающегося тела. Иными словами, угол поворота радиусов, проведенных от оси в различные точки, за данный отрезок времени для всех точек вращающегося тела один и тот же. Он называется **у г л о м по в о р о т а т е л а**. Угол поворота измеряется в радианах *).

Итак, вместо смещения, характеризующего поступательное движение тела, вращательное движение характеризуется углом поворота (его обозначают буквой φ). Если вращающееся тело возвратится в положение, от которого был начат отсчет времени, т. е. тело совершит один оборот, то угол поворота будет равен $360^\circ = 2\pi$ радианов.

Отрезок времени, в течение которого вращающееся тело делает один оборот, называется **п е р и о д о м** вращения (обозначается T). Величина, обратная периоду ($1/T$), показывающая, сколько обо-

*) Радиан есть угол, соответствующая которому длина дуги окружности равна радиусу.

ротов сделает тело за единицу времени (1 *сек*), или как часто следуют друг за другом обороты тела, называется *частотой* оборотов (обозначается n):

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

§ 97. Угловая скорость. Чем же заменить при вращении понятие скорости, весьма удобное для характеристики поступательного движения? Обратим внимание, что отношение изменения угла поворота к отрезку времени, в течение которого это изменение произошло, тоже является одним и тем же для всех точек вращающегося тела. Поэтому эта величина характеризует при вращательном движении движение всего тела. Она называется *угловой скоростью* вращения (обозначается ω). Угловая скорость тела есть отношение изменения угла поворота к отрезку времени, в течение которого это изменение произошло:

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

Угловая скорость выражается в радианах в секунду (во всех системах единиц).

В частном случае, когда угловая скорость не меняется с течением времени, движение тела называется *равномерным вращением*. В этом случае для вычисления угловой скорости можно взять любой отрезок времени. Взяв в качестве последнего периода вращения T , получим формулу

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

или, так как $\frac{1}{T} = n$,

$$\omega = 2\pi n,$$

т. е. угловая скорость равна частоте оборотов, умноженной на 2π . Если частота оборотов дана в мин^{-1} (*), то, вычисляя угловую скорость, надо выразить ее в сек^{-1} . Пусть, например, частота оборотов равна 1200 мин^{-1} , найдем угловую скорость. Выразим частоту в сек^{-1} : $n = 1200 \text{ мин}^{-1} = 20 \text{ сек}^{-1}$;

$$\omega = 2\pi \cdot n = 2 \cdot 3,14 \cdot 20 \frac{\text{рад}}{\text{сек}} = 126 \frac{\text{рад}}{\text{сек}}.$$

Упражнение

130. Найдите угловую скорость: а) часовой стрелки; б) земного шара; в) шкива электромотора, вращающегося с частотой 600 мин^{-1}

*) Часто вместо того, чтобы писать $\frac{1}{\text{см}}$, $\frac{1}{\text{сек}}$, $\frac{1}{\text{мин}}$, $\frac{1}{\text{г}}$ и т. д., пишут см^{-1} , сек^{-1} , мин^{-1} , г^{-1} и т. п.

§ 98. Линейная скорость. Очень часто необходимо знать скорости, с которыми движутся отдельные точки вращающегося тела. Например, чтобы судить о срезании стружки с изделия, обрабатываемого на токарном станке, надо знать скорость, с которой движутся относительно резца точки обрабатываемой поверхности. Скорость точки вращающегося тела называют *линейной скоростью*, чтобы отличать ее от угловой скорости всего тела.

Легко видеть, что линейная скорость точки тем больше, чем больше угловая скорость тела и чем дальше от оси находится точка. Выведем формулу, выражающую связь линейной скорости точки с угловой скоростью тела. При равномерном вращении (§ 97)

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Обозначив расстояние точки от оси буквой R и приняв во внимание, что за один период точка опишет окружность радиусом R , можем написать:

$$v = \frac{2\pi R}{T}.$$

Отсюда

$$v = \omega R,$$

т. е. линейная скорость точки равна угловой скорости тела, умноженной на расстояние точки от оси.

Так как

$$\omega = 2\pi n,$$

то

$$v = 2\pi Rn.$$

У п р а ж н е н и я

131. Найдите окружную (линейную) скорость маховика диаметром 2000 мм, делающего 120 об/мин.

132. Определите скорость передаточного ремня, если диаметр ведущего шкива 400 мм и шкив вращается со скоростью 120 об/мин.

133. Можно ли надеть на вал, делающий 2000 об/мин, циркулярную пилу диаметром 500 мм, если по требованию техники безопасности окружная скорость пилы не должна превышать 40 м/сек?

134. На токарном станке обрабатывается вал диаметром 60 мм. Сколько оборотов в минуту должен совершать вал, чтобы скорость резания была 30 м/мин?

135. Период обращения первого искусственного спутника Земли составлял в первые дни полета 96 мин. Средняя высота спутника над Землей 900 км, радиус Земли 6300 км. Найдите линейную скорость спутника.

§ 99. Центробежное ускорение. При прямолинейном движении скорость меняется только по величине, а направление ее остается неизменным. Прирост скорости за некоторый отрезок времени имеет то же направление, что и скорость (рис. 145).

При криволинейном движении скорость непрерывно меняется по направлению и, кроме того, может изменяться и величина скорости. В этом случае направление прироста скорости уже не совпадает с направлением скорости. На рис.

146, *a* показан случай, когда скорость точки в течение некоторого отрезка времени изменила направление и увеличилась. Пример такого изменения скорости дает движение камня, брошенного горизонтально. Притяжение Земли непрерывно увеличивает скорость камня и вместе с тем меняет ее направление.

На рис. 146, *б* показан случай, когда скорость точки в течение некоторого отрезка времени изменила свое направление и уменьшилась. Пример такого изменения скорости мы имеем в случае камня, брошенного вверх под углом к горизонту. Так как камень движется вверх, то притяжение Земли непрерывно уменьшает его скорость.

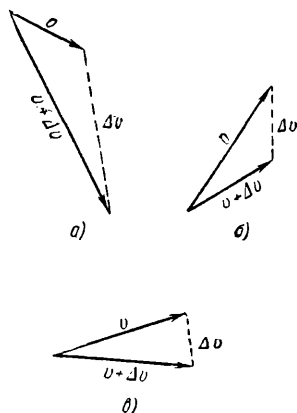


Рис. 146. При криволинейном движении скорость v и изменение скорости Δv имеют разное направление.

a) Скорость изменяет направление и увеличивается; *б*) скорость изменяет направление и уменьшается; *в*) скорость изменяет направление, но не величину.

Если тело вращается с угловой скоростью ω , то за отрезок времени Δt оно повернется на угол $\omega \Delta t$. На такой же угол повернется за тот же отрезок времени и вектор скорости точки (рис. 147). Изменение скорости Δv можно принять равным дуге, описанной концом вектора. Тогда найдем:

$$\Delta v = v\omega \Delta t.$$



Рис. 145. При прямолинейном движении скорость v и прирост ее Δv направлены одинаково.

Наконец, на рис. 146, *в* показан случай, когда скорость изменила свое направление, но не величину. Такое изменение скорости имеет место при движении любой точки равномерно вращающегося тела.

Рассмотрим последний случай более подробно. Пусть отрезок времени, в течение которого происходит изменение скорости, очень мал. В таком случае мал и угол, на который повернется вектор скорости, а угол между скоростью v и приростом скорости Δv является почти прямым (рис. 147). Так как при движении по окружности скорость направлена перпендикулярно к радиусу (§ 27), то можно принять, что изменение скорости Δv направлено вдоль по радиусу к центру окружности, по которой движется точка (рис. 148).

Вспомним теперь, что ускорение есть отношение изменения скорости к отрезку времени, в течение которого этот прирост произошел. Это относится также и к криволинейному движению. При равномерном вращении ускорение точки, так же как и изменение скорости, направлено к центру окружности, по которой движется точка. Поэтому ускорение точек равномерно вращающегося тела называют **центростремительным ускорением**.

Итак, если точка движется по окружности, причем скорость ее не меняется

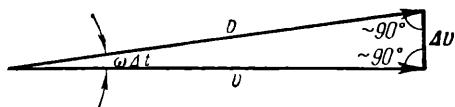


Рис. 147. При равномерном вращении прирост скорости Δv за малый отрезок времени можно считать перпендикулярным к скорости v .

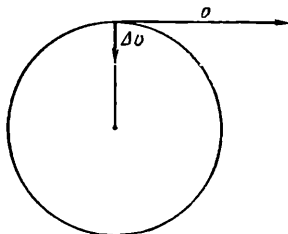


Рис. 148. При равномерном вращении прирост скорости точки за малый отрезок времени Δv можно считать направленным к центру окружности, по которой движется точка.

по величине, то она движется с ускорением, направленным к центру окружности (центростремительное ускорение).

Обозначим центростремительное ускорение через a с индексом «ц» ($a_{ц}$). Оно равно

$$a_{ц} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v\omega\Delta t}{\Delta t} = v\omega.$$

Далее, пользуясь соотношением между линейной и угловой скоростями (§ 98)

$$v = \omega R,$$

можем написать:

$$a_{ц} = \omega^2 R$$

и

$$a_{ц} = \frac{v^2}{R}.$$

Это — формулы для расчета центростремительного ускорения. Первую из них удобно применять тогда, когда известна частота оборотов тела и расстояние рассматриваемой точки от оси. Например, шкив диаметром 12 см делает 300 об/мин; с каким ускорением движутся точки ремня, ведущего шкив, когда они

находятся в положении M (рис. 149)? В данном примере

$$n = 300 \frac{\text{об}}{\text{мин}} = 5 \frac{\text{об}}{\text{сек}},$$

$$R = \frac{12}{2} \text{ см} = 6 \text{ см}.$$

Сперва найдем угловую скорость:

$$\omega = 2\pi n = 2 \cdot 3,14 \cdot 5 \frac{\text{рад}}{\text{сек}} = 31,4 \frac{\text{рад}}{\text{сек}}.$$

Теперь найдем центростремительное ускорение:

$$a_{\text{ц}} = \omega^2 R = (31,4)^2 \frac{1}{\text{сек}^2} \cdot 6 \text{ см} \approx 6000 \frac{\text{см}}{\text{сек}^2}.$$

Как видно, ускорение в данном случае довольно велико. Оно приблизительно в шесть раз больше ускорения g .

Формулу

$$a_{\text{ц}} = \frac{v^2}{R}$$

удобно применять тогда, когда известна скорость точки, движущейся по окружности, и известен радиус этой окружности. Например, велосипедист движется по закруглению в виде дуги окружности радиусом 10 м со скоростью 7,2 км/час, причем скорость меняется только по направлению; найти центростремительное ускорение (речь идет о той точке тела велосипедиста, к которой относятся указанные числа). В данном примере

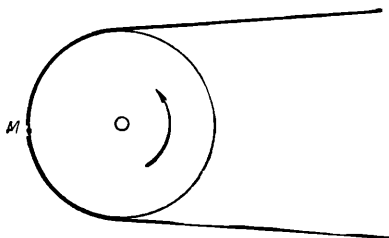


Рис. 149. Точка M ремня, ведущего шкив, движется по дуге окружности.

$$v = 7,2 \frac{\text{км}}{\text{час}} = 2 \frac{\text{м}}{\text{сек}},$$

$$R = 10 \text{ м},$$

$$a_{\text{ц}} = 2^2 \frac{\text{м}^2}{\text{сек}^2} \cdot \frac{1}{10 \text{ м}} = 0,4 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}.$$

У п р а ж н е н и я

136. С каким центростремительным ускорением идет по закругленному пути поезд, если скорость его 36 км/час, а радиус кривизны закругления 200 м?

137. С каким ускорением движется точка на ободу равномерно вращающегося шкива диаметром 200 мм при 120 об/мин?

§ 100. **Центростремительная сила.** Мы видели, что движение тел по окружности с постоянной угловой скоростью есть движение с ускорением, направленным к центру окружности. Но если тело

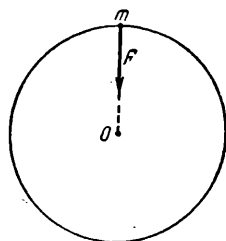


Рис. 150. На точку m , движущуюся по окружности с постоянной угловой скоростью, действует сила F , направленная к центру окружности.

движется с ускорением, направленным к центру, значит, на него действует сила, тоже направленная к центру (рис. 150). Наличие такой силы наглядно видно на примере движения камня, привязанного к шнурку (рис. 151). При движении камня шнурок натянут по направлению к центру окружности. Сила натяжения шнурка и является причиной, обуславливающей равномерное движение камня по окружности. Если же шнурок оборвется, то эта сила исчезнет и камень полетит по прямой линии — по касательной.

Подобно этому и во всех других случаях движения по окружности существует сила, направленная к центру. Рассмотрим, например, вращение маховика. Части маховика, стремясь по закону инерции сохранить направление своего движения, несколько удаляются от оси вращения, и маховик немного увеличивается в диаметре (деформируется).

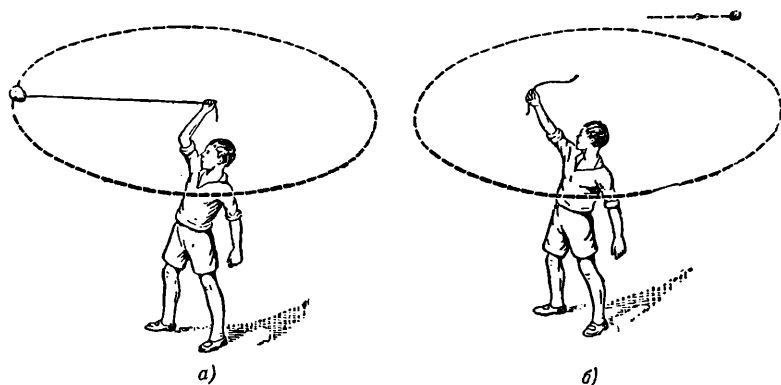


Рис. 151. а) Натяжение шнурка заставляет камень двигаться по окружности; б) шнурок оборвался, и камень летит по касательной к окружности.

При этом возникают упругие силы, стремящиеся уменьшить диаметр маховика. Эти упругие силы и являются силами, которые заставляют части маховика двигаться по окружностям.

Подобно вращающемуся маховику деформируются вообще все вращающиеся тела. Это легко наблюдать, если вращать тело, состоящее из стальных обручей (рис. 152).

Итак, движение тел с постоянной угловой скоростью по окружности происходит при наличии силы, направленной к центру окружности. Эта сила называется **центростремительной**.

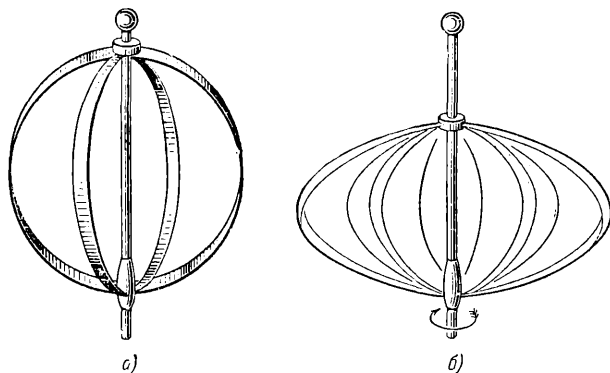


Рис. 152. Обручи, насаженные на ось (а); при быстром вращении обручи сплющиваются (б).

Отметим, что это название в отличие от названий «упругая сила», «электрическая сила» и т. п. указывает не происхождение силы, а только результат действия силы. Центростремительной может быть упругая сила, сила трения, электрическая сила и любая другая сила.

§ 101. Взаимодействие тел, движущихся по окружности. Приступая к изучению динамики, мы отметили, что движения тел в природе взаимосвязаны и что изменению движения любого тела всегда соответствует изменение движения другого тела. Это относится, очевидно, и к случаю движения тела по окружности. Как же движется то тело, взаимодействие с которым заставляет некоторое тело двигаться по окружности?

Рассмотрим такой опыт. К крючку D (рис. 153, а), который можно быстро вращать, прикреплена проволочка H . На этой проволочке подвешен шарик с двумя крючками K . К нижнему крючку шарика за нити прикреплены два одинаковых грузика A и B . Начнем вращать крючок D , постепенно увеличивая его угловую скорость; вслед за ним придут во вращение проволочка H , шарик K и грузики A и B . Последние будут двигаться по окружностям, центры которых совпадают с осью вращения крючка D и шарика K . Поскольку проволочка H остается вертикальной, горизонтальные составляющие натяжения нитей равны друг другу. Это значит, далее, что на грузики A и B действуют равные силы, направленные к общему центру окружностей, по которым движутся грузики

(рис. 153, б); это — центростремительные силы, обуславливающие движение грузиков по окружности. Обнаруживаемое на опыте равенство этих сил есть новое подтверждение третьего закона

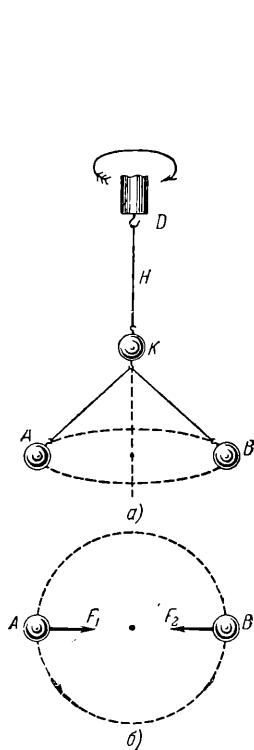


Рис. 153. а) При вращении крючка D грузики A и B движутся по concentрическим окружностям одинаковых радиусов; б) на грузики A и B действуют центростремительные силы F_1 и F_2 , равные по величине и противоположные по направлению.

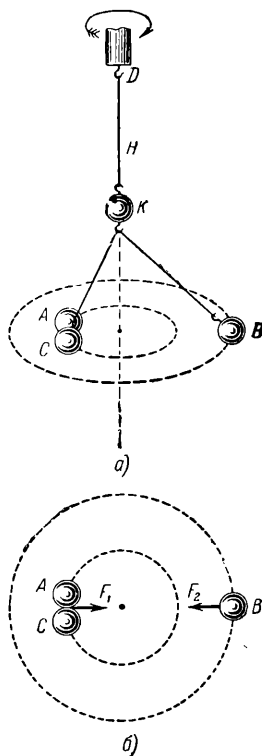


Рис. 154. а) К грузику A присоединен грузик C . Грузики A и C , скрепленные вместе, и грузик B движутся по concentрическим окружностям разных радиусов; б) действующие на грузики центростремительные силы F_1 и F_2 снова равны по величине и противоположны по направлению.

Ньютона. Повторим опыт, привязав к грузику A еще один грузик C (рис. 154). При вращении крючка D проволока H по-прежнему будет вращаться, сохраняя вертикальное направление; грузики снова будут двигаться по окружностям, общий центр которых находится на оси вращения крючка D ; но радиусы окружностей окажутся разными: B будет двигаться по окружности большего

радиуса, чем связанные вместе грузики *A* и *C*, общая масса которых больше массы *B*. Так же как и в предыдущем случае, мы заключаем, что на грузики действуют равные центростремительные силы.

Итак, если одно из взаимодействующих тел движется по окружности, то второе из взаимодействующих тел тоже движется по окружности, причем центры этих окружностей совпадают. Это можно проследить также в случаях, показанных на рис. 151 и 152. Действительно, движению по окружности любой точки одной половины обруча (рис. 152) соответствует движение некоторой другой точки на другой половине обруча. Движению камня по окружности соответствует движение по окружности руки, держащей конец веревки (рис. 155).

Если масса одного из взаимодействующих тел во много раз больше массы другого, то при движении меньшего тела по окружности большее тело описывает окружность иногда столь малого радиуса, что кажется неподвижным.

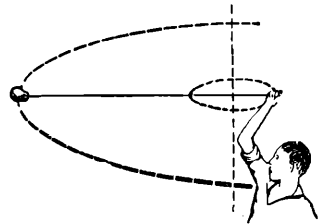


Рис. 155. Уточнение рис. 151. Камень и рука движутся по концентрическим окружностям большого (камень) и малого (рука) радиусов.

Упражнения

138. Если в приборе, показанном на рис. 156, шарики установлены так, что при вращении скобы ни один из них не перетягивает, то машина, вращающая скобу, не сообщает столу, на котором она стоит, никаких толчков. Если же один из шариков перетягивает, машина начинает «бить». Объясните это явление.

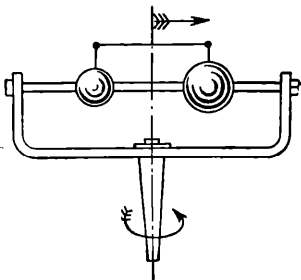


Рис. 156.

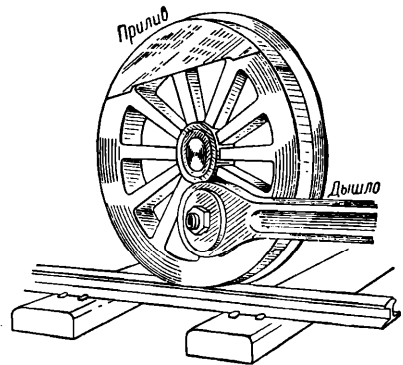


Рис. 157.

139. На рис. 157 изображены ведущие колеса паровоза. Видны приливы, которые сделаны против мест крепления дышла. Зачем они нужны?

§ 102. **Формула центростремительной силы.** Легко видеть, что величина центростремительной силы в разных случаях различна. От чего она зависит?

Привяжем к резинке маленький грузик и, взяв другой конец резинки рукой, будем вращать грузик. При движении грузика по окружности резинка растянется. В данном случае роль центростремительной силы, заставляющей грузик двигаться по окружности, играет сила упругости, возникающая при растяжении резинки. Изменяя скорость вращения, мы увидим, что при увеличении ее резинка растягивается больше, т. е. сила упругости возрастает. Итак, чем больше скорость вращения, тем больше центростремительная сила.

Зависит ли центростремительная сила от массы тела, движущегося по окружности? Будем вращать скобу со стержнем, по которому могут скользить два шарика разной массы, соединенные шнурком. Если шарики находятся на одинаковых расстояниях от оси вращения, то шарик с большей массой перетянет (рис. 156). Это значит, что натяжение шнурка, играющее роль центростремительной силы, для большего шарика недостаточно, а для меньшего слишком велико.

Однако можно расположить шарики так, что ни один из них при вращении не перетянет. Для этого шарик с большей массой надо расположить ближе к оси, а именно так, чтобы расстояния центров шариков от оси были обратно пропорциональны их массам. Это показывает, что центростремительная сила тем больше, чем больше расстояние тела от оси.

Итак, центростремительная сила тем больше, чем больше масса тела, его расстояние от оси и скорость вращения.

Выведем формулу для расчета центростремительной силы $F_{ц}$. По второму закону Ньютона

$$F_{ц} = ma_{ц},$$

где $a_{ц}$ — центростремительное ускорение. Как было показано в § 99,

$$a_{ц} = \omega^2 R.$$

Так как

$$\omega = 2\pi n,$$

то

$$a_{ц} = 4\pi^2 n^2 R.$$

Отсюда

$$F_{ц} = m\omega^2 R = 4\pi^2 mn^2 R.$$

Как видно, центростремительная сила пропорциональна *квадрату* частоты оборотов. Увеличение частоты оборотов связано со значительным ростом центростремительной силы, а следовательно, и со значительным увеличением деформации вращающегося тела. Слиш-

ком большая частота оборотов опасна: деформация вращающегося тела может достигнуть предела, и оно разорвется на части, разлетающиеся с большими скоростями.

В § 99 было дано также соотношение

$$a_{ц} = \frac{v^2}{R},$$

откуда получается еще одна формула для центростремительной силы:

$$F_{ц} = \frac{mv^2}{R}.$$

Этой формулой удобно пользоваться, когда расчет относится к телу, движущемуся с некоторой скоростью v по траектории в виде дуги окружности.

Полученное нами выражение для центростремительной силы позволяет найти соотношение между радиусами окружностей, по которым движутся два взаимодействующих тела (точнее, центры тяжести этих тел, см. § 101). Тело с большей массой движется по окружности меньшего радиуса. Формула

$$F = 4\pi^2 mn^2 R$$

подтверждает это. Поскольку частота оборотов n одинакова для обоих тел, а центростремительные силы согласно третьему закону Ньютона равны, величины m и R обратно пропорциональны друг другу. Действительно, обозначив массы тел m_1 и m_2 , а радиусы окружностей R_1 и R_2 , имеем:

$$4\pi^2 m_1 n^2 R_1 = -4\pi^2 m_2 n^2 R_2,$$

откуда

$$\frac{m_1}{m_2} = -\frac{R_2}{R_1}.$$

Знак минус означает, что направления R_1 и R_2 противоположны. В опыте, показанном на рис. 154, радиус окружности, по которой движется центр тяжести грузика B , в два раза больше радиуса окружности, по которой движется центр тяжести системы грузиков A и C .

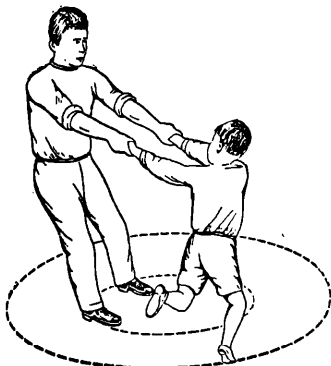


Рис. 158.

Упражнения

140. Каков радиус окружности, по которой движется центр тяжести большого мальчика (рис. 158), если центр тяжести маленького мальчика движется по окружности радиуса 80 см, а массы мальчиков 60 кг и 24 кг?

141. Камень массой 100 г привязан на шнуре и движется в горизонтальной плоскости по окружности радиусом 1 м, делая 1 об/сек. Определите центростремительную силу.

142. Автомобиль, масса которого равна 1,8 т, едет по закруглению шоссе

со скоростью 10 м/сек. Радиус закругления равен 150 м. Определите центростремительную силу. Каково происхождение этой силы?

143. На патефонную пластинку на расстоянии 10 см от оси вращения положена пробка массой 0,5 г. Сила трения пробки о пластинку равна 0,15 Г. При какой частоте оборотов пробка слетит с пластинки?

144. На нити длиной 50 см, выдерживающей нагрузку до 1 кг, привязан шарик весом 20 Г. При каком числе оборотов в секунду шарик разорвет нить?

§ 103. Центробежная сила. В технике широко распространен также термин «центробежная сила». Центробежной силой называется сила, с которой вращающиеся тела растягивают связь, удерживающую их на круговых орбитах.

Так, если вращать рукой в горизонтальной плоскости привязанный на веревке камень, то силы, действующие на камень и вращающие по меньшей окружности руку, будут центростремительными силами, а равные им численно силы, растягивающие веревку, будут центробежными силами.

С центробежной силой приходится считаться на практике. Центробежная сила приложена к связи и может разрушить связь.

Веревка может разорваться, маховые колеса, циркулярные пилы, точильные камни могут разлететься на куски под действием центробежной силы.

У п р а ж н е н и е

145. Мост, прогибаясь под тяжестью паровоза весом 235 Т, образует дугу радиусом 10 000 м. Определите силу давления паровоза на середину моста при скорости движения 72 км/час.

§ 104. Центробежные механизмы. Мы уже знаем (§ 36), что при отсутствии сил все тела сохраняют величину и направление скорости. Поэтому в случае отсутствия или недостаточной величины центростремительной силы тело, сохраняя скорость, удаляется от оси, около которой оно вращалось бы, если бы центростремительная сила имела нужную величину. Такое направленное от центра окружности движение называют центробежным. В технике широко употребляются механизмы, в которых используется центробежное движение.

На рис. 159 показан центробежный тахометр. Тахометрами называются приборы для измерения угловой скорости вращения валов в машинах. На рисунке видны два груза А, которые при вращении прибора вокруг оси ОО, стремясь сохранить направление скорости своего движения, отходят от оси, растягивая при этом пружинки Р. Это продолжается до тех пор, пока упругая сила растягиваемых пружин не станет достаточной, чтобы создать

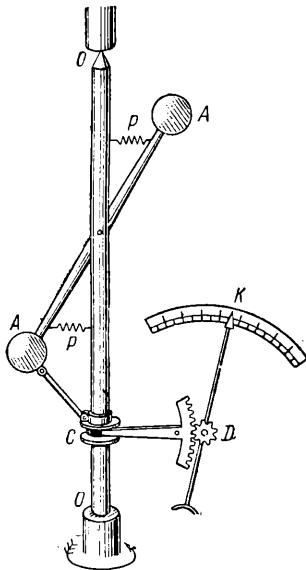


Рис. 159 Схема устройства центробежного тахометра.

нужное центробежное ускорение. После этого отход грузов A от оси прекратится, и грузы будут двигаться по окружностям. Чем больше скорость вращения тахометра, тем большей должна быть упругая сила, создающая центробежное ускорение, соответствующее этой скорости, а потому тем больше растянутся пружинки P и тем дальше отойдут от оси грузы A . Рычажок C , связанный с грузами A , приводит в движение стрелку D , которая показывает на шкале K скорость вращения вала.

Рассмотрим еще центробежный насос (рис. 160). В нем используется центробежное движение жидкости, которая находится во вращающемся барабане. Жидкость, находящаяся вблизи стенок, все время оттекает в трубу, поэтому давление ее вблизи стенок недостаточно велико, центробежная сила оказывается недостаточной, и все новые порции воды отдаляются от оси вращения. Если же трубу перекрыть, давление жидкости вблизи стенок барабана повысится, появятся необходимые для движения частиц жидкости по окружностям центробежные силы и отток жидкости от оси к стенкам прекратится.

Важно понять, что центробежное движение происходит не в результате действия каких-либо особых сил, а, наоборот, потому, что недостаточны или отсутствуют силы, обеспечивающие центробежное ускорение. Как только появляются достаточные центробежные силы, удаление частей вращающегося механизма от оси прекращается.

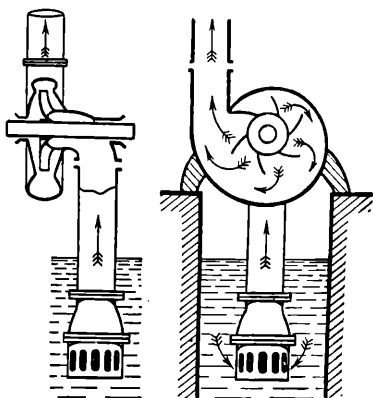


Рис. 160. Схема устройства центробежного насоса.

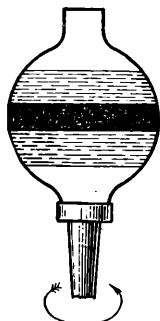


Рис. 161.

Упражнения

146. При вращении круглого сосуда, в который налиты вода и ртуть, они располагаются, как показано на рис. 161. Объясните это явление.

147. Для быстрого отделения сливок от молока используются сепараторы. Основную часть сепаратора представляет прочный металлический барабан, который вместе с непрерывно поступающим внутрь молоком приводится в чрезвычайно быстрое вращение (до 250 об/сек). Кроме отверстия для втекания молока, в барабане имеются два отверстия: одно из них сообщается с пространством вдали от оси, другое —

вблизи оси. Какое из них служит для вытекания сливок и какое — для снятого молока?

Г Л А В А VIII

ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ

§ 105. Движение планет. Древние астрономы считали, что Земля является неподвижным центром вселенной, а вокруг нее движутся небесные тела. На самом близком расстоянии от Земли движется Луна, далее — Меркурий и Венера, затем — Солнце, Марс, Юпитер, Сатурн, и дальше всего находится «сфера неподвижных звезд». Эта система была развита греческим астрономом Птолемеем, а потому называется с и с т е м о й П т о л е м е я. В течение многих веков такое представление о вселенной владело умами людей. Лишь в начале XVI в. польский астроном Коперник высказал идею, что Земля и другие планеты обращаются по окружностям вокруг Солнца. Эта идея, по выражению Энгельса, была «вызовом церковному авторитету в вопросах природы». Церковь встретила учение Коперника крайне враждебно. Всякий, кто склонялся к новому учению о строении мира, подвергался жестоким преследованиям со стороны церкви. В 1600 г. был сожжен на костре смелый итальянский мыслитель Джордано Бруно, который отказался отречься от своих научных убеждений. Немало преследований вынес Галилей, который своими работами нанес системе Птолемея смертельный удар. Однако новые идеи все же победили, и церкви не осталось ничего иного, как признать правоту Коперника. В дальнейшем в трудах немецкого астронома Кеплера законы движения планет вокруг Солнца были исследованы более точно.

Итак, солнечная система состоит из Солнца, вокруг которого движутся Земля и остальные планеты. Траектории планет (их называют о р б и т а м и) по форме весьма близки к окружностям. Порядок расположения орбит планет и их относительные размеры показаны на рис. 162. У некоторых планет есть спутники, движущиеся вокруг них тоже по окружностям. У Земли только один природный спутник — Луна.

Вспомним опыт, показанный на рис. 154: грузики движутся по концентрическим окружностям, причем центр этих окружностей находится ближе к грузику с большей массой. Подобное положение имеет место и в случае движения небесных тел. При движении Земли Солнце тоже движется и притом так, что оба тела описывают

окружности около некоторой точки, лежащей между ними. Эта точка лежит очень близко к центру Солнца, так как масса Солнца во много раз больше массы Земли. Поэтому можно считать, что Земля и другие планеты движутся вокруг Солнца.

Какая же сила обуславливает движение планет по окружностям? Этот вопрос оставался без ответа, пока Ньютон не установил, что небесные тела притягиваются друг к другу, подобно тому как притягиваются к Земле все тела на ее поверхности.

Это притяжение было названо **в с е м и р н ы м т я г о т е н и е м**. Сила тяготения и является центростремительной силой, обуславливающей движение планет вокруг Солнца или Луны вокруг Земли.



§ 106. Закон всемирного тяготения.

Основываясь на открытых им законах механики, Ньютон выяснил, от чего зависит сила взаимного тяготения. Оказалось, что тяготение пропорционально массам тел и обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. Если, например, расстояние между телами увеличится в три раза, то сила тяготения уменьшится в $3^2 = 9$ раз.

Обозначив массы притягивающихся тел через m_1 и m_2 , расстояние между ними через r и силу их взаимодействия через F , можно выразить закон всемирного тяготения формулой

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

Здесь γ (греческая буква «гамма») — коэффициент пропорциональности, называемый **г р а в и т а ц и о н н о й п о с т о я н н о й ***). В случае притяжения шаров под r надо подразумевать расстояние между их центрами.

Определить гравитационную постоянную можно различными способами. Английский физик Кэвендиш (XVIII в.) воспользовался для этой цели так называемыми **к р у т и л ь н ы м и**



Рис. 162. Планеты солнечной системы (кроме Урана, Нептуна и Плутона, изображения которых при выбранном масштабе здесь не уменьшаются).

Размеры планет и Солнца показаны значительно большими, чем следует согласно масштабу.

*) Латинское слово «гравитас» значит «тяжесть».

в е с а м и (рис. 163). На очень тонкой нити был подвешен за середину легкий стержень, на концах которого имелись небольшие металлические шарик *АА*. Предварительно было измерено, какие силы надо прилагать, чтобы нить, на которой подвешен стержень, закручивать на определенные углы. Затем к шарикам придвигались два массивных металлических шара *В*. Шарики на стержне, притягиваясь к массивным шарам, поворачивали стержень и закручивали нить подвеса. Зная расстояние между центрами маленького и большого шариков, а также их массы и определив по углу закручивания силу притяжения, можно было определить гравитационную постоянную.

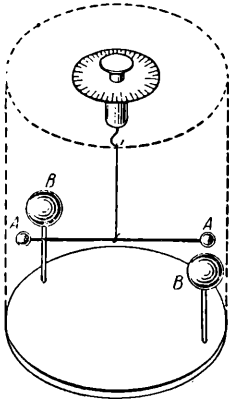


Рис. 163. Схема устройства крутильных весов.

Это значит, что две массы по 1 г, находясь на расстоянии 1 см, притягиваются с очень малой силой в $6,68 \cdot 10^{-8}$ дин. Поэтому притяжение между какими-либо двумя предметами окружающей нас обстановки совершенно незаметно.

Из закона всемирного тяготения следует, что по мере удаления от поверхности Земли притяжение тел Землей уменьшается. Однако при небольших подъемах это уменьшение ничтожно. Например, при подъеме на 100 м уменьшение силы притяжения к Земле составляет около 0,003%.

Если силу выразить в динах, расстояние — в сантиметрах и массы — в граммах, то

$$\gamma = 6,68 \cdot 10^{-8} \frac{\text{дин} \cdot \text{см}^2}{\text{г}^2}.$$

В системе СИ

$$\gamma = 6,68 \cdot 10^{-11} \frac{\text{н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} = 6,68 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}.$$

У п р а ж н е н и я

148. Принимая ускорение падающих тел равным 980 см/сек^2 , а радиус Земли 6400 км, определите массу Земли.

149. Радиус Марса приблизительно вдвое меньше радиуса Земли, а масса Марса в десять раз меньше массы Земли. Сколько весит на Марсе тело, которое на Земле весит 60 кг?

150. С какой силой притягиваются два шарика массами 300 г, центры которых отстоят друг от друга на 1 м?

151. Ракета, несущая искусственный спутник Земли, взлетает при запуске вертикально и только после достижения некоторой высоты постепенно изменяет направление движения на горизонтальное (касательное к орбите). С какой скоростью ракета должна выйти на орбиту, чтобы спутник мог обращаться на высоте 1000 км от Земли? Радиус Земли 6400 км.

§ 107. Зависимость веса от географической широты. Мы уже упоминали (§ 44), что одинаковые по массе тела весят на разных широтах различно; на

полюсах больше, чем на экваторе. Это обстоятельство в основном обусловлено вращением Земли. Вес тел, т. е. сила, с которой тела давят на опору, определяется притяжением тел к Земле, но вес P меньше силы притяжения G . Дело в том, что часть силы притяжения является центробежной силой $F_{ц}$, обуславливающей движение тел по окружности вследствие вращения Земли (рис. 164).

Сила притяжения тел к Земле почти не зависит от широты места. Центробежная же сила заметно различается на высоких и низких широтах. На

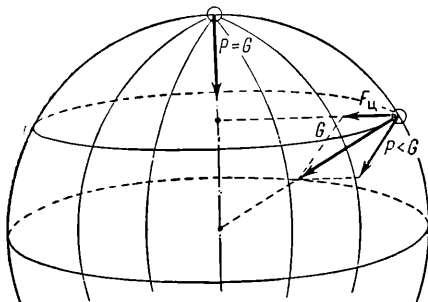


Рис. 164. К вопросу о различии понятий веса и силы тяжести.

экваторе тела находятся дальше от оси вращения Земли, центробежная сила больше и вес тел заметно (около 0,5%) меньше силы притяжения. Вблизи полюсов расстояние до земной оси меньше и центробежная сила тоже меньше. Поэтому вблизи полюсов вес тел почти точно равен силе их притяжения к Земле.

§ 108. Поле тяготения. Когда изогнутый деревянный прут толкает, как это изображено на рис. 47, плавающее в воде полено, то ясно, что взаимодействие прута и полена связано с тем, что и прут и полено при взаимодействии находятся в другом состоянии, чем когда они не взаимодействуют. При взаимодействии и прут и полено деформируются. Точно так же трение между ящиком, который передвигают по полу, и полом связано с тем, что и ящик и пол немного деформированы: и тот и другой несколько «перекосилась».

С чем же связано взаимодействие тел, притягивающихся по закону тяготения Ньютона? Вдумываясь в этот вопрос, мы должны иметь в виду, что все явления в природе взаимосвязаны, а это означает, что притягивающиеся тела чем-то отличаются от тех же тел, когда они не притягиваются совсем или притягиваются более слабо. Чем же отличаются взаимно притягивающиеся тела от таких же тел, удаленных настолько, что сила взаимодействия между ними практически отсутствует?

Ответ на этот вопрос заключается в следующем. Если два тела, например Солнце и Земля, притягиваются, находясь на расстоянии

друг от друга, значит, существует какой-то особый вид материи, окружающей эти тела. Мы называем этот вид материи полем тяготения тел. Мы не видим поля тяготения вокруг тел, но это отнюдь не значит, что его нельзя измерить. Поля тяготения окружают Солнце, Землю, Луну, любое тело вокруг нас и нас самих. Когда в каком-либо месте одновременно существуют два поля, т. е. происходит наложение полей тяготений двух тел, то возникают силы тяготения. Из того факта, что сила тяготения убывает при увеличении расстояния между телами, следует, что вблизи тел их поле тяготения сильнее, чем вдали от них. Поскольку сила взаимодействия тел пропорциональна их массам, то поле тяготения большой массы сильнее, чем малой массы. Итак, *всемирное тяготение тел есть следствие существования вокруг них полей тяготения.*

Мы живем на поверхности Земли и, следовательно, всегда находимся в ее поле тяготения. Мы также находимся в полях тяготения любых тел вблизи нас. Но эти поля настолько слабы по сравнению с полем тяготения Земли, что мы не замечаем их. Никто никогда не чувствовал, что, например, находящийся рядом шкаф притягивает его, и только очень чувствительные приборы могут обнаружить поле тяготения шкафа. Но поле тяготения Земли всегда напоминает нам о своем существовании, удерживая вблизи поверхности Земли все находящиеся на ней тела, и в том числе атмосферу. Именно большая величина поля тяготения Земли является основной трудностью при запусках искусственных спутников и космических ракет. Будь масса Земли меньше, например, если бы она была равна массе планеты Марс, потребовалась бы значительно меньшая скорость спутника.

Чтобы охарактеризовать поле тяготения, пользуются понятием *напряженности*. *Напряженностью поля тяготения называется отношение силы, действующей на тело, помещенное в поле тяготения, к массе этого тела.* Легко видеть, что напряженность поля тяготения Земли совпадает с ускорением свободно падающих тел g .

§ 109. Искусственные спутники Земли. Космические полеты. Мы знаем, что тело, брошенное горизонтально с некоторой высоты движется по параболе и падает на Землю тем дальше, чем больше скорость бросания. При некоторой большой скорости тело вообще может не упасть на Землю, а будет описывать круговые траектории, оставаясь на одной и той же высоте над Землей (рис. 165). Это случится тогда, когда ускорение, сообщаемое телу силой тяжести, будет равно центростремительному ускорению, необходимому для удержания тела при данной его скорости на круговой орбите, или, иначе говоря, когда сила притяжения тела Землей будет являться центростремительной силой.

Обозначая массу тела m , массу Земли M , расстояние тела от центра Земли r , мы можем написать

$$\frac{mv^2}{r} = \gamma \frac{mM}{r^2},$$

центробежная сила сила притяжения к Земле

откуда

$$v = \sqrt{\gamma \frac{M}{r}},$$

$M = 6,10^{24}$ кг, r примем равным 6700 км. (Радиус Земли 6370 км плюс 330 км — высота космического корабля над Землей.)

Произведя вычисления, получим

$$v = \sqrt{\frac{6,68 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^{24}}{6700 \cdot 10^3}} \approx 7,8 \frac{\text{км}}{\text{сек}}.$$

При запуске спутника непосредственно у поверхности Земли (если бы не было атмосферы, необходимая начальная скорость была бы 8 км/сек).

Эта скорость называется первой космической скоростью. Для запуска спутников и космических кораблей применяются ракеты. Запускается ракета обычно вертикально и затем по заданной программе поворачивается на соответствующей высоте под соответствующим углом к вертикали. После выключения двигателя ракета движется свободно, обычно по эллиптической траектории. Чем точнее произведен запуск, тем ближе траектория к круговой.

Период обращения (время требуемое на один оборот вокруг Земли) вычисляется по формуле

$$T = \frac{2\pi r}{v}.$$

Например, для приведенного выше случая $T = 91$ мин.

Чем больше скорость ракеты по сравнению с вычисленной по вышеприведенной формуле, тем более вытянутой получается эллиптическая орбита спутника. При некотором значении скорости космический корабль преодолевает притяжение к Земле. Эта скорость называется второй космической скоростью.

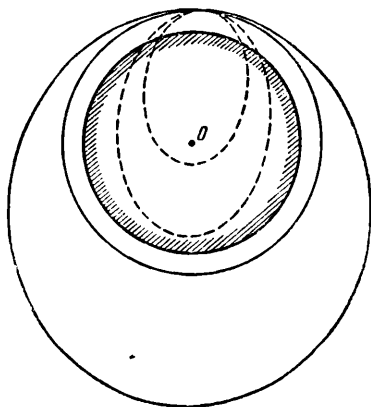


Рис. 165. Траектории тел, брошенных горизонтально с различной скоростью.

Вычисления показали, что она равна $11,2$ км/сек. Именно с такой скоростью или несколько большей отправлялись космические ракеты, ушедшие из плена Земли и превратившиеся в спутников Солнца.

Полет на Луну и на другие планеты солнечной системы является задачей недалекого будущего. В более далеком будущем возможно будет вывести ракету и из сферы притяжения к Солнцу и направить ее полет к другим звездным мирам. Для этого потребуется скорость уже в $16,7$ км/сек (третья космическая скорость).

§ 110. Границы применимости законов классической механики. Законы Ньютона, представляющие обобщение многовекового человеческого опыта, легли в основу так называемой классической механики. Бесспорная правильность этих законов, казалось, подтверждалась практикой жизни во всех применениях механики, научных и технических. По законам классической механики можно было создавать сложные машины и механизмы, по законам механики Ньютона можно было рассчитывать движение планет. Понятия классической механики совпадали с нашими привычными понятиями об явлениях окружающего мира.

Однако дальнейшее развитие науки показало, что понятия классической механики являются приближенными, обладающими ограниченной областью применимости. При высоких скоростях движения тел (сотни тысяч км/сек), т. е. при скоростях, близких к скорости света $c = 300\,000$ км/сек, необходимо использовать понятия разработанной Эйнштейном теории относительности.

При изучении тел малой массы, например атомов и их составных частей, необходимо использовать понятия так называемой квантовой теории. В последних главах учебника мы познакомимся с некоторыми из понятий квантовой теории и теории относительности.

Классическая механика есть механика макромира и медленных движений, новая механика есть механика микромира и больших скоростей. Новейшая техника с ее рекордами космических полетов, использованием ядерной энергии, изумительной точностью и быстротой вычислений электронносчетных устройств проникает в нашу жизнь. Эта новейшая техника тесно связана с использованием новой механики. Но новая механика не зачеркивает старой классической механики, она только указывает границы ее применимости.

Г Л А В А IX

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

§ 111. **Колебательное движение.** Проследим за движением маятника часов. Он движется, отклоняясь от среднего положения то в одну, то в другую сторону (рис. 166). Дойдя до крайнего положения, маятник ускоренно движется обратно, по инерции проходит через среднее положение, замедленно движется к другому крайнему положению, откуда снова ускоренно возвращается к среднему положению, и т. д.

Движение, при котором точка через равные промежутки времени проходит через некоторое среднее положение, называется **колебательным движением**, или просто **колебанием точки**.

Колебательное движение очень распространено в природе. Движение качелей, вибрация станков, дрожание струн в музыкальных инструментах, качание чашек весов — все это примеры колебаний.

Отрезок времени, в течение которого тело совершает одно колебание (например, выходит из крайнего левого положения и вновь к нему возвращается), называется **периодом колебания**.

Число колебаний в единицу времени называется **частотой колебаний**. Единицей частоты служит **герц (гц)** — одно колебание в секунду.

Очевидно, что период и частота являются взаимно обратными величинами. Обозначив период T , а частоту f , имеем:

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

Число, показывающее, какая часть периода прошла от начала колебания, называется **фазой колебаний**. Если фазы двух колебаний не отличаются друг от друга, то говорят, что колебания происходят в одной фазе (рис. 167, а).

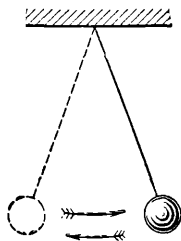


Рис. 166. Колебания маятника.

Если фазы двух колебаний отличаются на $\frac{1}{2}$ периода, то говорят, что колебания происходят в противоположных фазах (рис. 167, б).

Расстояние от среднего положения колеблющейся точки до крайнего называется **амплитудой колебания**. Обычно

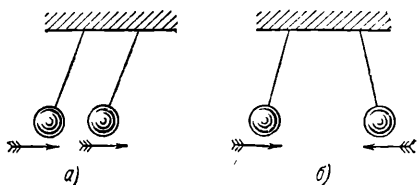


Рис. 167. Крайние положения двух маятников: а) фазы колебаний одинаковы; б) фазы колебаний противоположны.

амплитуда колебаний с течением времени убывает. Такие колебания называются **затухающими**. Если же амплитуда колебаний остается неизменной, то колебания называются **незатухающими**.

У п р а ж н е н и я

152. Частота колебания равна 100 *гц*. Каков период колебания?

153. Период колебания равен 0,2 *сек*. Какова частота колебания?

154. Какой путь пройдет точка колеблющейся струны за 1 период, если ее амплитуда равна 0,5 *мм*? Какой путь пройдет эта точка за 1 *сек*, если частота равна 300 *гц*?

§ 112. Запись колебаний. Колебательное движение удобно исследовать, записывая его график в виде волнистой кривой линии, показывающей, как с течением времени меняется смещение колеблющейся точки из положения, соответствующего покою (график колебаний). Запись колебаний можно сделать разными способами. Рассмотрим простейший прием, которым можно, например, произвести запись колебаний камертона.



Рис. 168. Запись колебаний камертона.

Прикрепим к камертону тонкую щетинку. Ударив по камертону и возбуждав этим его колебания, быстро проведем щетинкой по закопченной стеклянной пластинке. Щетинка вычертит волнистую линию (рис. 168) — синусоиду. Если скорость, с которой двигалась пластинка, известна, то по числу изгибов графика можно судить о частоте и о периоде колебания.

Прикрепим к камертону тонкую щетинку. Ударив по камертону и возбуждав этим его колебания, быстро проведем щетинкой по закопченной стеклянной пластинке. Щетинка вычертит волнистую линию (рис. 168) — синусоиду. Если скорость, с которой двигалась пластинка, известна, то по числу изгибов графика можно судить о частоте и о периоде колебания.

§ 113. Возвращающая сила. Всякое ли тело будет колебаться, если его толкнуть? Нет. Толкнем шарик на горизонтальном полу: он просто покатится в сторону. Если же толкнуть шарик, лежащий на дне круглой чашки, то он начнет двигаться взад и вперед, т. е. колебаться.

С чем связано это различие? В случае горизонтальной плоскости нет никакой причины, которая заставляла бы шарик возвращаться назад. В случае же круглой чашки на шарик, отклоненный от среднего положения, действует сила F , направленная в сторону его среднего положения. Эта сила является равнодействующей силы тяжести P и упругой силы Q , возникающей при прогибе чашки, когда по ее стенкам катается шарик (рис. 114). Легко видеть, что когда шарик перекатится на другую сторону чашки, сила F изменит свое направление и снова будет действовать в сторону среднего положения шарика.

Из этого примера ясно, что колебания возможны только в тех случаях, когда при смещении тела из положения равновесия возникает сила, направление которой противоположно смещению (в о з в р а щ а ю щ а я с и л а).

Но и при наличии возвращающей силы смещение тела не всегда вызовет колебания. Если шарик лежит на дне круглой чашки, наполненной глицерином, то, выведя шарик из равновесия, мы не получим колебаний; шарик медленно вернется в положение равновесия и остановится. Отсюда ясно, что колебания невозможны, если трение слишком велико.

§ 114. Гармоническое колебание. Возвращающая сила, очевидно, зависит от смещения. Чем больше отклонено тело от положения равновесия, тем, вообще говоря, больше и возвращающая сила. Однако зависимость возвращающей силы от смещения может быть разной. Наиболее простым и вместе с тем наиболее важным случаем является тот, когда возвращающая сила пропорциональна смещению. Например, если смещение увеличится в два раза, то и возвращающая сила увеличится в два раза. Колебания, которые получаются при возвращающей силе, пропорциональной смещению, если трение невелико и им можно пренебречь, называются простыми, или гармоническими, колебаниями.

Рассмотрим гармонические колебания более подробно. Прежде всего, отметим, что согласно второму закону Ньютона при гармоническом колебании ускорение колеблющейся точки пропорционально смещению, а по направлению противоположно ему. Оно наиболее велико, когда точка достигает крайних положений (смещение наиболее велико), и равно нулю, когда колеблющаяся точка проходит через среднее положение (смещение равно нулю). Отсюда видно, что колебательное движение вблизи среднего положения

точки наиболее близко к равномерному, а вблизи крайних положений сильно отличается от равномерного движения.

Что касается скорости, то она, наоборот, в крайних положениях равна нулю. При движении к среднему положению скорость под действием возвращающей силы возрастает и в среднем положении достигает наибольшего значения. Затем, когда среднее положение пройдено, скорость убывает и обращается в нуль в крайнем положении.

Итак, при гармоническом колебании ускорение направлено в сторону, противоположную смещению, и пропорционально ему. Запишем наши результаты в виде таблицы (стрелки указывают направления соответствующих величин).

Фаза колебания	Смещение	Ускорение	Скорость
Нуль (начало колебания)	Нуль	Нуль	<u>Наибольшая</u>
$\frac{1}{4}$ периода	<u>Наибольшее</u>	<u>Наибольшее</u>	Нуль
$\frac{2}{4}$ периода	Нуль	Нуль	<u>Наибольшая</u>
$\frac{3}{4}$ периода	<u>Наибольшее</u>	<u>Наибольшее</u>	Нуль
1 период (начало 2-го периода колебания)	Нуль	Нуль	<u>Наибольшая</u>

Из сказанного следует, что любая величина, меняющаяся при колебательном процессе, меняется особенно быстро, когда проходит через нуль. Действительно, изменение смещения с течением времени,

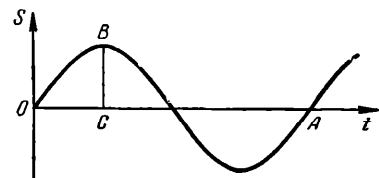


Рис. 169. График гармонического колебания.

рис. 169. Отрезок OA соответствует 1 периоду. Отрезок BC показывает амплитуду колебания.

Строго говоря, в природе и в технике не встречаются случаи, когда возвращающая сила точно пропорциональна смещению, и

т. е. скорость, наиболее велико тогда, когда смещение равно нулю. Изменение с течением времени скорости, т. е. ускорение, наиболее велико, когда колеблющаяся точка достигает крайнего положения и ее скорость равна нулю.

График гармонических колебаний имеет вид, показанный на

наблюдаемые колебания никогда не являются точно гармоническими. Однако многие виды колебаний весьма близки к гармоническим. В следующих параграфах мы рассмотрим некоторые из них.

§ 115. Упругие колебания. При колебаниях камертонов, струн, пружин и т. п. возвращающей силой является сила упругости, возникающая при деформации колеблющихся тел. Колебания, обусловленные упругостью тел, называются **у п р у г и м и**.

Смещения при упругих деформациях, если они не слишком велики, пропорциональны силам, вызывающим деформацию.

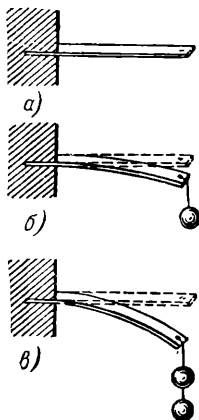


Рис. 170. *а)* Стальная полоска, зажатая на одном конце; *б)* полоска при навешивании гирьки; *в)* полоска при навешивании двух гирек.

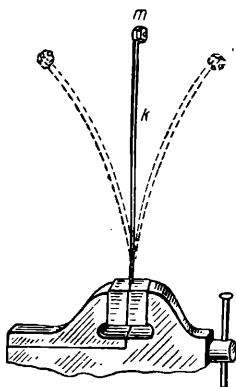


Рис. 171. Упругие колебания грузика *т*.

Например, деформируя стальную полоску, закрепленную в горизонтальном положении, нагружением (рис. 170), мы обнаружим, что при двух грузах незакрепленный конец полоски опустится на вдвое большую высоту, чем при одном грузе. Значит, в случае упругих колебаний условие пропорциональности между смещением и возвращающей силой выполняется, и эти колебания можно считать гармоническими.

Период упругих колебаний, например колебаний грузика *т*, прикрепленного к концу стальной полоски *к*, другой конец которой зажат в тисках (рис. 171), не зависит от амплитуды колебаний. Отклоняя грузик от положения равновесия на малое расстояние (например, 1 мм), получим колебания с тем же периодом, как и при большом отклонении грузика (например, на 10 мм). Это обусловлено тем, что при большей амплитуде больше и упругая сила.

Но при большей силе больше и среднее ускорение, а следовательно, и средняя скорость. Таким образом, отрезок времени, нужный для перемещения грузика от одного крайнего положения к другому, остается тем же самым, и период колебаний не меняется.

Эти рассуждения можно применить и ко многим случаям затухающих колебаний, например к затухающим колебаниям струны. Действительно, как мы увидим впоследствии, частота колебаний струны (высота звука) при затухании не меняется. Ясно, что не будь это так, не существовало бы струнных музыкальных инструментов.

Различные упругие тела имеют разные периоды колебаний. В этом можно убедиться, наблюдая колебания, показанные на рис. 171. Увеличивая массу грузика или удлиняя полоску, мы получим больший период колебаний. *Период упругих колебаний тем больше, чем больше масса колеблющегося тела, и зависит от упругих свойств его.*

§ 116. Колебания маятника. В случае колебаний маятника часов, качелей, весов, воды в сосуде и т. п. возвращающая сила обусловлена силой тяжести.

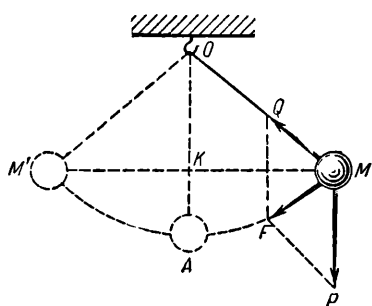


Рис. 172. Сила F , возвращающая маятник к положению равновесия (A).

Рассмотрим колебания маятника, состоящего из небольшого грузика, подвешенного на тонкой, но прочной нити (массой и растяжением нити можно пренебречь). Такой маятник называется **точечным маятником** (иногда его называют также **математическим маятником**). Если амплитуда колебаний невелика (примерно до 10°), то дугу, по которой движется маятник (MAM' на рис. 172) можно заменить хордой (MKM') и принять, что отрезок MK является смещением маятника. Сила тяжести P , действующая на маятник, дает вместе с натяжением нити (Q) равнодействующую F , которая и является возвращающей силой.

Из подобия треугольников MKO и MFP следует:

$$\frac{F}{P} = \frac{MK}{MO},$$

или

$$F = \frac{P}{MO} MK.$$

Сила тяжести P и длина маятника MO являются постоянными величинами. Значит, возвращающая сила F пропорциональна сме-

щению $МК$. Отсюда вытекает, что при небольших амплитудах колебания маятника являются гармоническими.

Измеряя период колебаний точечного маятника при изменениях амплитуды отклонения нити от вертикали в небольших пределах (до 10°), массы маятника и длины нити, мы обнаружим следующие свойства этих колебаний.

1. *Период колебания маятника не зависит от его амплитуды.* Объяснение этого факта сходно с объяснением постоянства периода упругих колебаний. 2. *Период колебания маятника не зависит от его массы.* Тяжелый и легкий грузики, подвешенные на нитях одинаковой длины, имеют одинаковый период колебания. Это объясняется тем, что сила тяжести вызывает одно и то же ускорение у легких и тяжелых тел.

3. *Период колебания маятника пропорционален корню квадратному из его длины.* Например, при увеличении длины маятника в четыре раза период колебания его возрастет в два раза.

4. *Период колебания маятника обратно пропорционален корню квадратному из ускорения силы тяжести g .* Это обстоятельство позволяет, измеряя период колебания маятника, очень точно определять значение g .

Расчет показывает, что период колебания точечного маятника T определяется формулой

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

где l — длина маятника, π — отношение длины окружности к диаметру.

Колебания маятников часов, состоящих из чечевицы и значительно более легкого стержня (рис. 173), близки к колебаниям точечного маятника. Колебания тел более сложной формы, например коромысла весов, показанных на рис. 14, тоже отчасти сходны с колебаниями точечного маятника; так же как и в случае точечного маятника, период колебаний тел сложной формы не зависит от амплитуды (если она не превышает 10°) и обратно пропорционален корню квадратному из величины g . Зависимость периода колебаний таких тел от их формы и размеров мы не будем рассматривать.

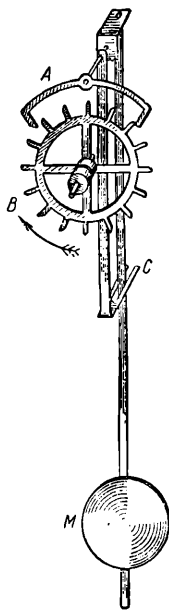


Рис. 173. Часть механизма стальных часов.

У п р а ж н е н и я

155. Что надо сделать с маятником стальных часов, если они отстают?

156. Как изменится ход стальных часов, если их перевезти из Ленинграда в Одессу?

157. Каков период колебания маятника, состоящего из маленького грузика, подвешенного на нити длиной 90 см?

§ 117. Лабораторная работа § 5. Определение ускорения свободного падения с помощью маятника.

Значение работы. Работа показывает один из способов определения ускорения свободного падения и способствует лучшему усвоению формулы маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \text{ из которой } g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}.$$

Принадлежности: металлический шарик, подвешенный бифилярно (на двух нитях для избежания кручения и изменения плоскости качания маятника), вертикальная шкала, чертежный угольник, часы или секундомер (рис. 174).

Выполнение работы. Отклонив маятник на некоторый угол, определяют время, за которое он сделает 80—100 колебаний. Опыт повторяют несколько раз и находят среднее значение периода $T = \frac{t}{n}$, где n — число колебаний.

Определение длины маятника можно сделать, вычитая из высоты h радиус шарика r (диаметр шарика определяют микрометром). Однако лучше избежать вообще определения длины маятника (главный источник ошибок). Для этого дважды проводят

серию опытов для различных длин (l_1 и l_2). Знать числовые значения этих длин не понадобится, достаточно знать разность их, легко определяемую угольником по вертикальной шкале. Действительно, из формул

$$g = 4\pi^2 \frac{l_1}{T_1^2},$$

$$g = 4\pi^2 \frac{l_2}{T_2^2}$$

после преобразования имеем

$$g \cdot T_2^2 = 4\pi^2 l_2,$$

$$g \cdot T_1^2 = 4\pi^2 l_1,$$

откуда вычитанием получаем

$$g(T_2^2 - T_1^2) = 4\pi^2(l_2 - l_1)$$

и

$$g = \frac{4\pi^2(l_2 - l_1)}{T_2^2 - T_1^2}.$$

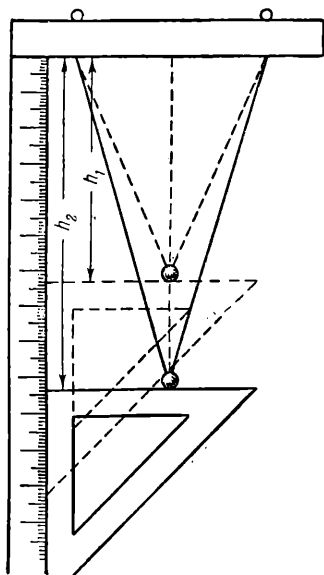


Рис. 174.

Запись результатов работы делается по схеме:

$l_2 - l_1$	T_1	T_2	g	Δ	δ

§ 118. Энергия колебаний. При всяком колебании происходит попеременный переход кинетической энергии в потенциальную, и обратно. Например, маятник, поднимаясь вверх, движется все медленнее, т. е. его кинетическая энергия убывает, превращаясь в потенциальную. В направлении к среднему положению маятник движется ускоренно, т. е. его потенциальная энергия превращается в кинетическую. После перехода через среднее положение энергия снова превращается из кинетической в потенциальную и т. д. Вспомним, что кинетическая энергия тела тем больше, чем больше масса тела и его скорость. Скорость же колеблющегося тела при его прохождении через среднее положение тем больше, чем больше амплитуда и частота колебания. Таким образом, энергия колебания тем больше, чем больше масса тела, амплитуда и частота колебания.

При затухании колебаний их энергия убывает. В какие другие формы она переходит?

Причин затухания колебания две. Во-первых, вследствие неизбежного трения колеблющееся тело и среда, внутри которой происходят колебания тела, нагреваются, т. е. механическая энергия колебаний превращается во внутреннюю энергию; во-вторых, и это наиболее существенно, всякое колеблющееся тело приводит в колебания окружающую среду, передавая ее частицам часть своей энергии. Этот последний процесс носит название *излучения*.

§ 119. Применение маятника в часах. Чтобы колебания тела не затухали, нужно, очевидно, возмещать потери, связанные с превращением его механической энергии во внутреннюю энергию тела и среды, а также с излучением энергии. В часах это делается за счет энергии заведенной пружины или поднятой гири. В механизм часов входит колесико *B* с зубчиками особой формы и якорь (*анкер*) *A*, который при посредстве вилки *C* колеблется в такт с маятником (см. рис. 173). При колебании маятника анкер *A* отклоняется и тем позволяет колесу *B*, движимому через посредство зубчатых колес пружиной или гирей, повернуться на небольшой угол. При этом один из зубчиков колеса *B*, скользя по кончику удаляющегося

зубца анкера, отталкивает его. Эти толчки через посредство вилки C передаются маятнику M и поддерживают его колебания.

§ 120. Распространение колебаний в среде. Волны. Что произойдет, если бросить камень на гладкую поверхность воды? От удара камня вода сначала опустится, а затем поднимется, т. е. придет в колебание (рис. 175). Однако вскоре вода в месте падения успокоится и станет такой же гладкой, как и раньше. Куда же исчезла энергия колебания?

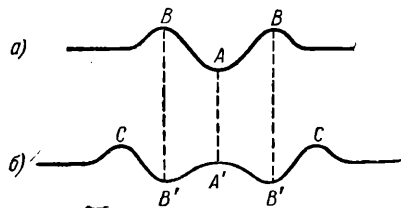


Рис. 175. а) Колебания воды в точке A вызвали колебания в точках B ; б) колебания в точках B' вызвали колебания в следующих точках C .

Значит, образование волн связано с передачей энергии колеблющегося тела окружающей среде. Образую волны, колеблющееся тело излучает энергию.

От места падения камня во все стороны «кругами» распространяются волны, т. е. приходят в колебания сначала соседние участки поверхности воды, а потом и более далекие (рис. 176).

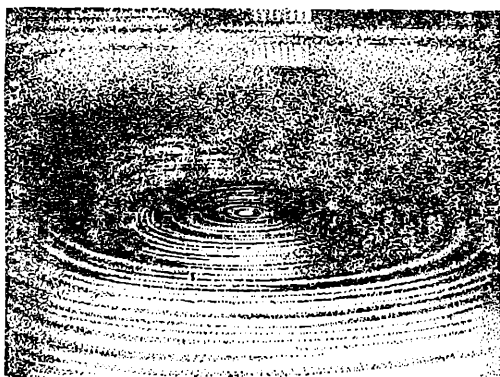


Рис. 176. Волны по поверхности воды от упавшего камня.

Рассмотрим рис. 177, показывающий схематически, что происходит в среде, в которой бегут волны. На рисунке показаны положения нескольких точек среды при отсутствии волн (рис. 177, а) и при волнах, бегущих слева направо, через отрезки времени, равные одной четверти периода (рис. 177, б, в, г, д). Видно, что при наличии волн частицы среды колеблются, причем фазы этих ко-

лебаний различны. Рассмотрим, например, частицу 7. На рис. 177, *в* показано, что эта частица, двигаясь вниз, проходит через положение равновесия. В тот же момент находящаяся слева от нее частица 4 сместилась на максимальное расстояние вниз; в положении равновесия частица 4 уже была ранее на $\frac{1}{4}$ периода (рис. 177, *б*). Справа от частицы 7 частица 10 в момент, показанный на рис. 177, *в*, сместилась на максимальное расстояние вверх; до положения равновесия частица 10 дойдет позднее на $\frac{1}{4}$ периода (рис. 177, *з*). Таким образом, частица 7 запаздывает по фазе по сравнению с частицей 4 и опережает по фазе частицу 10.

Вследствие запаздывания по фазе частицы, которые при отсутствии волн были расположены по прямой линии, при наличии волн располагаются по кривой линии, образуя постепенно перемещающиеся горбы и впадины. Наименьшее расстояние между частицами, колеблющимися в одинаковых фазах, называется длиной волны.

Как показывает рис. 177, *в*, длины волны соответствуют один горб и одна впадина. На том же рисунке видно, что за один период волна пробегает расстояние, равное ее длине.

Применяя формулу равномерного движения (§ 29) и обозначая скорость волн c , длину волны λ (греческая буква «лямбда») и период T , связь между ними мы можем выразить формулой

$$\lambda = cT.$$

§ 121. Поперечные и продольные волны. Рассмотрим волну, бегущую по горизонтально натянутой веревке (рис. 178). При этом частицы веревки движутся вверх и вниз, т. е. колеблются в направлении, перпендикулярном к направлению распространения волны. Если колебания частиц среды происходят в направлении, перпендикулярном к направлению движения волн, то волны называются поперечными. Волна, распространяющаяся по веревке, является примером поперечной волны.

Очевидно, что поперечные волны могут распространяться в средах, в которых возможны упругие деформации сдвига. В твердых

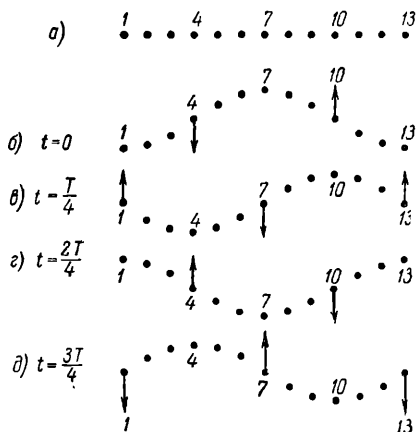


Рис. 177. Схема движения частиц в волне.

телах деформации сдвига являются упругими, а в жидкостях при деформации сдвига не возникает никаких упругих сил, т. е. жидкости в отношении сдвига являются совершенно неупругими.

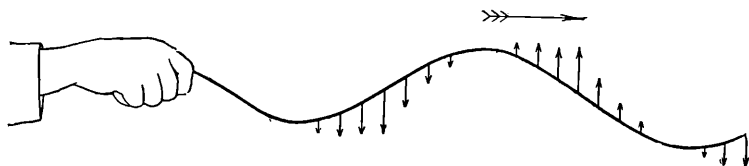


Рис. 178. Вследствие колебательного движения руки по натянутой веревке бегут волны.

Большая стрелка показывает направление движения волн; малые стрелки показывают скорости частиц веревки.

Поэтому поперечные упругие волны могут распространяться только в твердых телах.

Иной вид волн можно наблюдать на длинной спиральной пружине, имеющей форму прямого цилиндра и подвешенной на нитях.

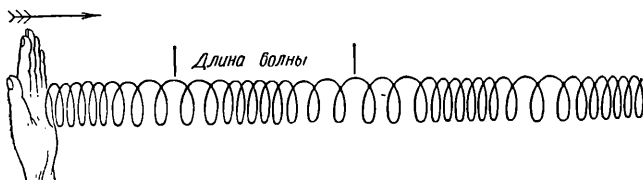


Рис. 179. По спиральной пружине бегут продольные волны.

Если крайний виток пружины двигать взад и вперед, как показано на рис. 179, то по пружине побегут волны. Но при этом на ней не получится ни горбов, ни впадин — пружина останется прямой.

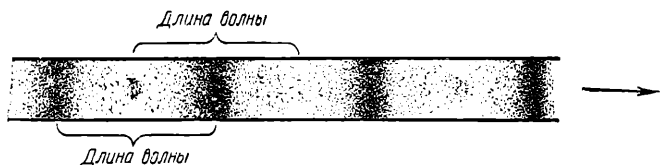


Рис. 180. Сгущения и разрежения в среде, по которой бегут продольные волны.

Вместо этого в некоторых местах витки будут сближаться, а в других — расходиться. Получатся сгущения и разрежения, которые перемещаются вдоль пружины так же, как горбы и впадины на веревке.

Волны, при которых колебания частиц среды происходят в направлении движения волн, называются **п р о д о л ь н ы м и**.

При прохождении продольных волн участки среды подвергаются деформациям сжатия и разрежения. Деформации сжатия и разрежения являются упругими во всех состояниях тел: и в твердом, и в жидком, и в газообразном. Поэтому продольные упругие волны могут распространяться и в твердых телах, и в жидкостях, и в газах.

В случае продольных волн длина волны равна наименьшему расстоянию между местами наибольшего сжатия или наибольшего разрежения среды (рис. 180).

§ 122. Звуковые волны. Можно убедиться на глаз или на ощупь, что все звучащие тела колеблются. Колебания звучащих тел образуют продольные волны в окружающем воздухе.

Звуковые волны — продольные волны, образуемые перемещающимися сгущениями и разрежениями воздуха.

Звуковые волны, например от гудка автомобиля, заставляют дрожать оконные стекла, стенки пустых бидонов и т. п. Это легко объяснимо. В сгущениях звуковых волн давление воздуха больше, чем внутри бидона, а в разрежениях, наоборот, меньше. Поэтому силы давления на стенки бидона изнутри и снаружи при звуковых волнах не уравновешиваются, и это вызывает дрожание стенок.

Как воспринимаются звуковые волны ухом человека? Между наружным и средним ухом имеется непроницаемая перепонка (барабанная перепонка). Когда звуковые волны доходят до барабанной перепонки, она прогибается то внутрь, то наружу с частотой, соответствующей частоте источника звука. Дрожания барабанной перепонки передаются посредством системы косточек окончаниям слухового нерва, раздражают их и тем вызывают ощущение звука.

§ 123. Скорость звука. Наблюдая в темноте издали выстрел, мы сперва видим огонек у дула ружья и только потом слышим звук выстрела. Так как скорость света очень велика, то можно считать, что мы видим огонек в момент выстрела. Зная расстояние до места выстрела и измерив, сколько времени прошло от появления огонька до момента, когда мы услышали звук выстрела, можно рассчитать скорость звука.

Подобными и другими измерениями было установлено, что при 0° С звук распространяется в воздухе со скоростью 332 м/сек. При повышении температуры скорость звука увеличивается (приблизительно на 0,6 м/сек на каждый градус). Например, при температуре 15° С она составляет около 340 м/сек.

Другие вещества проводят звук с иной скоростью (обычно большей): например, в воде скорость звука 1450 м/сек, в стали 5000 м/сек.

Отчего различна скорость волн в разных средах? Здесь играют роль различия в упругих свойствах сред и в их плотностях. Чем больше упругие силы, которые возникают в среде при деформации (например, при сжатии), тем быстрее передаются колебания от одной точки среды к другой, т. е. тем больше скорость волн. Чем больше плотность данной среды, тем меньше ускорение, с которым частицы среды движутся под действием упругих сил, поэтому тем меньше скорость волн.

§ 124. **Наложение волн.** Создадим на поверхности воды, бросив в нее два камня, две круговые волны. Что происходит в том месте, где обе волны встречаются? Волны проходят одна сквозь другую, оставаясь круговыми. Отсюда следует, что по поверхности воды, измененной другими волнами, волны распространяются так же, как и по гладкой поверхности спокойной воды. Это показывает, что наличие в каком-либо месте поверхности воды смещения, вызванного одной волной, ничуть не мешает второй дошедшей до этого места волне тоже вызвать здесь смещение. Колебания, переносимые волнами, просто налагаются друг на друга. Это замечательное свойство относится не только к волнам на поверхности воды. Вообще, при всех видах волн *изменения, вызванные волнами, налагаются друг на друга.*

При этом возможны следующие случаи: если до какого-либо места поверхности воды дойдут одновременно два горба или две впадины волн, то смещение поверхности воды будет равно сумме смещений, которые вызвала бы каждая волна в отдельности. Если же горб одной волны наложится на впадину другой, то смещение поверхности воды будет равно разности смещений, которые вызвали бы отдельные волны.

§ 125. **Интерференция волн.** Очень важный случай наложения волн представляет и н т е р ф е р е н ц и я волн. Интерференцией волн называются явления, получающиеся при наложении двух

волн, вызывающих колебания с одинаковым периодом. В той точке, где начало горба одной волны встретится с началом горба другой, фазы колебаний, вызываемых волнами, будут одинаковы и смещения будут одинаково направлены. Действительно, горбы волн одновременно сменяются двумя впадинами, а затем снова сменяются горбами и т. д. В этой точке амплитуда равна сумме амплитуд колебаний, вызываемых обеими волнами. В той точке, где начало горба одной волны встретится с началом впадины другой, фазы колебаний, вызываемых волнами, противоположны и смещения направлены противоположно. Действительно, здесь горб первой волны и впадина второй сменяются впадиной первой волны и горбом второй, затем снова горбом первой волны и впадиной второй и т. д. В этой точке амплитуда колебания равна разности амплитуд отдельных волн.

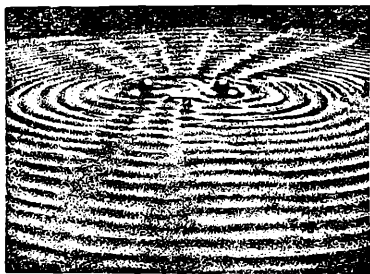


Рис. 181. Интерференция волн от двух источников на поверхности воды.

Интерференцию волн, бегущих по поверхности воды, легко наблюдать, вызывая волны двумя шариками, колеблющимися на поверхности воды с одинаковыми периодами (рис. 181). В тех местах поверхности воды, где разность расстояний от шариков (разность хода волн) равна целому числу длин волн, фазы колебаний одинаковы. Здесь наблюдается усиление колебаний. В тех же местах поверхности воды, где разность расстояний от шариков равна целому числу длин волн плюс еще полволны, фазы колебаний противоположны. Здесь наблюдается ослабление колебаний или даже полное уничтожение их.

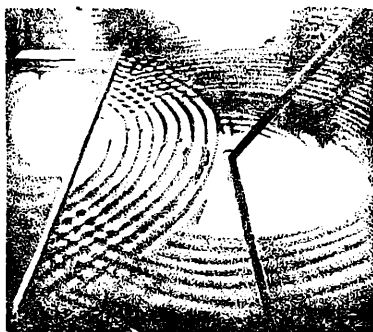


Рис. 182. Отражение волн.

§ 126. Отражение волн. Наблюдаем за волнами, бегущими по поверхности воды, поставив на их пути лист фанеры. Что происходит, когда волна достигает фанеры? Мы увидим, что направление распространения волн изменяется (рис. 182). Волна снова имеет вид дуги окружности, но центр этой дуги лежит за фанерой. Мы говорим, что произошло отражение волн. То же можно наблюдать

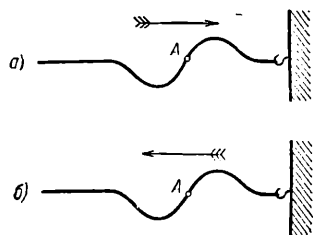


Рис. 183. а) Бегущая по веревке волна приближается к стенке; б) от стенки бежит отраженная волна.

на веревке, привязанной к крюку в стене (рис. 183). Создав на ней волну, мы увидим, как волна, дойдя до крюка, отразится от него и пойдет обратно. В обоих случаях дело, очевидно, заключается в том, что в стенке невозможны те движения, которые возможны на поверхности воды или на веревке. Например, крюк остается в покое, несмотря на то, что до него дошла волна. Мы можем представить себе, что колебание, принесенное этой волной, было уничтожено какой-то другой волной. Эта другая волна и обнаружилась в виде отраженной волны.

Отражение волн имеет место всегда, когда волна доходит до границы одной среды с другой средой, обладающей иными свойствами.

Рассмотрим еще случай отражения волн, бегущих по поверхности от стенки, поставленной под углом к направлению движения

волн (рис. 184). Будем называть углы, которые направления движения волн до и после отражения составляют с перпендикуляром к стенке, соответственно углом падения (α) и углом отражения (β) волн. Наблюдая отражение волн на поверхности воды, мы видим, что *угол отражения равен углу падения*. Мы узнаем, далее, что то же имеет место при отражении любых других волн.

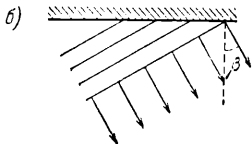
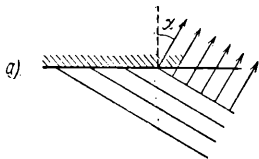


Рис. 184. а) Плоские волны падают на стенку; угол между направлением распространения падающих волн и перпендикуляром к стенке есть угол падения α ; б) те же волны после отражения от стенки; угол между направлением распространения отраженных волн и перпендикуляром к стенке есть угол отражения β .

При этом по веревке в противоположных направлениях все время будут бежать волны.

Интерференция встречных волн приводит к тому, что в некоторых точках — там, где горб волны, бегущий вправо, встречается

§ 127. **Стоячие волны.** Рассмотрим явления, наблюдающиеся на натянутой веревке, один из концов которой, например левый, привязан, а другой — непрерывно колеблется рукой (рис. 185). Волны, идущие от правого конца, доходят до крюка и отражаются. Предположим, что скорость распространения волн как раз такова, что колебания, приносимые отраженными волнами к правому концу веревки, попадают в такт с его колебаниями. В таком случае последние будут усиливаться до тех пор, пока расход энергии на трение и излучение в окружающее пространство не уравновесится приходом энергии от движущей веревку руки.

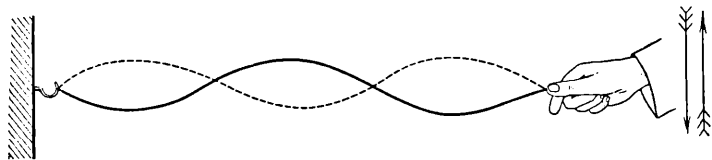


Рис. 185. Получение стоячих волн на натянутой веревке.

со впадиной волны, бегущей влево, — колебания отсутствуют (узлы).

В промежутках между узлами располагаются области, где имеют место колебания, причем наиболее сильные колебания посередине между узлами (пучности). Такая картина носит название **стоячих волн**.

Легко понять, что *расстояние между узлами равно половине длины бегущей волны.*

Узлы и пучности получаются также на колеблющейся струне. Колебания струны можно рассматривать как стоячие волны. Если ударить по какому-нибудь месту струны, то в обе стороны от этого участка побегут волны, которые, отражаясь от концов струны, образуют стоячую волну.

Число пучностей, образующихся на веревке или струне, может быть различным. Иногда узлы образуются только у закрепленных концов струны, иногда и в средних ее частях (один или несколько). Это зависит от частоты колебаний.

Стоячие волны могут образоваться всюду, где возможно отражение волн точно в обратном направлении. Например, стоячие волны могут образоваться в воздушных столбах.

Рассмотрим несколько подробнее стоячие волны. На рис. 186 представлены формы веревки, на которой образованы стоячие волны через промежутки времени, равные $\frac{1}{4}$ периода. Прежде всего, мы видим, что в соседних пучностях колебания происходят в противоположных направлениях.

Вследствие этого веревка то выпрямляется, то принимает волнистую форму. В пучностях части веревки движутся вверх и вниз, и, следовательно, здесь концентрируется кинетическая энергия колебаний, достигающая максимума в те моменты, когда веревка распрямляется (моменты 1, 3, 5 на рис. 186), и обращающаяся в нуль, когда веревка принимает волнистую форму (2 и 4 на рис. 186). В узлах веревка подвергается периодическому изгибанию то в одну, то в другую сторону. Следовательно, в них концентрируется потенциальная энергия, достигающая максимума, когда веревка принимает волнистую форму, и равная нулю при выпрямлении веревки.

Итак, в стоячих волнах энергия все время переходит от узлов к пучностям и обратно. В бегущих же волнах энергия концентрируется в тех местах, где колеблющиеся точки проходят через положения равновесия. Рассмотрим, например, точку *A* на рис. 183.

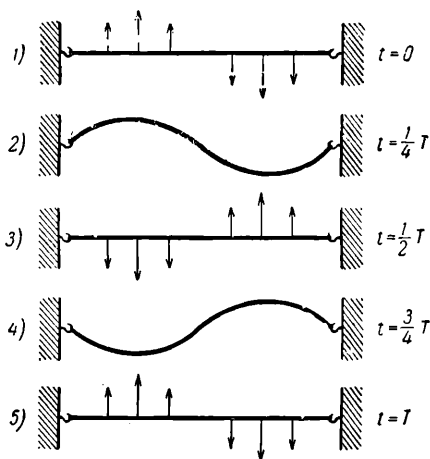


Рис. 186. Формы струны, на которой образовались стоячие волны с одним узлом посередине, в различные моменты времени.

Стрелками показаны скорости участков струны.

В этой точке имеют место и наибольшая потенциальная энергия (веревка деформирована), и наибольшая кинетическая энергия (веревка наиболее быстро движется). В бегущей волне энергия не переходит из кинетической в потенциальную (как в стоячей волне), а просто передается от одной точки волны к другой.

У п р а ж н е н и е

158. Дополните рис. 186 изображениями струны и векторов скорости через $t = 1/8 T$ и $t = 3/8 T$.

§ 128. Вынужденные колебания. Резонанс. Мы рассматривали до сих пор с в о б о д н ы е колебания. Свободные колебания возникают, когда тело, получив некоторое количество энергии извне, например посредством толчка, колеблется под действием возвращающей силы. Так колеблются качели, которые один раз толкнули, струна, за которую один раз дернули, и т. п. При свободных колебаниях период колебаний определяется свойствами колеблющегося тела, например период маятника зависит от его длины. Иное происходит, когда на тело действуют не одним толчком, а рядом периодических толчков, получающихся, например, в том случае, если до тела доходят волны от какого-либо источника.

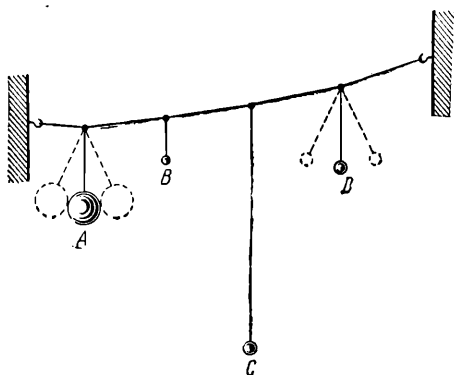


Рис. 187. Колебания маятника A вызывают сильные колебания только маятника D , частота колебаний которого равна частоте колебаний маятника A . Маятники B и C , имеющие частоты колебаний, не равные частоте колебаний маятника A , почти не раскачиваются.

Колебания, вызванные внешним периодическим воздействием, называются **в ы н у ж д е н н ы м и** колебаниями. Очевидно, что период вынужденных колебаний

равен периоду вынуждающей силы. От чего зависит амплитуда вынужденных колебаний? Рассмотрим такой опыт. На слабо натянутой нити подвешено несколько маятников (рис. 187). Крайние маятники — одинаковой длины и потому имеют одинаковые периоды колебаний. Средние маятники отличаются от крайних длиной и периодом. Один из крайних маятников, например левый, имеет массу, значительно большую, чем массы остальных маятников. Приведем левый маятник в колебание. В первый момент качнутся все маятники, но затем скажется разница периодов:

средние останутся почти неподвижными, а крайний правый сильно раскачается.

В чем здесь дело? Левый маятник посылает по нити толчки, раскачивающие все остальные маятники, которые начинают совершать вынужденные колебания. Однако для средних маятников повторные толчки, доходящие от левого маятника, через короткое время уже не усиливают, а ослабляют колебания. Сильно раскачивается только тот маятник, период колебания которого совпадает с периодом толчков; чем точнее совпадение периодов, тем в большей мере он раскачивается.

Подобные явления наблюдаются во всех случаях колебаний. Всегда, когда под влиянием внешней периодической силы, например периодических толчков или волн, совершаются вынужденные колебания, только те из них достигают большой амплитуды, у которых период свободных колебаний близок по величине к периоду вынужденных колебаний.

Это явление — сильное раскачивание от периодических толчков (или от волн) только тех тел, которые имеют близкий по величине период колебания, — называется **резонансом**.

В технике очень часто приходится иметь дело с периодическими толчками, действующими на машины или сооружения, а следовательно, и с вынужденными колебаниями их: железнодорожные вагоны испытывают периодические толчки при ударах колес о стыки рельсов; корпус корабля подвергается периодическим толчкам со стороны установленного на нем двигателя, а также под ударами волн о борта. Во всех подобных случаях возможен резонанс. Возникновения резонанса стараются избежать, так как сильные колебания вредны для механизмов и сооружений, а иногда и просто опасны. С этой целью выбирают такие размеры машин и сооружений, при которых частота их свободных колебаний далека от частоты толчков.

В звуковых явлениях резонанс проявляется в том, что звуковые волны заставляют сильно колебаться только те тела, которые звучат в один тон с источником звука.

Резонанс можно обнаружить на двух струнах (например, на гитаре), настроенных на один и тот же тон. Заставив одну из них звучать и затем остановив ее рукой, мы заметим, что вторая струна тоже зазвучала. Хорошо заметен резонанс в столбах воздуха (например, в трубах). Если поместить звучащий камертон перед открытым концом трубы (например, картонной), внутри которой можно передвигать поршень (рис. 188), то при некоторых положениях поршня слышно усиление звука. Это резонирует столб воздуха в трубе. Обратим внимание, что усиление звука получается при нескольких положениях поршня. Чем это объяснить? В трубе вследствие отражения волн от поршня возникают стоячие волны. Около конца трубы образуется пучность, а около поршня — узел. При

ближайшем к концу трубы положении поршня, при котором наблюдается резонанс (рис. 189, а), в трубе размещается одна четверть волны. При втором положении поршня, соответствующем



Рис. 188. При некоторых положениях поршня внутри трубы, перед открытым концом которой расположен звучащий камертон, слышно усиление звука.

резонансу, в трубе размещается три четверти волны (рис. 189, б). Очевидно, что расстояние между двумя соседними положениями

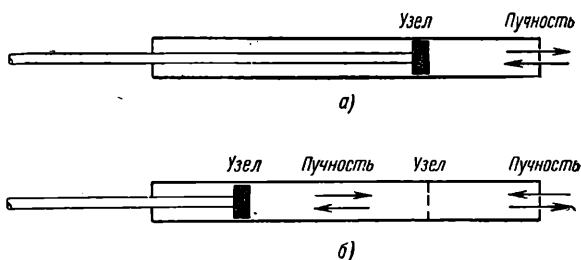


Рис. 189. Расположение узлов и пучностей в воздушном столбе внутри трубы при различных положениях поршня.

поршня, при которых наблюдается резонанс, равно половине длины волны. Измеряя это расстояние, можно определить длину звуковой волны в воздухе для данного камертона.

У п р а ж н е н и я

159. Известны случаи, когда мосты, раскачиваясь под мерными ударами ног марширующих солдат, обрушивались. (Поэтому при переходе мостов командуют идти «вольно».) Как это объяснить?

160. Иногда при определенной скорости швейной машины стол, на котором она стоит, сильно сотрясается. Объясните это явление.

161. Попробуйте негромко петь в пустую банку тоны разной высоты. При определенном тоне звук очень усилится, и банка задрожит. Почему?

162. Расстояние между двумя соседними положениями поршня в трубе, изображенной на рис. 170, когда наблюдается резонанс при звучании камертона, равно 42 см. Температура воздуха 15° С. Какова частота колебаний камертона?

§ 129. Высота тона. Зажмем стальную пластинку (полотно ножовки) в тисках и заставим ее колебаться. Если пластинка длинная, мы не услышим никакого звука. Укорачивая ее колеблющуюся часть и тем увеличивая частоту ее колебаний, мы услышим звуки сперва низкие, а затем более высокие.

Значит, высота тона определяется частотой колебаний. *Чем больше частота, тем выше тон.*

Исследования показали, что человек с нормальным слухом слышит звуки, производимые колебаниями от 20 до 20 000 гц. Человеческий голос дает тоны от 80 гц (самый низкий тон мужского голоса) до 1300 гц (самый высокий тон женского голоса). В музыке пользуются тонами в пределах от 30 до 4000 гц. Писк насекомых часто имеет частоту, близкую к верхнему пределу слуха.

Колебания с частотой, меньшей 20 гц, не дают ощущения звука. Такие колебания называются и н ф р а з в у к о в ы м и. Мы не слышим также колебаний с частотой выше 20 000 гц (у л ь т р а з в у к о в ы е колебания, или у л ь т р а з в у к и). Ультразвуки могут иметь частоты от 20 000 гц до нескольких миллионов герц.

В отличие от сравнительно длинных звуковых волн, которые распространяются от источника звука по всем направлениям более или менее равномерно, ультразвуковые волны можно получить в виде узких направленных пучков (ультразвуковые лучи). С этим связано их широкое применение для целей подводной сигнализации, для исследований дефектов в сплошных металлических изделиях и др. Кроме того, ультразвуки применяются в химических производствах для получения веществ в мелкодробленном состоянии (э м у л ь г и р о в а н и е). Для создания ультразвуков служат электрические устройства, которые мы не будем рассматривать.

У п р а ж н е н и е

163. Каковы длины звуковых волн: а) в воздухе при 15° С для самого высокого и самого низкого тонов, воспринимаемых слухом человека; б) для ультразвука частотой 1 млн. гц в воде?

§ 130. Тембр звука. Мы без труда отличаем тон камертона от тона той же высоты, издаваемого скрипкой или флейтой, или от голоса человека, поющего тот же тон. Чем это объяснить? Иными словами, чем объяснить оттенок, т е м б р звука?

Дело в том, что звуковые колебания почти всегда являются сложными колебаниями, состоящими из нескольких, а иногда — очень многих, налагающихся друг на друга простых колебаний. При этом график их уже не является простой волнообразной линией, какую мы получили при колебаниях камертона, а представляет собой причудливую кривую, повторяющуюся через

определенные промежутки времени. На рис. 190 показано, что даже при наложении только двух простых колебаний, частоты которых относятся, как $1:2$, получается колебание, график которого совсем не похож на график простого колебания.

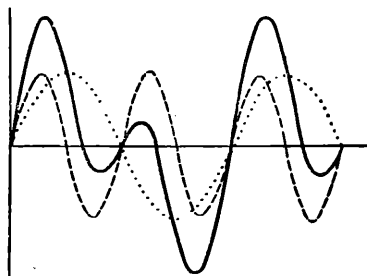


Рис. 190. Сплошная кривая—график сложного колебания, которое получилось при наложении двух гармонических колебаний с частотами, различающимися в два раза (показаны пунктиром).

струна издает не один тон, а целый ряд их: нижний тон, называемый основным, и ряд верхних, называемых обертонами.

Обнаружить существование обертонов струны можно так: заставим звучать струну, щипнув ее на расстоянии одной четверти от конца, а затем осторожно коснемся середины струны пальцем (рис. 191). Мы услышим

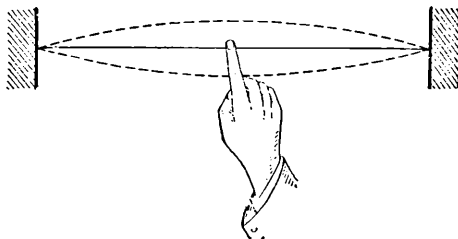


Рис. 191. Обнаружение обертонов струны.

более высокий тон — первый обертон. Коснувшись середины

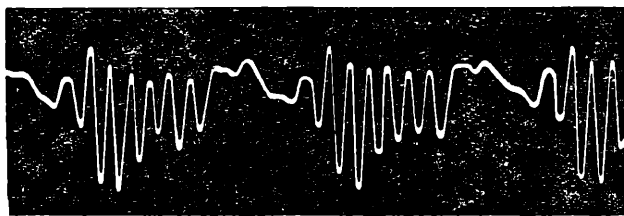


Рис. 192. График тона гобоя.

струны, мы прекратим колебания струны как целого, но не помешаем колебаниям ее половины. Коснувшись струны на рассто-

янии $1/3$, $1/4$ и т. д. от ее конца, мы услышим еще более высокие второй, третий и последующие обертоны.

Звуки музыкальных инструментов, голос человека также состоят из основного тона и ряда верхних тонов. Мы обычно различаем только основной тон и не замечаем верхних тонов. Но присутствие последних очень важно: они и создают тембр звука. Особенно большим числом тонов отличается человеческий голос, что и обуславливает богатство его оттенков.

В § 112 мы описали получение графика колебания камертона. При помощи более сложных приборов можно получить графики различных колебаний и звуков (рис. 192).

Г Л А В А X

ОСНОВЫ ГИДРОДИНАМИКИ И АЭРОДИНАМИКИ

§ 131. Гидродинамика и аэродинамика. Первые приложения открытых Галилеем и Ньютоном законов механики относились к движению планет и их спутников, которые при этом рассматривались как точки. Но уже ученые XVIII века, среди которых первое место по праву принадлежит петербургскому математику Леонарду Эйлеру, применили законы механики ко многим более сложным, практически важным проблемам. Одной из таких проблем явилось изучение движения жидкостей и газов, составляющее предмет гидродинамики и аэродинамики. Гидродинамика и аэродинамика играют огромную роль при изучении движения жидкостей и газов в природе (например, в метеорологии — науке об атмосфере и погоде), а также в таких важнейших отраслях техники, как авиация, судостроение, строительство водяных, паровых и газовых турбин, водопроводов, газопроводов и т. п.

§ 132. Условия, влияющие на движение жидкостей и газов. Простые наблюдения, например наблюдения течения реки, убеждают нас в том, что движение жидкостей более сложно, чем движение твердых тел. Сразу бросается в глаза, что различные части воды движутся с различными скоростями (в середине реки скорость больше, чем у берегов), что образуются воронки. Столь же сложно движение воздуха в атмосфере. Законы движения жидкостей или газов почти одинаковы *), мы будем изучать их совместно, для краткости упоминая только жидкости или только газы.

Какие же силы определяют движение жидкости?

Во-первых, важную роль играют силы, связанные с изменением давления жидкости от точки к точке. Если, например, давление с левой стороны некоторого объема жидкости больше, чем справа, то на этот объем действует некоторая сила, направленная вправо.

*) Исключение — движение с такими большими скоростями, при которых сказывается сжимаемость газов (§ 137).

Во-вторых, все частицы жидкости всегда находятся под действием силы тяжести.

В-третьих, играют роль силы, связанные с наличием внутреннего трения или вязкости жидкости. Вязкость жидкости обуславливает силы, уменьшающие скорость скольжения одного слоя жидкости вдоль другого. Этот вид трения можно наблюдать, например, поднимая нож, погруженный в мед. Нож увлекает за собой не только слой меда, непосредственно к нему прилегающий, но также слои, расположенные на некотором расстоянии. Вязкости различных жидкостей весьма сильно разнятся между собой. Существуют жидкости с очень малой вязкостью (бензин, вода). Примеры более вязких жидкостей — глицерин, мед, некоторые масла. Бывают, наконец, настолько вязкие жидкости, что при обычных условиях мы не можем обнаружить их течения (например, смола). Газы обладают вязкостью значительно меньшей, чем жидкости. При повышении температуры вязкость жидкостей заметно убывает. У газов, наоборот, повышение температуры вызывает увеличение вязкости.

Вязкая жидкость в трубе или при обтекании твердых тел при течении с малыми скоростями течет слоями, скользящими друг по другу. Такое течение называется **ламинарным**.

При увеличении скорости течения, или при малой вязкости, характер течения меняется. Слои непрерывно перемешиваются, возникают области вихревого, вращательного движения. Такое течение называется **вихревым** или **турбулентным**.

В большинстве технических приложений, упомянутых в начале главы, вязкость может считаться малой величиной.

§ 133. Стационарный поток.

Поток, в котором скорость жидкости или газа в данной точке пространства не меняется, называется стационарным. Жидкость в стационарном потоке течет по неизменным линиям, называемым «линии тока»;

эти линии можно сделать видимыми, вводя в жидкость струйки краски (рис. 193). Такой опыт (для случая медленного «ламинарного» течения жидкости между двумя пластинками) изображен на рисунке. При больших скоростях течения поток уже не является

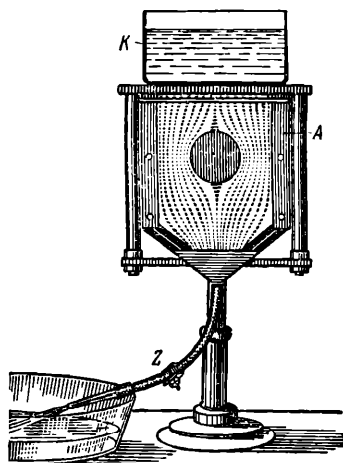


Рис. 193. Прибор для демонстраций линий тока.

вполне стационарным из-за образования вихрей, но вдали от твердых тел и стенок трубы в ряде случаев мы можем этим пренебречь.

Рассмотрим теперь стационарный поток жидкости (или газа) в трубе. Можно ввести понятие «расхода жидкости». Это, по определению, объем жидкости, протекающей мимо какой-либо точки трубы в единицу времени. Обозначим площадь поперечного сечения трубы S , скорость течения жидкости v . За одну секунду мимо отмеченной на

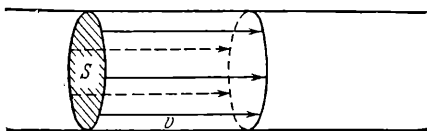


Рис. 194. В стационарном потоке расход жидкостей $Q = S \cdot v$.

трубе точки протекает объем жидкости, имеющий форму цилиндра с основанием S и с высотой v (рис. 194). Объем этого цилиндра, т. е. расход жидкости, $Q = S \cdot v$ (единица измерения — $m^3/сек$). Если жидкость несжимаема, то объем втекающей в трубу жидкости равен объему вытекающей. Поэтому величина расхода Q есть величина постоянная вдоль трубы, даже если труба имеет переменный диаметр D . В более узких местах скорость течения возрастает по формуле

$$v = \frac{Q}{S} \quad \left(S = \frac{\pi D^2}{4} \right).$$

Подчеркнем, что разная скорость в разных точках трубы не противоречит тому, что течение стационарно — лишь бы скорость не менялась во времени в данной точке трубы.

§ 134. Связь между давлением и скоростью в стационарном потоке. Обратимся теперь к распределению давления в разных точках жидкости при стационарном течении жидкости по трубе переменного сечения.

Рассмотрим такой опыт. Горизонтально расположенная стеклянная трубка имеет в середине суженную часть (рис. 195). В широкой и узкой частях трубки имеются отростки, к которым присоединен манометр, нижняя часть которого наполнена ртутью, а верхняя — водой. Пустим

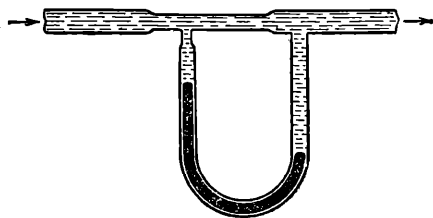


Рис. 195. При течении воды ртуть в колене, присоединенном к узкой части трубы, поднимается.

по трубке воду и будем менять скорость ее течения. Манометр показывает, что в широкой части трубки давление воды больше, чем в узкой. Разность давления тем больше, чем больше скорость течения воды. Присоединим нашу трубку к водопроводу другим

концом, переменяв таким образом направление течения воды. Результат оказывается почти таким же..

В узкой части трубки скорость течения воды больше, чем в широкой. Значит, наш опыт показывает, что, в отличие от покоящейся жидкости, в движущейся жидкости давление на одном и том же горизонтальном уровне может быть различно. Иными словами, давление жидкости зависит от скорости ее течения. В том месте потока жидкости, где скорость течения велика, давление жидкости меньше, чем в том месте потока, где скорость течения мала.

Подобные же явления имеют место и при течении газов. Например, если дуть поверх листа тонкой бумаги, который держат руками около места *B* (рис. 196), то листок поднимается, как показано стрелкой. Дело в том, что помещенный в струе воздуха лист бумаги сужает струю.

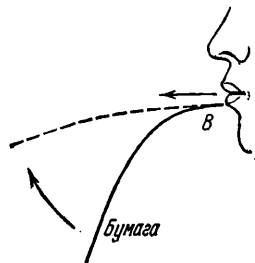


Рис. 196. Струя воздуха над согнутой бумагой заставляет ее подниматься.

Вследствие этого давление в струе воздуха делается меньше атмосферного. Под листом давление воздуха остается прежним. Разница давления воздуха заставляет лист подниматься.

Как объяснить описанные явления?

Рассмотрим движение некоторого объема жидкости в трубе переменного сечения. В сужающейся части трубы выделенный

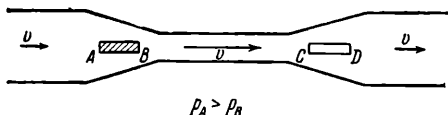


Рис. 197. К объяснению зависимости давления от скорости в стационарном потоке.

объем (заштрихован на рис. 197) движется ускоренно, в расширяющейся части — замедленно. По второму закону Ньютона тело массы m испытывает ускорение a , если на него действует сила

$$F = m \cdot a.$$

В нашем случае m есть масса выделенного объема жидкости, a — ускорение. Сила F есть разность сил давления, действующих на заднюю (по ходу движения) поверхность выделенного объема и на переднюю поверхность:

$$F = p_A \cdot S - p_B \cdot S,$$

где S — величина задней и передней поверхности выделенного

объема *). p_A и p_B — давление в точках A и B . Очевидно, в сужающейся части трубы ускорение и сила направлены вперед и давление в точке A больше давления в точке B . Аналогично для расширяющейся части трубы давление больше в точке D , чем в точке C . Мы можем сказать, что при проталкивании жидкости через узкую часть трубы в широкой части трубы возникает повышение давления, связанное с инерцией жидкости. Эта разность давлений в разных точках трубы (или струи) и лежит в основе описанных опытов.

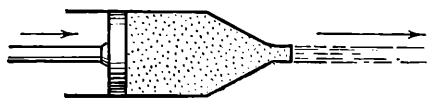


Рис. 198. Превращение энергии при сужении потока.

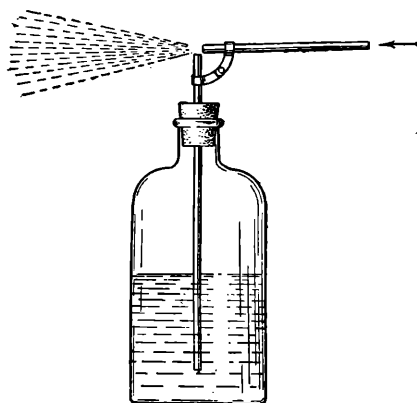


Рис. 199. Пульверизатор.

На рис. 198 поясняется это превращение форм передачи энергии. Поршень совершает работу над жидкостью. Энергия поршня переходит в кинетическую энергию вытекающей струи. Около поршня энергия передается в форме работы, а в струе — в форме кинетической энергии.

Уменьшение давления в суженной части струи жидкости или газа широко используется в технике. Вот некоторые примеры.

1) На рис. 199 изображен пульверизатор, которым пользуются в парикмахерских для распыления одеколona. Струя воздуха проносится мимо конца трубочки, опущенной в одеколон. В этом месте

*) На рисунке выделен объем около оси трубы в виде цилиндра (или призмы). Конечно, такая форма выделенного объема сохраняется в трубе переменного сечения очень малое время, но для нашего рассуждения это не существенно.

Связь давления и скорости, объясненная нами с помощью второго закона Ньютона, конечно, находится в согласии с законом сохранения энергии.

Представим себе, например, что на входе трубы находится поршневой насос, а в конце трубы — турбина, отбирающая энергию от потока воды. Передача энергии от насоса к турбине происходит в двух формах. Во-первых, если жидкость в трубе находится под давлением, то насос совершает над жидкостью работу, а жидкость совершает работу над лопастями турбины. Кратко мы можем сказать, что энергия передается в форме работы. Во-вторых, жидкость в потоке обладает кинетической энергией, которая вместе с потоком жидкости переносится от насоса к турбине. В местах сужения трубы доля кинетической энергии в общем переносе энергии возрастает, а доля работы уменьшается, что и соответствует уменьшению давления.

получается сужение струи воздуха, что вызывает уменьшение давления в ней. Атмосферное давление вгоняет одеколон в трубку.

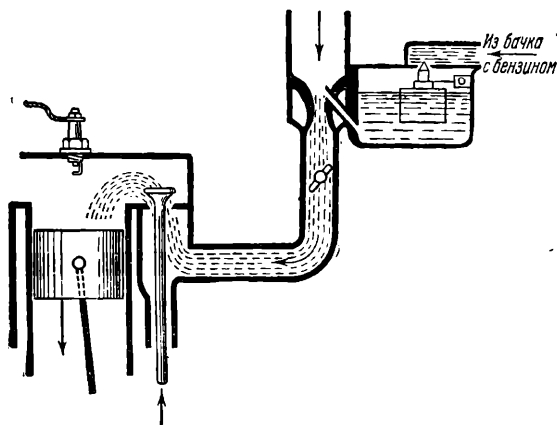


Рис. 200. Схема устройства карбюратора.

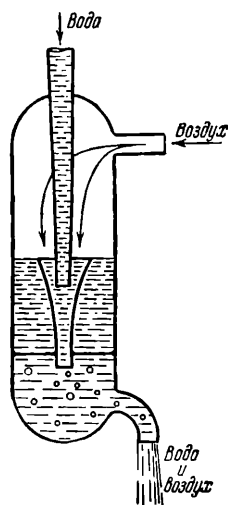


Рис. 201. Схема устройства водоструйного насоса.

Одеколон попадает в струю воздуха в виде мелких капель. Сходное с пульверизатором устройство имеется в карбюраторах двигателей внутреннего сгорания, где струя воздуха засасывает бензин (рис. 200).

2) На рис. 201 изображен водоструйный насос, служащий для отсасывания воздуха из сосудов. Струя воды, вырываясь из сопла, увлекает за собой воздух из окружающего пространства.

Упражнения

164. Объясните действие игрушки, изображенной на рис. 202. Легкий пластмассовый шарик держится в струе воздуха, выдуваемой из трубки.

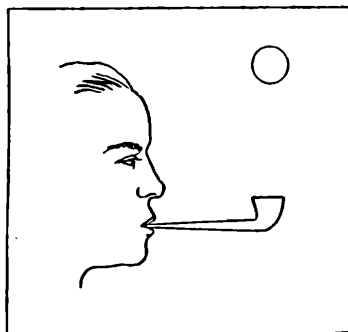


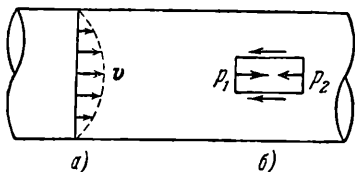
Рис. 202. Легкий шарик держится в струе воздуха, выдуваемой из трубки.

165. Почему две стоящие рядом на якорях баржи, между которыми протекает вода реки, стремятся сблизиться?

166. Почему ураган поднимает вверх крыши домов?

§ 135. Течение вязкой жидкости по трубам и щелям. При течении жидкости по трубе постоянного сечения наблюдается постепенное изменение давления вдоль трубы. Давление при входе в трубу больше, чем при выходе из трубы. Это явление налагается на рассмотренное в предыдущем параграфе явление падения давления в местах сужения трубы и особенно существенно для длинных труб. Чем оно вызывается?

В этом параграфе мы ограничимся медленным течением по узким трубочкам (или щелям, но мы для определенности будем говорить о трубочках). Примеры: течение воды или нефти по порам грунта, движение воздуха по порам строительных материалов.



Как мы уже говорили, если течение достаточно медленное или вязкость жидкости велика, течение происходит слоями, скользящими друг по другу (ламинарное течение). Слой, прилегающий к стенкам трубочки, прилипает к ней и неподвижен, большую скорость имеет жидкость около оси трубочки (рис. 203).

Рис. 203. Течение вязкой жидкости в трубочке: а) скорость жидкости v в разных точках сечения; б) силы, действующие на выделенный объем. Сумма сил равна нулю, если $p_1 > p_2$.

Рассмотрим небольшой объем жидкости в центре трубочки.

Так как он движется быстрее, чем окружающие слои жидкости, то силы трения между слоями жидкости действуют на этот объем в направлении, показанном стрелками (замедляют его движение). Трение между слоями жидкости, как мы уже говорили, называется вязкостью. Так как выделенный объем жидкости в трубе постоянного сечения движется равномерно, то сумма действующих на него сил равна нулю. Действие сил вязкости компенсируется разностью давлений в точках передней и задней граней выделенного объема (p_1 больше p_2 на рисунке). Таким образом, давление на оси трубы не есть постоянная величина, давление больше в тех точках, которые ближе к входному концу трубы и меньше в тех точках, которые ближе к выходному. Возникает разность давлений на входе и выходе трубы, пропорциональная длине трубы. Заметим, что силы вязкости, действующие между слоями жидкости, имеют важное отличие от сил трения между твердыми телами. Для твердых тел существует трение покоя, а сила трения движения мало зависит от скорости. Жидкость приходит в движение под действием самых малых сил. Силы трения между слоями жидкости (а значит, и разность давлений на входе и выходе трубы) возрастают прямо пропорционально скорости течения.

§ 136. **Вихревое движение жидкостей в трубах.** В большинстве технических применений (водопровод, газопровод, котлы и т. п.) движение жидкостей в трубах не ламинарное, а вихревое (турбулентное). В этом случае работа, которая необходима для «проталкивания» жидкости через длинную трубу постоянного сечения, тратится на образование вихрей. Одновременно с образованием вихрей происходит и их уничтожение силами вязкости, сопровождаемое нагреванием жидкости. Образование вихрей приводит к увеличению скорости нагревания жидкости по сравнению с ламинарным течением с таким же расходом, а значит, к увеличению работы «проталкивания» и к увеличению разности давлений на входе и выходе трубы.

Из-за очень сложного характера вихревого движения в настоящее время математические методы его изучения широко дополняются экспериментальными методами.

§ 137. **Лобовое сопротивление при движении твердых тел в жидкости.** Движущееся в жидкости тело встречает так называемое лобовое сопротивление, зависящее от скорости. Закономерности этого явления аналогичны закономерностям, определяющим разность давления между входом и выходом трубы.

При очень малых скоростях сопротивление исчезающе мало, так как, в отличие от твердых тел, жидкости не имеют трения покоя. Малейшее усилие, приложенное к массивной бarge, стоящей на воде, приводит ее в движение с ускорением, пропорциональным приложенной силе. При возрастании скорости сила сопротивления пропорциональна скорости (и обусловлена вязкостью). На рис. 204 показан опыт с падением маленьких стальных шариков одинакового размера в воде и в глицерине. Падение в обоих случаях после короткого промежутка времени становится равномерным, т. е. вязкое сопротивление уравнивает силу тяжести; в глицерине скорость падения меньше, что показывает, что в более вязкой жидкости сила лобового сопротивления и сила тяжести уравниваются при меньшей скорости.

При дальнейшем возрастании скорости начинается образование вихрей. Образование вихрей сзади движущегося в воде весла проявляется в виде вихревых воронок на поверхности. Вихри в воздухе легко обнаружить на таком опыте (рис. 205). Поместим в быстром потоке воздуха (например, на сильном ветру) пластинку, рядом с ней привязанную к спице нитку. Мы видим, что нитка трепещет, заворачивая за пластинку. На рис. 206 приведена

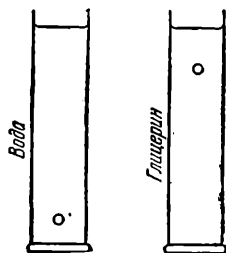


Рис. 204. Падение шариков в воде и в глицерине.

фотография вихрей, возникающих при обтекании шара (сфотографированы струйки краски в воде).

Лобовое сопротивление, обусловленное образованием вихрей, пропорционально квадрату скорости движения тел. Это легко

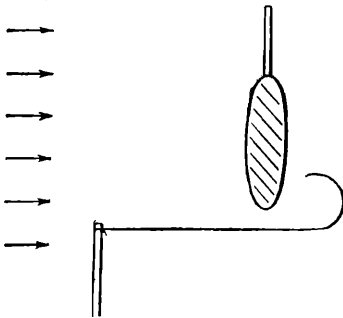


Рис. 205. Нитка заворачивает за пластину, помещенную в потоке воздуха, и трепещет.

понять, применив закон сохранения энергии. Тело равномерно движется, если к нему приложена сила, равная лобовому сопротивлению. Работа этой силы на единице пути равна по закону сохранения энергии кинетической энергии образовавшихся на этом же пути вихрей (то, что энергия вихрей в конце концов переходит из-за вязкости во внутреннюю энергию жидкости — нагревание жидкости, для данного рассуждения не существенно, так как вихри уносятся течением далеко от тела).

При изменении скорости движения тела в какое-либо число раз (обозначим это число n) размеры и число вихрей, образуемых на единице пути, не изменятся.

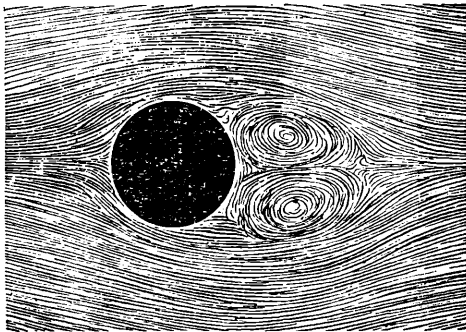


Рис. 206. Фотография вихрей при обтекании шара (вода со струйками краски).

Скорость вращения вихрей изменится в n раз. Кинетическая энергия вихрей изменится в n^2 раз, во столько же раз изменится лобовое сопротивление. Поэтому лобовое сопротивление, обусловленное образованием вихрей, должно быть пропорционально квадрату скорости движения тела.

Лобовое сопротивление движению самолетов, автомашин и т. п. обычно изучается на уменьшенных моделях в специальных устрой-

ствах, называемых аэродинамическими трубами (рис. 207). В аэродинамической трубе неподвижную модель самолета помещают в быстрый поток воздуха, созданный вентилятором (или иными методами), и измеряют действующую на модель силу. С помощью подобных исследований удастся найти так называемые обтекаемые формы, оказывающие при данном поперечном сечении особо малое лобовое сопротивление. На рис. 208 показана обтекаемая форма, имеющая лобовое сопротивление в 25 раз меньше, чем круг того же диаметра.

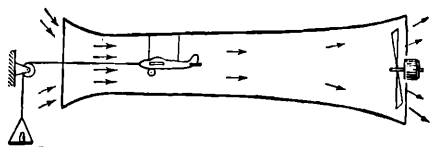


Рис. 207. Устройство простейшей аэродинамической трубы.

При скоростях движения самолета, превышающих скорость звука в воздухе (1200 км/час), возникают новые явления. Значительная часть энергии тратится на сжатие воздуха перед носом самолета, который как бы не успевает расступиться (так как скорость большинства молекул, близкая к скорости звука, в этом случае уже не превосходит скорости самолета).

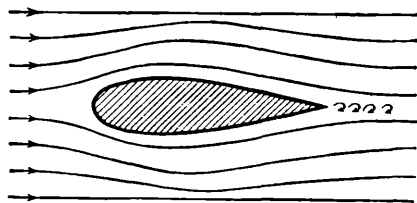


Рис. 208. Линии тока вокруг тела обтекаемой формы. Позади этого тела вихри почти не образуются.

Область сжатия воздуха расширяется, образуя так называемую ударную волну. Все посетители авиационных парадов в Тушино помнят громовые раскаты ударных волн, возникающих при пролете над аэродромом советских сверхзвуковых самолетов. На рис. 209 приведена «теневая» фотография ударной волны, возникшей при движении пули в воздухе со скоростью, вдвое превышающей скорость звука. Затрата энергии на образование ударных волн может существенно увеличить лобовое сопротивление. Для уменьшения этого вредного

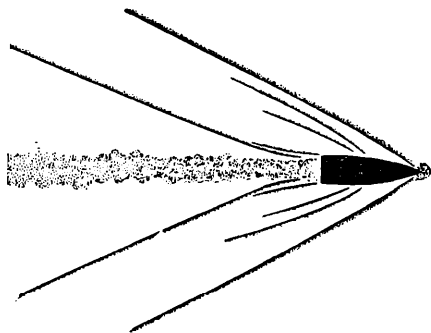


Рис. 209. Фотография пули, летящей со скоростью около 600 м/сек, и образованных ею ударных волн. Фотография произведена методом тени при свете очень короткой вспышки.

энергии на образование ударных волн может существенно увеличить лобовое сопротивление. Для уменьшения этого вредного

эффекта носовая часть ракет и сверхзвуковых самолетов делается заостренной, крылья снабжаются заостренной кромкой.

Часть аэродинамики, изучающая такие движения газа, при которых существенно учитывать сжимаемость газа, называется газодинамикой. Газодинамика нашла себе применение при проектировании сверхзвуковых самолетов и ракет, паровых и газовых турбин, ракетных двигателей, при изучении явлений, сопровождающих взрывы.

§ 138. Подъемная сила крыла самолета. Когда самолет равномерно движется в воздухе, на него действуют четыре попарно уравновешивающиеся силы (рис. 210):

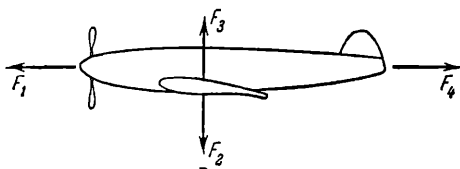


Рис. 210. Четыре силы, действующие на самолет в воздухе: F_1 — тяга винта, F_2 — вес самолета, F_3 — подъемная сила крыла самолета, F_4 — лобовое сопротивление.

1) сила тяжести, направленная вертикально вниз; 2) подъемная сила, направленная вертикально вверх; 3) тяга винта, направленная вперед; 4) лобовое сопротивление, направленное назад.

Поперечный разрез плоскости крыла имеет форму, показанную на рис. 211, а. При движении крыла в воздухе с задней острой кромки его все время срываются вихри, как показано на

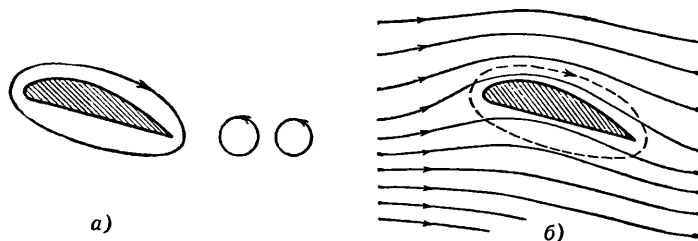


Рис. 211. а) Вихри, срываются с задней кромки крыла, и вихрь вокруг крыла; б) поток воздуха, обтекающий крыло, представляет собой наложение набегающего потока воздуха и присоединенного вихря. Над крылом скорость воздуха увеличивается, под крылом уменьшается, сзади крыла воздух отбрасывается вниз.

рисунке. Но возникновение вихря одного направления (на рис. 211, а — против стрелки часов) по законам механики должно сопровождаться появлением вихря противоположного направления (по стрелке часов). Этот второй вихрь образуется, как показано на рисунке, вокруг крыла и перемещается вместе с крылом. Созда-

тель теории подъемной силы самолета русский ученый Н. Е. Жуковский назвал этот второй вихрь присоединенным вихрем. Наличие присоединенного вихря ведет к тому, что над крылом скорость движения воздуха относительно крыла больше, чем скорость набегающего потока воздуха, а под крылом — меньше. Вследствие этого над крылом образуется область пониженного давления, а под крылом — повышенного. Разность давлений воздуха снизу и сверху крыла обуславливает подъемную силу. Можно на то же явление посмотреть и несколько с иной точки зрения. Наложение присоединенного вихря (с вращением по часовой стрелке на рис. 211) на набегающий поток воздуха (слева направо на рис. 211) приводит к тому, что воздух сзади крыла отбрасывается вниз. По третьему закону механики это приводит к образованию подъемной силы. Как показал Жуковский, скорость присоединенного вихря, а значит и подъемная сила, зависит от формы крыла и «угла атаки». Так называется угол между плоскостью крыла и направлением набегающего потока воздуха.

§ 139. Винты, вентиляторы, водяные и воздушные двигатели пропеллерного типа. Те же физические принципы, которые лежат в основе теории подъемной силы крыла самолета, могут быть применены для объяснения действия ряда других важных технических устройств.

Сила тяги самолетного или судового винта может быть объяснена также как подъемная сила крыла, так как каждая лопасть винта подобна крылу самолета и при своем вращательном движении отбрасывает воздух или воду вдоль оси вращения.

Аналогичным образом объясняется работа вентиляторов.

В ветряных двигателях и некоторых типах гидротурбин мы имеем пример устройств, действующих с использованием того же принципа для отбора энергии от потока. На рис. 212 схематически изображены турбина пропеллерного типа (турбина Каплана) и схема гидроэлектростанции.

Ротор (вращающаяся часть) турбины пропеллерного типа внешне похож на винт большого судна. Само название напоминает об устаревшем названии «пропеллер» для самолетного винта. На лопасти ротора гидротурбины сверху набегающий поток воды и толкает каждую лопасть в горизонтальном направлении с силой, зависящей от присоединенного вихря. Сложение сил, действующих на лопасти, создает вращательный момент, передаваемый при помощи вертикального вала ротору генератора электрического тока.

В турбину Каплана вода поступает с малой скоростью и под избыточным давлением, равным $p = \rho \cdot g \cdot h$, где ρ — плотность воды, h — высота уровня воды в водохранилище над турбиной. На выходе турбины давление падает до атмосферного. Работа,

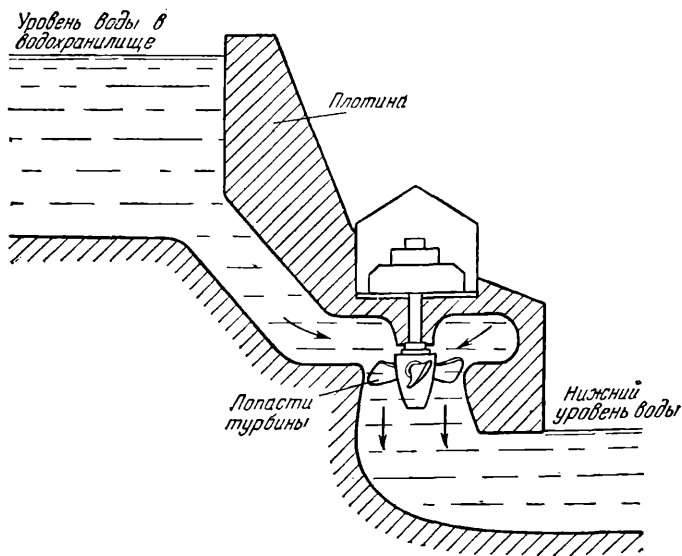


Рис. 212. Схема гидроэлектростанции с турбиной пропеллерного типа. Давление воды над турбиной больше, чем давление под турбиной.

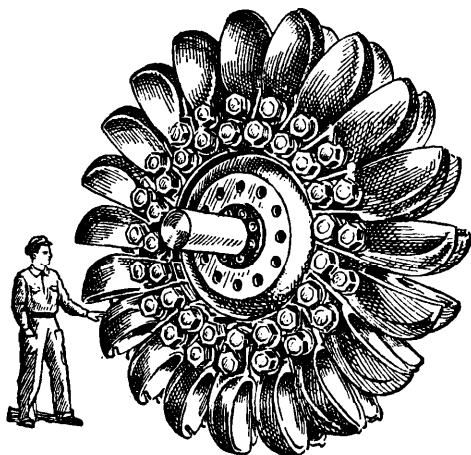


Рис. 213. Вид рабочего колеса мощной активной турбины Пельтона.

совершаемая потоком воды в единицу времени (мощность), равна произведению перепада давления на расход воды $Q = S \cdot v$.

Существуют также турбины, в которых энергия потока еще до входа в турбину преобразуется при сужении потока в кинетическую энергию, которую вода отдает лопаткам, «отражаясь» от них. Так, например, в турбине Пельтона (рис. 213) лопатки имеют форму ковшей. Струя воды ударяет в одну половину ковша и выходит из ковша, повернув на 180° (рис. 214). Если окружная скорость движения ковшей составляет 0,5 от скорости струи, струя полностью отдает свою кинетическую энергию. Такие турбины часто называют «турбины активного типа», а турбины типа турбины Каплана — реактивного типа.

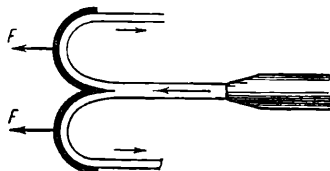


Рис. 214. Отражение струи от двойного ковша турбины Пельтона (в разрезе).

В обоих случаях вода выходит из турбины с малой скоростью и под малым давлением. Если ротор турбины остановить, отдача энергии турбине прекращается и скорость вытекающей из турбины воды увеличивается.

В настоящее время в Советском Союзе работают турбины Братской ГЭС (на реке Ангаре) с мощностью более 220 тыс. *квт* и намечено сооружение Красноярской ГЭС на реке Енисее с мощностью турбин до 500 тыс. *квт*.

У п р а ж н е н и я

167. Ширина реки составляет 500 м, средняя глубина 6 м, средняя скорость 2 м/сек. Определить расход. Вода поступает в турбины с высоты 20 м. Определить мощность при кпд 80%.

§ 140. Суда на подводных крыльях. Неожиданное применение явление подъемной силы крыла получило недавно в судостроении.

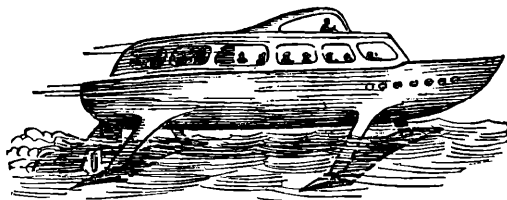


Рис. 215. Судно на подводных крыльях.

Созданы суда на подводных крыльях. Общий вид и схема одного из таких судов в движении показаны на рис. 215. Весь корпус судна

находится над водой, опираясь с помощью тонких обтекаемых стоек на крылья, которые находятся под водой. При движении крыла в воде возникает подъемная сила. Преимущество судов на подводных крыльях — возможность достижения высоких скоростей, так как лобовое сопротивление крыльев может быть гораздо меньше, чем всего корпуса судна.

В 1957 г. был спущен на воду первый советский речной теплоход на подводных крыльях «Ракета». Мощность двигателя «Ракеты» 750 л. с., максимальная скорость 70—73 км/час. Можно ожидать, что в недалеком будущем появятся речные, морские и океанские суда на подводных крыльях, которые будут передвигаться со скоростью 100—150 км/час.

РАЗДЕЛ II

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕПЛОТА

ГЛАВА XI

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ И МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ГАЗАХ, ЖИДКОСТЯХ И ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

§ 141. Природа тепловых явлений. Каким образом одно и то же вещество, например вода, может быть и твердым, и жидким, и газообразным? Почему тела могут сжиматься и расширяться? Как объяснить текучесть жидкостей и газов? Что происходит с телом, когда оно нагревается?

Над подобными вопросами задумывались еще древние греки свыше 2000 лет назад. И тогда уже высказывалось предположение, что окружающие нас тела только кажутся сплошными, а на самом деле состоят из мельчайших, не видимых глазом частичек. Древние мыслители думали, что эти частички не могут быть разделены на еще более мелкие части, а потому называли их «атомами», т. е. неделимыми. В то время представления о частицах, составляющих тела, были лишь догадками, не опиравшимися ни на какие опытные исследования природы. Затем эти представления были оставлены.

В средние века представляли себе изменения, которые происходят с телами при нагревании и при других тепловых явлениях, как результат действия какого-то невидимого вещества, которое при нагревании тела входит в него, а при охлаждении выходит. Это воображаемое вещество называли **теплородом**.

Среди немногих дальновидных исследователей природы, придерживавшихся в XVIII в. атомистических взглядов, наиболее выдающимся был наш гениальный соотечественник М. В. Ломоносов. В своих сочинениях он высказывал идеи, предвосхитившие развитие науки более чем на сто лет. Ломоносов одним из первых указал, что тепловые явления суть изменения в движении и расположении тех невидимых частиц, из которых состоят тела.

Обсуждая вопрос, почему мы не видим этого движения, Ломоносов писал: «...нельзя также отрицать движение там, где глаз его не видит; кто будет отрицать, что движутся листья и ветви деревьев в лесу при сильном ветре, хотя издали он не заметит никакого

движения. Как здесь из-за отдаленности, так и в горячих телах, вследствие малости частичек вещества, движение скрывается от взоров».

Хотя представления Ломоносова о характере движения частиц не были вполне правильными, все же он с поразительной ясностью раскрыл сущность различных тепловых явлений. Передачу тепла от одного места тела к другому он рассматривал как передачу движения от одних частиц к другим. При этом Ломоносов указывал, что увеличение скорости одних частиц должно сопровождаться уменьшением скорости частиц, передавших им движение. Этим он объяснял охлаждение горячих тел, от соприкосновения с которыми нагреваются холодные тела. Ломоносов впервые применил представление о движении частиц к объяснению плавления тел. По его мысли, движение частиц противодействует их сцеплению. При нагревании твердых тел движение составляющих их частиц ускоряется и, наконец, достигает такой степени, что сцепление частиц нарушается и тело плавится. Замечательно ясно представляет себе Ломоносов строение газов. Он писал: «...ясно, что отдельные атомы воздуха в нечувствительные промежутки времени сталкиваются с другими соседними в беспорядочной взаимности; когда одни находятся в соприкосновении, другие отскакивают друг от друга и снова сталкиваются с другими, более близкими, снова отскакивают, так что стремятся рассыпаться во все стороны, постоянно отталкиваемые друг от друга такими очень частыми взаимными ударами».

В дальнейшем мы увидим, насколько взгляды М. В. Ломоносова близки к современным.

§ 142. Молекулы. В настоящее время идеи о строении вещества, которые высказывал М. В. Ломоносов, полностью восторжествовали. Предположение, что все тела состоят из невидимых вечно движущихся частиц, теперь неопровержимо доказано. Эти частицы получили название *молекулы*. Существование молекул стало общепризнанным лишь в XX в. благодаря чрезвычайному усовершенствованию физических методов исследования. Удалось подсчитать размеры молекул, число молекул в 1 см^3 и т. п. Эти подсчеты, проведенные разнообразными способами, привели к согласующимся результатам. В некоторых случаях можно наблюдать действия, вызванные отдельными молекулами; удалось даже сфотографировать очень крупные молекулы *).

Размеры молекул оказались невообразимо малы. Например, диаметр молекулы водорода составляет $0,00000023 \text{ мм}$, азота — $0,00000031 \text{ мм}$. Необычайную малость молекул можно представить себе с помощью сравнения: молекула во столько раз меньше була-

*) С помощью электронного микроскопа.

вочной головки, во сколько раз булавочная головка меньше самых высоких гор на Земле.

О малых размерах молекул можно было догадываться и без вычислений, по чрезвычайно большой делимости веществ. Например, золото можно расплющивать в листочки толщиной $0,0001$ мм; масло может растекаться по поверхности воды, образуя пленку толщиной $0,000002$ мм.

Даже очень маленькие тела содержат невообразимо большое число молекул. В капельке воды диаметром примерно в $0,1$ мм содержится 10^{16} молекул, т. е. в миллионы раз больше, чем число людей на Земле. В 1 см³ газа при нормальных условиях содержится $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул.

У разных веществ молекулы различны. Если вещество сложное, т. е. состоит из нескольких простых веществ, то, как показывает химия, каждая его молекула состоит из атомов этих простых веществ. Например, молекула воды состоит из атомов кислорода и водорода.

У п р а ж н е н и я

168. На основании современных исследований считают, что расстояние между центрами наиболее близких атомов золота в металле равно $2,9 \cdot 10^{-8}$ см. Сколько атомов уложится по толщине листочков, получаемых золотобойцами (10^{-5} см)?

169. Принимая молекулу газа за шарик диаметром $0,3$ мкм, рассчитайте, какую часть объема 1 см³ газа при 0° С и 760 мм рт. ст. занимают его молекулы (объем шара вычисляется по формуле $V = \frac{\pi d^3}{6}$).

170. Представим себе, что все молекулы в 1 см³ газа (см. упражнение 169) выстроены цепочкой вплотную друг к другу. Какова длина этого ряда? Сравните ее с длиной меридиана Земли.

§ 143. Движение молекул. Мы уже отметили, что молекулы находятся в непрерывном беспорядочном движении. Какие явления указывают на это?

Начнем с газов. Наличие непрерывного беспорядочного движения газовых молекул следует, прежде всего, из стремления газов беспредельно расширяться. Газ заполняет все мельчайшие закоулки предоставленного ему объема. На препятствия, мешающие газу расширяться, он оказывает давление. Давление газа объясняется ударами его молекул. Отдельных ударов молекул мы не замечаем: они слишком слабы. Но так как общее число этих ударов в секунду очень велико, то получается заметный результат.

На движение молекул газа указывает также явление диффузии и флуидности. Диффузией называется самопроизвольное перемешивание веществ. Если, например, в помещении внести пахучее вещество, скажем нафталин, то даже в совершенно спокойном воздухе его запах через некоторое время распространится по всему помещению.

Если внизу стакана находится крепкий раствор сахара, а наверху — чистая вода, то и при полном отсутствии движения жидкости сахар постепенно разойдется по всему объему жидкости. Однако на это потребуется много недель. Диффузия в жидкостях происходит гораздо медленнее, чем в газах. Еще во много раз медленнее происходит диффузия в твердых телах. При диффузии молекулы одного вещества проникают внутрь другого, а это возможно только при их движении.

Движением молекул можно объяснить также самопроизвольное проникновение молекул газа в жидкость, над которой он находится. Например, кислород воздуха проникает внутрь водоемов.

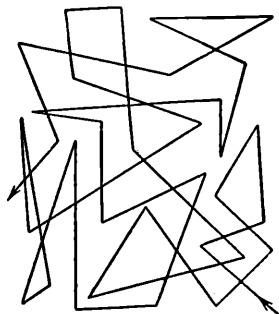


Рис. 216. Путь молекулы воздуха (увеличено во много тысяч раз).

Укажем еще на следующее замечательное явление. Наблюдая в микроскоп очень мелкие частички, находящиеся в газе или в жидкости (например, частицы дыма в воздухе или крупинки краски в воде), можно видеть, что эти крупинки все время беспокойно движутся то в одну, то в другую сторону. Чем меньше крупинки, тем оживленнее это движение. Названное в честь открывшего его в 1827 г. английского ботаника Броуна броуновым

движением, оно долгое время оставалось непонятым. В настоящее время выяснено, что броуново движение — результат ударов молекул. Так как крупинки очень малы, то на них сказывается случайное неравенство числа одновременных ударов молекул с разных сторон и крупинка подается то в одну, то в другую сторону.

Как движутся молекулы газов? Так как они беспрестанно сталкиваются друг с другом и меняют при этом направления движения, то их пути имеют сложную, зигзагообразную форму (рис. 216). Скорости движения молекул могут быть весьма различными. Обычно, говоря о скорости молекул, имеют в виду некоторую среднюю скорость. Измерения показывают, что при комнатной температуре скорости движения молекул газа весьма велики, составляя несколько сотен метров в секунду. Но это, конечно, вовсе не значит, что молекула газа, находящаяся в каком-либо месте, через секунду удалится от этого места на несколько сотен метров. Вследствие зигзагообразного движения газовые молекулы при обычных условиях, например в спокойном воздухе, продвигаются в каком-либо определенном направлении (диффузия) очень медленно.

Несколько иной характер имеет движение молекул в твердых телах и в жидкостях.

§ 144. Межмолекулярные силы. Вспомним, в чем заключается основное отличие газов от жидкостей и твердых тел. Газы стремятся безгранично расширяться и занимают определенный объем только вследствие сопротивления окружающих тел, например стенок сосуда. Жидкости и твердые тела не расширяются сами по себе даже в том случае, если им ничто не мешает. Более того, если мы начнем их растягивать, стремясь увеличить их объем, то они окажут значительное сопротивление.

Что же заставляет жидкости и твердые тела занимать определенный объем, одинаково сопротивляясь и растяжению, и сжатию?

Это объясняется тем, что молекулы взаимно притягиваются и в то же время отталкиваются друг от друга. При малых расстояниях между молекулами преобладают силы отталкивания. По мере увеличения расстояния между ними и отталкивание, и притяжение убывают, но силы отталкивания убывают в большей мере, чем силы притяжения. Поэтому на некотором расстоянии силы притяжения и отталкивания делаются равными и взаимно уравновешивают друг друга. На еще большем расстоянии силы притяжения получают перевес. В таких случаях говорят, что между молекулами действуют силы сцепления.

Дело осложняется тем, что молекулы непрерывно движутся, то сближаясь, то отдаляясь друг от друга. Поэтому в одних частях тела (ничтожно малых по сравнению со всем телом) молекулы взаимно отталкиваются, в других — притягиваются. Эти сближения и удаления молекул в отдельных и очень малых частях тела никак не влияют на общий его объем, который при данной температуре и при постоянстве внешних деформирующих сил остается неизменным.

Что же будет, если тело деформировать (например, сжать). В этом случае среднее расстояние между молекулами уменьшится и силы отталкивания будут превосходить силы притяжения. Тело в целом будет стремиться расширяться. При растяжении тела оно, наоборот, будет стремиться сжаться.

Не менее сложен вопрос о расширении тел при нагревании. Определенной средней скорости движения молекул соответствует и определенный объем тела. Увеличение скорости молекул, т. е. повышение температуры тела, тоже ведет к нарушению равновесия между стремлением молекул сблизиться в одном месте (там, где они слишком отдалились) и отдалиться в другом (там, где они слишком сблизилась). Когда объем увеличится, равновесие установится снова. Это связано с особенностями зависимости сил притяжения и отталкивания молекул от расстояния между ними, рассматривать которые мы не будем.

У разных веществ силы сцепления молекул различны; именно этим объясняется различная твердость веществ.

Почему же в газах силы сцепления молекул не проявляются? Дело в том, что в газах молекулы в среднем находятся значительно

дальше друг от друга, чем в твердых и жидких телах, а молекулярные силы действуют лишь на очень малых расстояниях. Действительно, если приставить друг к другу части разбитого стакана, то они не удержатся друг около друга. Ничтожно малой щели в стакане (меньше 10^{-6} см) уже достаточно, чтобы притяжение молекул стекла совершенно ослабло. Если же стекло нагреть до размягчения, то части стакана слипнутся, так как теперь гораздо большее число молекул окажется на таком расстоянии, что их притяжение будет заметно.

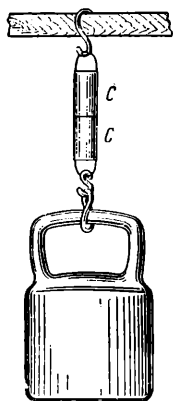


Рис. 217. Свинцовые бруски *СС*, прижатые друг к другу свежими срезами, слипаются и выдерживают тяжесть большой гири.

Мягкие сплошные материалы (например, разного рода замазки) слипаются и без нагревания. На рис. 217 показано, какую гирю могут выдержать два куска свинца, приложенные друг к другу свежими *) срезами и слипшиеся.

Теперь становится более ясным различие между строением газов, твердых тел и жидкостей. Самое простое строение имеют газы. Газы — это собрания молекул, вообще говоря, настолько далеких друг от друга, что взаимодействие между ними мало; во многих случаях его можно считать отсутствующим. Только при столкновениях молекул они взаимно притягиваются и отталкиваются. Остальное время, гораздо более значительное, они движутся по закону инерции прямолинейно и равномерно (см. рис. 216). Отметим кстати, что среднее расстояние, которое пройдет молекула между двумя последовательными столкновениями, называется **средним свободным пробегом** молекулы.

В твердых телах молекулы колеблются около некоторых определенных положений, причем с очень малым размахом. Впрочем, незначительное число молекул твердых тел все же перемещается по телу на некоторые расстояния.

Наиболее сложное строение имеют жидкости. Строение жидкостей является промежуточным между строением твердых тел и газов; вообще говоря, оно более сходно со строением твердых тел, чем газов.

По современным представлениям жидкость состоит из очень мелких областей, в которых ее молекулы сохраняют, подобно молекулам твердого тела, неизменное взаимное расположение. Однако молекулы жидкости колеблются около положений равновесия,

*) Старые срезы покрываются слишком твердыми окислами свинца и потому не слипаются.

вообще говоря, недолго. Спустя ничтожную долю секунды молекула, находящаяся на границе области, срывается и начинает блуждать между областями, а затем снова задерживается в какой-либо области. Таким образом, области упорядоченного расположения молекул в жидкости непрерывно теряют одни молекулы и пополняются другими, меняют при этом свою форму и перемещаются. Этим и объясняется текучесть жидкости.

§ 145. Движение молекул и температура. Уже Ломоносов указывал, что при нагревании скорость движения молекул увеличивается. В случае газов это особенно очевидно. Простые наблюдения показывают, что давление газа, находящегося в замкнутом сосуде, при нагревании увеличивается, а при охлаждении уменьшается (подробнее об этом говорится в § 161). Поскольку давление газа возросло, стало быть, его молекулы ударяют в стенки чаще и сильнее. Значит, при нагревании газа скорость молекул возрастает. Наоборот, при охлаждении газа скорость молекул газа уменьшается.

С этим объяснением хорошо согласуется то наблюдение, что при повышении температуры скорость диффузии во всех веществах увеличивается, а броуново движение становится более оживленным.

При повышении температуры скорость беспорядочного движения молекул увеличивается не только в газах, но и в твердых и в жидких телах:

Мы уже знаем (§ 84), что кинетическая энергия тел тем больше, чем больше скорость. Отсюда следует, что *при повышении температуры увеличивается средняя кинетическая энергия беспорядочного движения молекул.*

§ 146. Внутренняя энергия тел в свете молекулярной теории. Мы познакомились в § 89 с понятием внутренней энергии как величины, определяемой внутренним состоянием тела. В настоящем разделе мы будем заниматься только такими изменениями тел, при которых внутреннее состояние самих молекул в конечном счете не меняется, а меняется лишь движение молекул и их взаимное расположение. Сюда относятся изменения температуры, объема и формы тел, переход тел из твердого состояния в жидкое или газообразное и обратно. Изменения внутреннего состояния самих молекул связаны с электрическими, магнитными, оптическими и другими явлениями, которые мы пока не будем принимать во внимание. При таком ограничении можно сказать, что изменение внутренней энергии тела есть изменение суммы кинетических и потенциальных энергий всех молекул, составляющих это тело.

Потенциальная энергия молекул при небольших расстояниях между молекулами резко зависит от этих расстояний. Это относится к твердым и жидким телам. При нагревании твердых и жидких

тел одновременно увеличиваются и кинетическая, и потенциальная энергии молекул. В газах потенциальная энергия молекул при увеличении расстояния между ними почти не меняется. При нагревании газов, независимо от того, расширяются они при этом или нет, увеличивается только кинетическая энергия молекул.

§ 147. Явления на границе жидкость — газ. Как известно, под действием силы тяжести жидкость принимает форму сосуда, в который она налита, причем ее свободная поверхность располагается перпендикулярно к направлению силы тяжести, т. е. горизонтально. Что произойдет, если создать условия, при которых сила тяжести совсем или почти совсем не будет сказываться?

Произведем несколько опытов. Поместим на стеклянную пластинку настолько малую каплю ртути, что

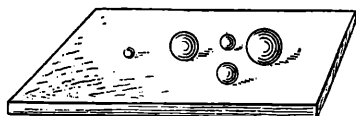


Рис. 218. Капельки ртути на стекле принимают форму шариков.

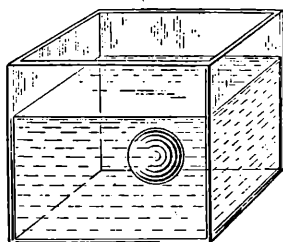


Рис. 219. Капля анилина в растворе поваренной соли имеет форму шара.

вес ее не будет играть заметной роли. Мы увидим, что капля примет форму шара (рис. 218). Раздавим ее второй пластинкой в плоскую лепешку. Если снять верхнюю пластинку, капля вновь примет форму шара.

Впустим каплю анилина в раствор поваренной соли такой крепости, чтобы анилин не тонул и не всплывал. В этом случае вес анилина не имеет значения, так как он уравновешен выталкивающей силой раствора. Мы увидим, что капля анилина тоже примет форму шара (рис. 219).

Поместим в пламя спиртовой или газовой горелки тонкий острый отломок стеклянной трубки и расплавим его; жидкое стекло приобретет округлую форму.

Мы убеждаемся, что в условиях, при которых сила тяжести не имеет значения (например, уравновешена другой силой), жидкость принимает форму шара (сферическую). Но сферическая поверхность меньше любой другой поверхности, охватывающей тот же объем. Значит, *жидкость стремится уменьшить свою свободную поверхность*.

Стремление жидкости уменьшить свою поверхность еще нагляднее видно из такого опыта. Соединим ниткой противоположные

точки проволочного кольца (рис. 220, а). Опустив кольцо в мыльный раствор, мы получим пленку, на которой будет лежать нитка. Если прорвать пленку с одной стороны от нитки, то другая часть пленки потянет нитку в свою сторону (рис. 220, б).

Чем же объясняется стремление жидкости уменьшить свою поверхность? Обратимся к рис. 221, на котором показаны молекула А, находящаяся на границе жидкость — воздух, и молекула В, находящаяся внутри жидкости. Молекула В окружена другими молекулами, притягивающими ее со всех сторон. Если в какой-нибудь момент соседние молекулы тянут молекулу В вправо, то через ничтожный промежуток времени

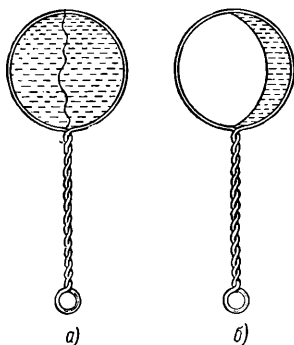


Рис. 220. Проволочное кольцо с мыльной пленкой; б) мыльная пленка, сокращаясь, натягивает нитку.

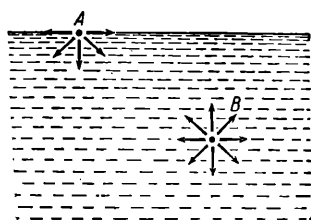


Рис. 221. Молекула В внутри жидкости притягивается соседними молекулами со всех сторон одинаково. Молекула А втягивается внутрь жидкости.

те же молекулы расположатся немного иначе, и может случиться так, что они будут тянуть молекулу В уже влево. Поэтому молекула В движется то в одну, то в другую сторону, и нет никакого направления, в котором она стремилась бы двигаться преимущественно. В ином положении находится молекула А. Со стороны жидкости ее притягивает много молекул, а со стороны воздуха — очень мало. В результате молекула А стремится уйти внутрь жидкости*). Это и проявляется как стремление жидкости уменьшить свою свободную поверхность.

Чтобы увеличить поверхность жидкости, надо произвести работу по вытягиванию молекул жидкости изнутри на поверхность. Отсюда ясно, что молекулы, находящиеся на поверхности, обладают большей потенциальной энергией, чем молекулы внутри жидкости. Увеличение поверхности жидкости связано с увеличением энергии

*) В случае капли анилина, находящейся внутри воды, молекулы воды, попавшие на границу вода — анилин, стремятся уйти внутрь воды, так как они очень слабо притягиваются к молекулам анилина.

жидкости (внутренней энергии). Именно поэтому раздробление жидкости на мелкие капли, о котором говорилось в § 89, ведет к увеличению ее энергии. Отметим, что увеличение свободной поверхности твердых тел (при их раздроблении) также связано с увеличением их внутренней энергии.

У п р а ж н е н и я

171. Какова форма капелек воды, из которых состоит туман?

172. Свинцовую дробь получают, выливая сквозь узкие отверстия свинец с некоторой высоты в воду. Что при этом происходит?

173. Почему волоски кисточки, опущенной в воду, расходятся, а волоски кисточки, вынутой из воды, слипаются?

174. Почему сухой песок рассыпается, а мокрый держится плотным слоем?

§ 148. Поверхностное натяжение. Мы уже знаем, что жидкости стремятся уменьшить поверхность, отделяющую их от газа, пара или от другой жидкости. Одинаково ли это стремление у разных жидкостей? Нет. Это видно из такого опыта. Поверхность воды в сосуде посыпем тальком или другим не тонущим в воде порошком. Пустим на середину сосуда каплю мыльной воды или спирта.

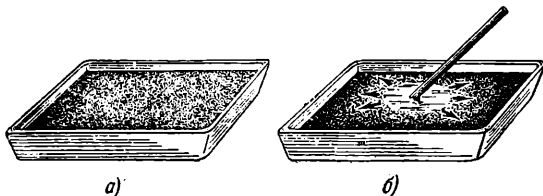


Рис. 222. а) На поверхности воды равномерно насыпан порошок (ликоподий); б) к поверхности воды прикасаются палочкой, смоченной раствором мыла; порошок разбегается во все стороны.

Порошок стремительно разбежится к краям (рис. 222). Очевидно, он увлекается слоем воды. Это значит, что чистая вода имеет большее стремление уменьшить свою поверхность, чем раствор мыла или спирта.

Как охарактеризовать свойства различных жидкостей в этом отношении? Уменьшение поверхности жидкости связано с уменьшением энергии и, следовательно, сопровождается работой межмолекулярных сил сцепления, действующих вдоль поверхности жидкости.

Отношение силы, действующей вдоль поверхности на участок границы жидкости, к длине этого участка называется п о в е р х - н о с т н ы м н а т я ж е н и е м или коэффициентом поверхност-

ного натяжения. Обозначив длину участка границы через l (рис. 223), силу, действующую на этот участок, через F , поверхностное натяжение через σ (греческая буква «сигма»), имеем

$$\sigma = \frac{F}{l}.$$

В системе единиц СИ поверхностное натяжение выражается в н/м. В системе единиц СГС поверхностное натяжение выражается в дин/см.

Очевидно, что $1 \text{ дин/см} = 10^{-3} \text{ н/м}$.

Чтобы определить поверхностное натяжение, нужно измерить силу, действующую на участок границы жидкости. Опыт, схема которого изображена на рис. 224, показывает, как можно сделать это измерение на мыльном растворе. Вес гирьки m вместе с весом перекладины A уравнивает силы поверхностного натяжения, действующие на перекладину по обеим (передней и задней) поверхностям пленки. Обозначив вес гирьки и перекладины P , а длину перекладины l , имеем:

$$P = 2\sigma l.$$

Например, если $P = 400 \text{ дин}$, $l = 5 \text{ см}$, то

$$\sigma = \frac{400 \text{ дин}}{2 \cdot 5 \text{ см}} = 40 \frac{\text{дин}}{\text{см}}.$$

Существует ряд способов точного измерения поверхностного

натяжения, применимых к разным жидкостям, но мы их не будем рассматривать. Приведем значения поверхностного натяжения некоторых жидкостей:

	Температура, °C	Поверхностное
		натяжение, $10^{-3} \frac{\text{н}}{\text{м}}$ или $\frac{\text{дин}}{\text{см}}$
Вода чистая	0	75,5
» »	20	72,5
» »	80	62,6
Раствор мыла	20	40
Спирт (этиловый)	20	22
Ртуть	20	470
Железо расплавленное		450
Жидкий водород	-253	2,1
» гелий	-269	0,12

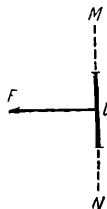


Рис. 223. К определению поверхностного натяжения. MN — граница поверхности жидкости.

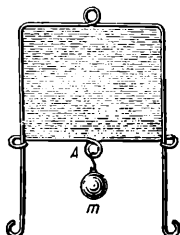


Рис. 224. Прибор для грубого определения поверхностного натяжения мыльного раствора.

Обратим внимание на очень большую величину σ у металлов. Это связано, конечно, с большой твердостью металлов, обусловлен-

ной значительностью сил сцепления молекул в них. У сжиженных газов — водорода и гелия — σ , наоборот, очень мало. Этого надо было ожидать, так как силы молекулярного сцепления в них настолько малы, что водород и гелий являются газами даже при очень низких температурах. Таблица показывает также, что поверхностное натяжение воды при повышении температуры убывает. То же имеет место и в отношении других жидкостей. Это связано с увеличением среднего расстояния между молекулами жидкостей при тепловом расширении, а также с изменением структуры жидкостей при нагревании.

Зная поверхностное натяжение, можно найти работу, которую должны совершить внешние силы, чтобы увеличить поверхность жидкости (при постоянной температуре). Пусть граница длиной l передвинулась на расстояние b . Тогда работа

$$A = Fb.$$

Но $F = \sigma l$. Поэтому

$$A = \sigma lb = \sigma S,$$

где S — увеличение поверхности. Итак, при изменении поверхности на S производится работа σS . Подсчитаем, например, работу раздробления воды на мелкие капли, если известно, что при этом произошло увеличение поверхности на 2000 см^2 :

$$A = 70 \frac{\text{дин}}{\text{см}} \cdot 2000 \text{ см}^2 = 140\,000 \text{ эрг}.$$

У п р а ж н е н и я

175. Накапайте в пробирку один раз 50 капель чистой воды, а в другой раз 50 капель воды с добавкой мыла. Одинаковы ли объемы отмеренных капель? Чем объясняется разница в объемах?

176. Накапайте в пробирку из одного и того же пузырька один раз 50 капель холодной воды, а в другой раз 50 капель горячей воды. Чем объясняется разница объемов отмеренных капель?

177. Каково поверхностное натяжение мыльной воды, если для равновесия перекалдины весом $0,1 \text{ Г}$ и длиной 6 см прибор, изображенный на рис. 224, требуется нагрузить гирькой $0,4 \text{ Г}$?

178. Какую работу надо произвести, чтобы выдуть мыльный пузырь площадью в 200 см^2 ?

179. Какую работу надо совершить, чтобы 1 кг воды при 20°С превратить в водяную пыль, состоящую из капелек диаметром 10^{-4} см ? При подсчете можно пренебречь первоначальной площадью поверхности воды. (Площадь шара равна πd^2 , а объем $\frac{\pi d^3}{6}$).

§ 149. Явления в случае искривленной поверхности жидкости. Рассмотрим случай изогнутой (искривленной) границы между жидкостью и газом (или между двумя несмешивающимися жидко-

стями). В этом случае, как видно из рис. 225, силы поверхностного натяжения, действующие на частицу жидкости, дают в сумме силу, направленную в сторону, куда граница обращена своей вогнутостью. Эта сила зависит от кривизны поверхности жидкости. Она тем больше, чем сильнее изогнута поверхность. Рас-

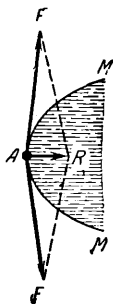


Рис. 225. Силы поверхностного натяжения F , действующие на молекулу A , расположенную на кривой поверхности жидкости MM , дают в сумме силу R , направленную в сторону вогнутости поверхности MM .

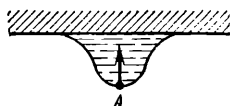


Рис. 226. Разница сил давлений воды в воздухе, действующих на частицу A внизу капли, уравновешивается равнодействующей сил поверхностного натяжения, направленной вверх.

сматриваемая сила создает добавочное давление в жидкости. Поэтому при равновесии двух соприкасающихся сред давление в той из них, к которой граница между ними обращена вогнутостью, должно быть больше давления в другой среде. Например, в нижней части капли воды, повисшей на краю крышки (рис. 226), давление вследствие веса воды больше давления воздуха.

По этой же причине давление воздуха внутри мыльных пузырей всегда больше давления окружающего воздуха. Именно поэтому из пузыря, выдутого на воронке, воздух выходит наружу (рис. 227). Давление газа в пузырьках внутри жидкости тоже больше давления окружающей жидкости, причем разница давлений в случае очень маленьких пузырьков может быть весьма значительной.

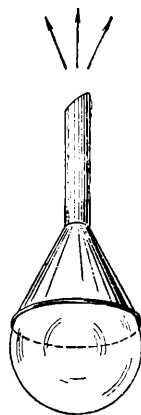


Рис. 227. Воздух из мыльного пузыря, выдутого на воронке, выходит наружу.

§ 150. Явления на границе жидкость — твердое тело. Мы установили, что поверхность соприкосновения жидкости с газом или с другой жидкостью стремится уменьшиться.

Что же происходит на границе жидкость — твердое тело? Как мы видели (§ 147), капля ртути на стеклянной пластинке собирается в шарик. Все ли жидкости ведут себя так? Поместим на тщательно отмытую от следов жира

стеклянную пластинку каплю воды. Вода немедленно покрывает всю пластинку тонким слоем. При этом поверхность, по которой вода соприкасается с воздухом и со стеклом, не уменьшится, а увеличится. Но зато уменьшится поверхность стекла, не покрытого водой. Это значит, что молекулы жидкости, стремящиеся, как мы видели, уйти внутрь жидкости, стремятся также приблизиться и к твердому телу. В случае ртути и стекла силы притяжения молекул ртути друг другом больше, чем силы притяжения к молекулам стекла, и ртуть не растекается по стеклу. В случае воды и стекла, наоборот, притяжение молекул воды к молекулам стекла больше притяжения между самими молекулами воды. В первом случае мы говорим, что жидкость не смачивает твердого тела, во втором — жидкость смачивает твердое тело. Примерами смачивающих пар являются: керосин — любой металл, спирт — стекло. Примеры несмачивающих пар: вода — парафин, ртуть — фарфор.

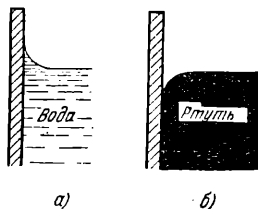


Рис. 228. а) Форма поверхности воды у стеклянной стенки; б) форма поверхности ртути у стеклянной стенки.

При смачивании жидкость, налитая в сосуд, поднимается у краев и тонкой пленкой покрывает стенки сосуда. В случае несмачивания жидкость у края сосуда немного опускается (рис. 228). Вследствие притяжения молекул жидкости к твердому телу слой жидкости, прилегающий к твердому телу, как бы прилипает к нему. При движении жидкости вдоль твердого тела этот прилегающий слой является неподвижным.

У п р а ж н е н и я

180. Вынимая стеклянную палочку из воды, мы поднимаем также капельки воды. При вынимании стеклянной палочки из ртути она останется сухой. Почему?

181. Если наклонить стеклянный пузырек, полный воды, то вода будет стекать по его наружной поверхности. Что произойдет, если наклонить пузырек со ртутью?

182. Положите пальцами на поверхность воды сухое бритвенное лезвие. Лезвие лежит на воде, не погружаясь. Объясните, почему.

183. Перья водолавающих птиц покрыты жиром. Какое это имеет значение?

184. При паянии необходимо очищать спаиваемые металлические поверхности от пленки окислов (это можно сделать, например, раствором хлористого цинка), иначе припой не растекается по металлу. Что можно сказать о силах притяжения между молекулами припоя и молекулами окислов?

§ 151. Капиллярные явления. Очень многие окружающие нас тела имеют пористое строение и пронизаны множеством мел-

ких, иногда незаметных на глаз каналов. Таковы дерево, бумага, кожа, почва, различные строительные материалы и т. д. Вода или другие жидкости, соприкасаясь с такими телами, впитываются в них. Примерами этого служат промокание тканей, бумаги, кожи, поднятие керосина по фитилю. Втягивание жидкостей в узкие каналы имеет место только в том случае, если жидкость смачивает вещество, из которого сделано тело. В случае несмачивания жидкость входит в узкие каналы только под давлением.

Особенно удобно наблюдать эти явления, если воспользоваться стеклянными трубками с очень узкими каналами (рис. 229). Такие трубочки называются **капиллярами***). Поэтому явления,

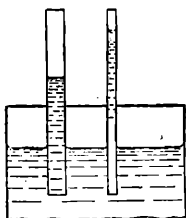


Рис. 229. Уровень воды в узкой трубке выше, чем в широкой.

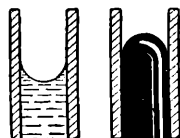


Рис. 230. Вогнутый и выпуклый мениски.

происходящие в тонких каналах, называются **капиллярными**.

Опыт показывает, что *высота капиллярного поднятия тем больше, чем уже канал, чем больше поверхностное натяжение жидкости и чем меньше ее плотность.*

Присмотревшись к форме свободной поверхности жидкости в капилляре (она называется **мениском**), мы видим, что в случае смачивания жидкость образует вогнутый мениск, а при несмачивании — выпуклый мениск (рис. 230). На основании сказанного в § 149 давление жидкости под вогнутым мениском должно быть меньше давления воздуха над мениском. Поэтому смачивающая жидкость поднимается по капилляру до такого уровня, при котором давление жидкости под мениском, сложенное с весовым давлением жидкости в капилляре, уравнивается атмосферное давление, действующее на плоскую поверхность жидкости в широком сосуде. В случае выпуклого мениска давление жидкости под мениском, наоборот, больше давления воздуха над мениском.

*) От латинского слова «капиллюс» — «волос».

У п р а ж н е н и я

185. Почему трудно вытереть мокрые руки шерстяной тряпкой?

186. На рис. 231 показано приспособление для собирания влаги с окна в бутылку с помощью тряпки. Объясните его действие.

187. Слежавшаяся земля вся пронизана тонкими каналами. Сопоставьте это с тем фактом, что при слежавшемся верхнем слое почва сильно просыхает в засуху, а при взрыхленном — слабо. Чем это объяснить?

188. Глиняные материалы испытывают на пористость, прикоснувшись к их излому языком. Пористые материалы липнут к языку. Вы можете в этом убедиться, коснувшись языком свежего излома черепицы, строительного фаянса или, за отсутствием их, мела. Как объяснить это явление?

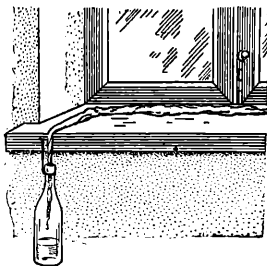


Рис. 231.

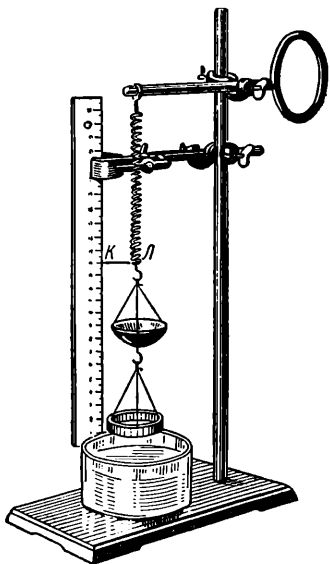


Рис. 232. Самодельные весы Жолли.

§ 152. Лабораторная работа № 6. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

Значение работы. Работа позволяет уточнить понятие коэффициента поверхностного натяжения и его размерности.

Принадлежности. Весы Жолли (самодельные) (рис. 232), разновес, линейка с делениями на миллиметры, сосуд с водой.

Выполнение работы. Установив прибор, поднимаем сосуд с водой и погружаем кольцо в жидкость. При этом наблюдаем, чтобы плоскость кольца была строго горизонтальна (проверяется прикосновением кольца к поверхности жидкости). Кольцо — проволочное или тонкостенное. Начинаем медленно опускать сосуд с водой и следим за положением указателя весов *КЛ*.

Что показывает динамометр? Когда кольцо начинает выходить из воды, то смачивающая жидкость вытягивается за кольцом в виде пленки, подобной короткой тонкостенной трубке (рис. 233). При-

нимая эту трубку приблизительно за цилиндрическую, мы можем считать силы поверхностного натяжения направленными по образующим цилиндра вниз. Их и уравнивает растянутая пружина динамометра. Границей образовавшейся жидкой пленки будет сумма длин окружностей (внутренней и внешней) кольца. Показание динамометра в момент отрыва позволит нам определить величину силы поверхностного натяжения, а отношение этой силы к длине границы — коэффициент поверхностного натяжения.

Отмечаем на шкале положение указателя в момент отрыва кольца. Для определения силы F помещаем на чашку весов разновески, пока пружина не растянется до того же положения, при котором произошел отрыв:

$$\sigma = \frac{F}{\pi d_1 + \pi d_2} = \frac{F}{\pi (d_1 + d_2)}$$

Запись результатов измерений ведем по схеме:

№	Жидкость	Сила F в <i>дин</i>	Диаметр кольца в мм		σ	Погрешность	
			внешний d_1	внутренний d_2		Δ	δ
1							
2							
3							

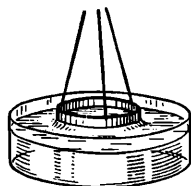


Рис. 233. Смачивающая жидкость вытягивается за кольцом в виде пленки, подобной короткой тонкостенной трубке.

§ 153. Кристаллическое и аморфное состояния вещества. Строение кристаллов. Часто можно видеть, что твердые тела, образуясь из раствора или из расплавленного вещества (расплава), принимают форму, ограниченную плоскими гранями (рис. 234). Такие тела называются кристаллами. Кристаллы могут иметь разные размеры и форму, но углы между гранями кристаллов одного и того же состава всегда одинаковы. Постоянство углов между гранями является одной из замечательных особенностей кристалла. У кристаллов разных веществ углы между гранями различны.



Рис. 234. Один из видов кристаллов.

Иногда кристаллы образуются по отдельности, например кристаллики сахара в сахарном песке, кристаллики соли, снежинки и т. п. (монокристаллы). Иногда же отдельные кристаллы сростаются друг с другом, образуя сплошные куски, состоящие из

беспорядочно расположенных кристаллов, например «морозные узоры» на окнах, узоры цинка на оцинкованном железе, сахар-рафинад и т. п. Тело, состоящее из множества беспорядочно расположенных мелких кристаллов, называется **п о л и к р и с т а л л и ч е с к и м**.

Все без исключения металлы имеют кристаллическое строение. Эти кристаллы можно увидеть, внимательно приглядевшись к излому металла. Иногда же их можно видеть только в микроскоп.

Изучение кристаллов показало, что их свойства зависят от направления внутри кристалла. Кристаллы легче разрушаются по одним направлениям, чем по другим, и именно поэтому их изломы являются плоскими. Например, кусочки слюды, которые являются кристаллами, легче расщеплять на тонкие пластинки, чем разрывать эти пластинки на части. Опыты показали также, что упругость, тепловое расширение, теплопроводность, электропроводность и другие физические свойства кристаллов зависят от направления в них.

В частности, форма кристаллов говорит о том, что от направления зависит также их рост. Если бы скорость роста кристаллов была по всем направлениям одинакова, то легко понять, что кристалл рос бы в виде шара.

Не все вещества имеют кристаллическое строение. Свойства многих веществ (стекло, сахарный леденец, смола и т. п.) не зависят от направления. Признаком этого являются, например, кривые изломы, которые получаются при разрушении стекла или леденца.

Некристаллические вещества называются **а м о р ф н ы м и**. Если тело состоит из множества мелких, беспорядочно расположенных кристалликов, разделенных аморфными прослойками, то его свойства похожи на свойства аморфных тел. Поэтому раньше думали, что кристаллическое состояние вещества — редкое явление. Теперь известно, что, наоборот, сравнительно редко встречается аморфное состояние. Многим аморфным веществам свойственно с течением времени переходить в кристаллическое состояние. Замечено, что кристаллики в металлических предметах с течением времени растут, чем и объясняется постепенное уменьшение прочности изделий. Кристаллизация прозрачных аморфных веществ — стекла, смолы и т. д. — вызывает их помутнение. Чем объяснить различие между свойствами кристаллических и аморфных тел? В аморфных телах, так же как и в жидкостях (см. § 144), имеются области ничтожных размеров, в которых молекулы сохраняют неизменным упорядоченное расположение; так же как и в жидкостях, молекулы все время переходят от одной такой области к другой. Но, в отличие от обычных жидкостей, в твердых аморфных веществах эти процессы происходят значительно менее интенсивно. Аморфные тела можно рассматривать как жидкости с очень малой текучестью. В кристаллах же все (за ничтожными исключениями) молекулы или атомы сохраняют взаимное упорядоченное расположение. Тепловое дви-

жение молекул или атомов является колебательным движением около положений равновесия, называемых узлами. Система узлов кристалла называется его кристаллической решеткой.

На рис. 235 показана модель одного из типов кристаллической решетки; центры шариков соответствуют узлам решетки. Такими решетками обладают кристаллы хлористого натрия, бромистого серебра и многие другие. В других кристаллах решетки построены иначе, чем показано на рисунке; иногда кристаллические решетки имеют очень сложное строение.

Почему же зависимость свойств кристалла от направления связана с упорядоченным расположением атомов? Почему, например, по одним направлениям кристалл раскалывается легче, чем по другим?

Рассмотрим рис. 236, представляющий разрез кристаллической решетки, показанной на рис. 235. Легко видеть, что плоскости, перпендикулярные к чертежу и проходящие через прямые AB и CD , находятся друг от друга дальше, чем плоскости, проходящие через прямые FH и GE . Так как силы взаимодействия атомов резко

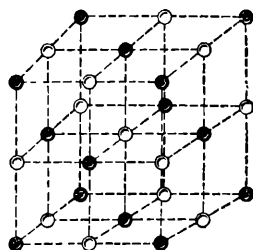


Рис. 235. Модель, показывающая расположение узлов кристаллической решетки хлористого серебра.

Белые и черные шарики показывают узлы, которые соответствуют положениям равновесия центров атомов хлора и серебра. Размеры атомов хлора и серебра почти такие же, как и расстояния между узлами.

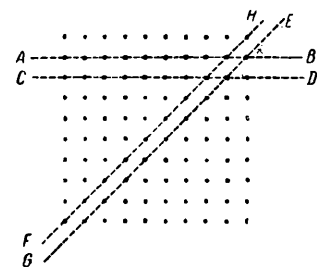


Рис. 236. Один из слоев решетки, изображенной на рис. 235.

уменьшаются при увеличении расстояния, то притяжение между слоями AB и CD меньше, чем между слоями FH и GE . Поэтому расколоть кристалл вдоль слоев AB и CD легче, чем вдоль FH и GE .

Предположение о правильном расположении атомов в кристалле, высказанное уже давно, удалось доказать только в XX в. при помощи рентгеновых лучей.

Громадный вклад в науку о кристаллах внес русский ученый Е. С. Федоров, исследовавший всевозможные случаи расположения частиц,

при которых возможно образование кристаллов.

У п р а ж н е н и я

189. Рассмотрите при помощи увеличительного стекла кристаллики в порошках сахара, поваренной соли, хинина и др.

190. Получите кристаллики поваренной соли, дав испариться густому раствору соли.

ГЛАВА XII

ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ЖИДКОСТЕЙ

§ 154. **Тепловое расширение.** Как известно, при изменении температуры размеры тел меняются: при нагревании увеличиваются, при охлаждении уменьшаются. Известно также, что разные вещества расширяются при нагревании различно.

По отношению к твердым телам, форма которых при изменении температуры не меняется, различают изменение линейных размеров

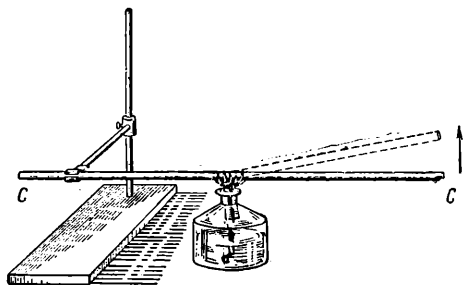


Рис. 237. Стекла́нная трубка при нагревании ее снизу заметно изгибается вверх.

(длины, диаметра и т. п.) — линейное расширение и изменение объема — объемное расширение. У жидкостей при нагревании форма может меняться (например, в термометре ртуть входит в капилляр). Поэтому в случае жидкостей имеет смысл говорить только об объемном расширении.

При неравномерном нагревании (или при охлаждении) твердых тел, например при нагревании конца стеклянной трубки (рис. 237), происходит изгибание тел. Если этому изгибанию что-нибудь препятствует, то в нагреваемом теле появляются так называемые внутренние напряжения, которые могут вызвать трещины и разрушение тела. Например, при наливании горячей

воды в холодный толстостенный стеклянный стакан он может лопнуть.

В случае, если тело состоит из двух или нескольких частей, сделанных из различно расширяющихся веществ, то и равномерное нагревание (или охлаждение) ведет к появлению напряжений, которые могут вызвать его разрушение. Например, спайка двух стеклянных трубок не удастся, если эти трубки сделаны из сортов стекла, расширяющихся при нагревании в разной степени.

Величины напряжений, которые получаются в сооружениях и зданиях при их неравномерном нагревании, могут быть очень велики. Поэтому в технике стремятся дать возможность частям сооружения свободно удлиняться или укорачиваться. Пример такого устройства, употребляемого в небольших железнодорожных мостах, показан на рис. 238 (одна из опор установлена на катках).

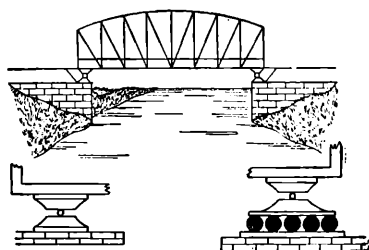


Рис. 238. Один из концов фермы железнодорожного моста укладывается на стальные катки.

У п р а ж н е н и я

191. Почему лопаются на морозе струны балалайки, настроенной в теплом помещении?

192. Железобетоном называют прочный строительный материал, состоящий из железных прутьев и цемента. Изменится ли прочность железобетона, если цемент будет расширяться от нагревания значительно больше или меньше, чем железо?

193. Почему нельзя наливать нефть в цистерну до краев?

194. При устройстве водяного отопления домов на чердаках ставят баки, сообщающиеся с системой труб, наполненных водой. В баках делают отводные трубки для стока воды. Зачем?

195. Почему алюминиевые поршни автомашин делают с разрезом, тогда как чугунные поршни этого разреза не имеют? (Поршни работают внутри чугунного блока цилиндров.)

§ 155. Коэффициент линейного расширения. Чтобы охарактеризовать различие в тепловом расширении различных твердых материалов, пользуются понятием коэффициента линейного расширения. Коэффициентом линейного расширения называется величина, показывающая, на какую долю начальной длины увеличивается длина тела при нагревании на 1°C . Обозначив начальную длину тела через l_0 , длину тела, нагретого на t° , через l_t , коэффициент линейного расширения через α , можем написать:

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

Из формулы видно, что α выражается в $\frac{1}{град}$, или, что то же, в $град^{-1}$.

Отметим, что под начальной длиной следует разуметь длину при $0^\circ C$. Однако, так как длина тела меняется при нагревании очень мало, то вполне допустимо под l_0 разуметь длину при другой температуре, близкой к $0^\circ C$.

При небольших изменениях температуры (не больше $200-300^\circ C$) изменение длины $l_t - l_0$ почти точно пропорционально изменению температуры t , и коэффициент α является постоянной для данного материала величиной. При больших изменениях температуры это уже не имеет места.

Коэффициенты линейного расширения твердых тел нетрудно определить. Для этого нужно измерить начальную длину и удлинение, получающееся при нагревании до определенной температуры.

Приведем коэффициенты линейного расширения некоторых твердых тел (в $град^{-1}$):

Медь	0,000017	Кирпич	0,000005
Железо (сталь)	0,000012	Цемент	0,000014
Алюминий	0,000024	Стекло (примерно)	0,000010
Олово	0,000027	Фарфор	0,000003

Зная коэффициент расширения материала и начальную длину тела, мы можем вычислить длину его при другой температуре. Для этого преобразуем формулу:

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

Двучлен, стоящий в скобках, называется **биномом линейного расширения**. Он показывает, во сколько раз длина нагретого тела больше начальной.

Еще раз подчеркнем, что формула

$$l_t = l_0 (1 + \alpha t)$$

является приближенной. Ею можно пользоваться только при не очень больших изменениях температур.

Рассмотрим пример. Пусть при $25^\circ C$ длина медного стержня равна 600 мм . Какова она будет при $320^\circ C$? В данном случае можно принять $l_0 = 600 \text{ мм}$, $t = 320^\circ C - 25^\circ C = 295^\circ C$; $l_{320^\circ} = 600 (1 + 0,000017 \cdot 295) \text{ мм} = 603 \text{ мм}$.

У п р а ж н е н и я

196. Длина железной трубы при $5^\circ C$ равна 1300 см . Какова длина трубы при $50^\circ C$; при $-8^\circ C$?

197. На сколько надо нагреть медный стержень длиной 2 м , чтобы он удлинился на 1 мм ?

198. Круглое отверстие в листовой стали имеет диаметр 80 мм при $0^\circ C$. Каков будет этот диаметр при нагревании листа до $200^\circ C$?

199. Каков должен быть зазор между стальными рельсами железнодорожного пути при 15°C , если длина рельса при этой температуре равна $12,5\text{ м}$, а максимальная температура, до которой могут нагреваться рельсы, 55°C ?

§ 156. Лабораторная работа № 7. Определение коэффициента линейного расширения.

Значение работы. С расширением тел при нагревании приходится встречаться при решении многих технических вопросов. Эта лабораторная работа позволит учащимся лучше уяснить себе смысл количественной характеристики расширяемости различных материалов, называемой коэффициентом линейного расширения.

Принадлежности: прибор для определения коэффициента линейного расширения, термометр, масштабная линейка, микрометр или штангенциркуль, парообразователь.

Работа может быть выполнена с прибором или фабричного или своего изготовления; имеется много конструкций таких приборов. На рис. 239 изображена трубка из металла,

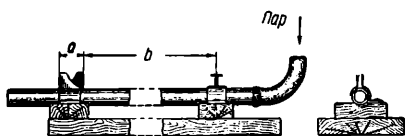


Рис. 239.

коэффициент расширения которого требуется определить; она укрепляется на подставке с одного конца наглухо, другой конец лежит свободно в полукруглой выемке. К этому концу прикреплен выступ, такой же выступ прикреплен к опорной подставке.

Выполнение работы. Измеряют длину b масштабной линейкой, а расстояние a — микрометром. Сумма b и a даст начальную длину трубки. Затем через трубку пропускают пар и примерно через 5 мин. снова измеряют расстояние a . Разность между новым и старым значением покажет удлинение трубки, зная которое, легко найти коэффициент линейного расширения.

§ 157. Коэффициент объемного расширения. Коэффициентом объемного расширения называется величина, показывающая, на какую долю начального объема увеличивается объем тела при нагревании на 1°C . Обозначая коэффициент объемного расширения через β («бета»), начальный объем тела через V_0 и объем тела, нагретого на t° , через V_t , можем написать:

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

откуда

$$V_t = V_0(1 + \beta t).$$

Двучлен $(1 + \beta t)$ называется биномом объемного расширения.

Если твердое тело расширяется при нагревании по всем направлениям одинаково, то между коэффициентами линейного и объемного расширений имеется простая зависимость:

$$\beta = 3\alpha.$$

Для доказательства рассмотрим кубик, ребра которого при 0°C имеют длину 1 см. При нагревании на 1°C длина ребра будет равна $1 + \alpha$. Объем кубика с таким ребром выражается числом см^3 , равным

$$(1 + \alpha)^3 = 1 + 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3.$$

Так как $3\alpha^2$ и α^3 чрезвычайно (в тысячи раз) малы по сравнению с 3α , то можно принять объем кубика равным $1 + 3\alpha$. С другой стороны, он равен $1 + \beta$. Отсюда

$$\beta = 3\alpha.$$

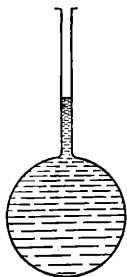


Рис. 240. Прибор для измерения коэффициента объемного расширения жидкостей.

Таким образом, коэффициент объемного расширения железа равен $0,000036 \text{ град}^{-1}$, меди $0,000051 \text{ град}^{-1}$ и т. д.

Коэффициенты объемного расширения жидкостей, вообще говоря, значительно больше, чем твердых тел. Их можно определять, например, при помощи прибора, изображенного на рис. 240. Незначительным изменением внутреннего объема колбы при нагревании можно пренебречь. Зная объем круглой части сосуда и площадь канала в горлышке и определяя высоту поднятия уровня жидкости в горлышке при нагревании, можно определить коэффициент объемного расширения жидкости.

Приведем значения коэффициентов объемного расширения некоторых жидкостей (в град^{-1}):

Ртуть	0,00018
Керосин	0,0010
Спирт (этиловый)	0,0011
Эфир (этиловый)	0,0012

У п р а ж н е н и я

200. Каков объем спирта при 30°C , если при 0°C он равен 5000 см^3 ?

201. Жестяной бидон емкостью 10 л при 0°C наполнен до краев керосином. Сколько керосина выльется из бидона, если он нагреется до комнатной температуры 20°C ?

202. Измеряя коэффициент объемного расширения жидкости прибором, изображенным на рис. 240, мы получаем неточный результат, так как пренебрегаем увеличением емкости сосуда. Больше или меньше истинного этот результат?

§ 158. **Изменение плотности веществ при изменении температуры.** Как известно, масса тела равна плотности вещества, умноженной на объем тела. Так как массу нагреваемого тела можно считать постоянной, то при изменении объема в $(1 + \beta t)$ раз плотность во столько же раз уменьшается. Обозначая плотность при 0°C через D_0 и при температуре t через D_t , можно написать:

$$v_t D_t = v_0 D_0, \quad v_0 (1 + \beta t) D_t = v_0 D_0 \quad \text{и} \quad D_t = \frac{D_0}{1 + \beta t}.$$

У п р а ж н е н и я

203. Плотность меди при 0°C равна $8,9 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$. Какова она при 220°C ?

204. Стальной шарик плавает на поверхности ртути. Что произойдет при повышении температуры: погрузится ли шарик или поднимется?

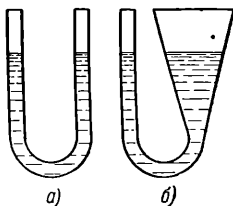


Рис. 241.

205. Как изменится уровень жидкости в левом колене трубки, если подогреть жидкость в правом колене (см. рис. 241, а и б)?

Г Л А В А XIII СВОЙСТВА ГАЗОВ

§ 159. Давление и его единицы. Напомним, что давлением одного тела на другое называется отношение силы, действующей на плоскую поверхность тела, к площади этой поверхности. Обозначая силу F , площадь поверхности S и давление p , можем написать

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

В системе единиц СИ единицей служит давление, с которым сила 1 н действует на 1 м² плоской поверхности (обозначается н/м²). Кроме этих единиц, употребительны еще другие единицы, не входящие в систему СИ:

1) 1 $\frac{\text{кГ}}{\text{см}^2} = 10^4 \frac{\text{кГ}}{\text{м}^2}$; называется технической атмосферой (обозначается ат *);

$$1 \text{ ат} = 98066,5 \text{ н/м}^2.$$

2) миллиметр водяного столба (обозначается мм вод. ст.) и миллиметр ртутного столба (обозначается мм рт. ст.). Эти единицы равны весовому давлению на глубине 1 мм в воде и в ртути.

Легко видеть, что единица мм вод. ст. совпадает с единицей давления кГ/м^2 :

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 1 \frac{\text{кГ}}{\text{м}^2}.$$

Так как плотность ртути в 13,6 раза больше плотности воды, то

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 13,6 \text{ мм вод. ст.};$$

$$760 \text{ мм рт. ст.} = 101\,325 \text{ н/м}^2.$$

*) Различают: ата — абсолютная атмосфера; ати — избыточная атмосфера (по манометру).

У п р а ж н е н и я

206. Выразите давление 12 *ата* в н/м^2 и кг/м^2 .

207. Чему равно давление газа в колбах I и II (рис. 242), если барометр показывает 765 *мм рт. ст.*? В манометры, показанные на рисунке, налита ртуть.

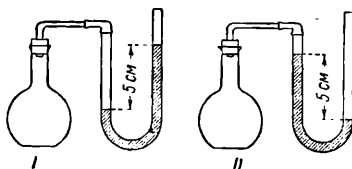


Рис. 242.

§ 160. Плотность газов. Напомним, что в обычных условиях плотности газа значительно меньше плотностей твердых и жидких тел.

Для определения плотности газа надо откачать воздух из какого-либо сосуда и взвесить сосуд. Затем надо наполнить сосуд исследуемым газом и снова взвесить. Разница покажет массу газа в сосуде. Измерив объем сосуда и разделив массу газа на объем, определим плотность газа.

Плотность газов зависит от давления и температуры. Поэтому в таблицах указывают плотности газов при нормальных условиях, т. е. при давлении 760 *мм рт. ст.* и при 0°C .

Газы	Плотности,	Молекулярные веса
	$\frac{\rho}{\text{см}^3}$ или $10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	
Воздух	0,00129	—
Азот (N_2)	0,00125	28
Кислород (O_2)	0,00143	32
Водород (H_2)	0,00009	2
Углекислый газ (CO_2)	0,00198	44

Обратим внимание, что плотности газов пропорциональны их молекулярным весам. Действительно, разделив плотность газа на его молекулярный вес, получим для всех газов одно и то же число (0,000045). Это означает, что плотности газов при нормальных условиях пропорциональны массам составляющих их молекул. Отсюда следует, что в 1 см^3 любого газа находится при нормальных условиях одно и то же число молекул. Это число было определено разными способами, на которых мы не будем останавливаться. Оказалось, что в 1 см^3 газа содержится $2,7 \cdot 10^{10}$ молекул (ч и с л о Л о ш м и д т а).

Напомним еще одно понятие, известное из курса химии: м о л ь (или г р а м м - м о л ь). Молем называется количество вещества, масса которого в граммах численно равна молекулярному весу

вещества. Например, моль кислорода составляет 32 г, моль углекислого газа 44 г. Зная число молекул в 1 см^3 и плотность газа, легко подсчитать, сколько молекул содержится в 1 моле его. Например, 1 моль кислорода содержит $2,7 \cdot 10^{19} \cdot \frac{32}{0,00143}$ молекул. Один моль углекислого газа содержит $2,7 \cdot 10^{19} \cdot \frac{44}{0,00198}$ молекул и т. д. Подобные подсчеты показывают, что у всех веществ *1 моль содержит одно и то же число молекул* (ч и с л о А в о г а д р о). Число Авогадро равно $6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.

§ 161. Закон Шарля. От чего зависит давление газа на стенку сосуда, в котором он находится? От двух обстоятельств: во-первых, от того, сколько газа находится в сосуде. Так, давление воздуха в футбольном мяче по мере его накачивания увеличивается. Во-вторых, от температуры газа. Действительно, стóит подержать мяч вблизи горячей печи, и он делается более тугим.

Рассмотрим сначала влияние температуры. Первые исследования зависимости давления газа от температуры были произведены Шарлем в 1787 г. Он установил, что при нагревании в неизменном объеме давление всех газов увеличивается почти одинаково; именно, *при повышении температуры на 1°C давление любого газа увеличивается почти точно на $\frac{1}{273}$ того давления, которое данная масса газа имела при 0°C* (з а к о н Ш а р л я).

Обозначим давление некоторой массы газа в сосуде при 0°C через p_0 , а при температуре t° — через p_t . Прирост давления при нагревании на 1°C равен $\frac{p_0}{273}$. При нагревании на t° прирост давления равен $\frac{p_0}{273} t$. Давление при температуре t° равно начальному p_0 плюс прирост давления $\frac{p_0 t}{273}$:

$$p_t = p_0 + \frac{p_0 t}{273}, \quad \text{или} \quad p_t = p_0 \left(1 + \frac{1}{273} t\right).$$

Эта формула, выражающая закон Шарля, позволяет вычислить давление при любой температуре, если известно давление при 0°C . Пусть, например, давление кислорода в баллоне при 0°C равно $90 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$. Каково оно будет при 24°C ? Пользуясь законом Шарля, находим:

$$p_{24^\circ} = 90 \left(1 + \frac{1}{273} \cdot 24\right) \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} = 98 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}.$$

Процессы, при которых объем тела (в данном случае объем газа) остается неизменным, называются *и з о х о р и ч е с к и м и* про-

цессами. Значит, закон Шарля и выражающая его формула относятся к изохорическим процессам в газах. График зависимости давления от температуры при изохорическом процессе показан на рис. 243.

Следует отметить, что закон Шарля не является вполне точным. Пока плотность газа много меньше плотностей жидких и твердых тел (т. е. много меньше нескольких $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$), закон Шарля хорошо согласуется с опытом. При больших плотностях газов наблюдаются отступления от закона Шарля, тем более значительные, чем больше плотность газа.

Упражнения

208. До какой температуры надо нагреть газ в баллоне, чтобы давление газа увеличилось вдвое? Начальная температура газа 17°C ; процесс изохорический.

209. В баллонах одного из типов электроламп (газополных) находится газ, имеющий при 0°C давление $0,74 \text{ кг/см}^2$.

Каково давление газа при работе лампы, когда его температура равна 100°C ?

210. При 0°C манометр на баллоне со сжатым газом показывает 25 кг/см^2 . Какое давление покажет манометр при 14°C ? При какой температуре манометр покажет 29 кг/см^2 ? (При решении примите во внимание, что манометр показывает разницу между давлениями внутри и снаружи баллона, т. е. приблизительно на 1 кг/см^2 меньше, чем давление газа.)

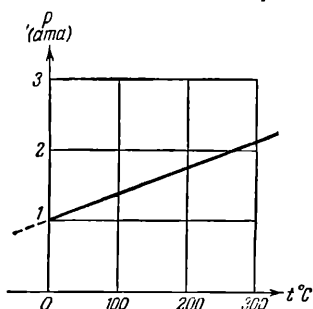


Рис. 243. График зависимости давления газа от температуры.

§ 162. Закон Бойля — Мариотта. Мы указали (§ 161), что давление газа зависит не только от температуры, но и от степени его сжатия, т. е. от объема, который занимает данная масса газа. Зависимость давления газа от занимаемого объема при неизменной температуре впервые выяснили Бойль и Мариотт в XVII в.

Измеряя давление газа при различных степенях сжатия, они пришли к следующему закону: *при неизменной температуре давление определенной массы газа обратно пропорционально занимаемому объему* (з а к о н Б о й л я — М а р и о т т а).

Обозначая начальное и конечное давления через p_1 и p_2 , начальный и конечный объем через V_1 и V_2 , закон Бойля — Мариотта можно выразить формулой

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}.$$

Приравняв произведения средних и крайних членов пропорции, получим:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

Отсюда видно, что закон Бойля — Мариотта можно выразить еще так: *при неизменной температуре произведение объема определенной массы газа на его давление есть величина постоянная.*

Процессы, при которых температура тела одинакова по всему объему и не меняется во время процесса, называются *изо-*

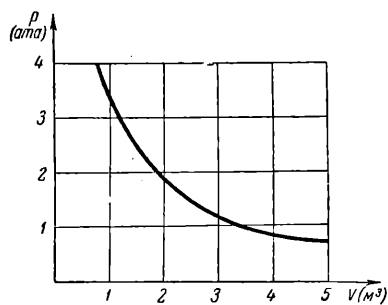


Рис. 244. График зависимости давления газа от объема.

термическими процессами. Таким образом, закон Бойля — Мариотта относится к изотермическому процессу в газе. Типичный график зависимости давления газа от объема при изотермическом процессе показан на рис. 244.

Как связаны между собой плотность газа и его давление? Плотность определенной массы газа при увеличении объема в несколько раз уменьшается во столько же раз. Давление газа при увеличении объема тоже

уменьшается. Отсюда следует, что *при неизменной температуре давление газа пропорционально его плотности:*

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{D_1}{D_2}.$$

Отметим, что закон Бойля — Мариотта является достаточно точным только при небольших плотностях газов. При больших плотностях поведение газов заметно отклоняется от этого закона; очень же сильно сжатые газы по своим свойствам похожи на жидкости и почти не сжимаются при дальнейшем увеличении давления.

У п р а ж н е н и я

211. Постройте график изменения давления газа в зависимости от объема при постоянной температуре, взяв за исходное давление 1 кг воздуха при 0° С давление 24 *атм*. (Укажи-те: сначала найдите объем данной массы газа.)

212. Углекислый газ в 20-литровом баллоне оказывает давление 120 $\text{кг}/\text{см}^2$. Какой объем займет та же масса углекислого газа при давлении 1 $\text{кг}/\text{см}^2$? Температуру считайте неизменной.

213. Поршень находится в равновесии, когда длина столба газа в цилиндре равна 50 *см*

(рис. 245). С какой силой надо действовать на поршень, чтобы удерживать его на расстоянии 10 *см* от дна цилиндра, если площадь поршня 20 см^2 , внешнее давление 1 *атм* и процесс сжатия газа изотермический?

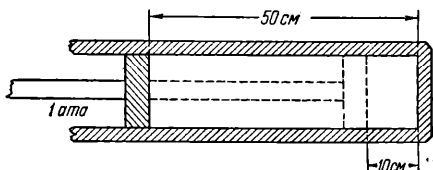


Рис. 245.

214. Два одинаковых баллона с кислородом соединены трубкой с краном. Давление в одном из них 60 *атм*, а в другом 10 *атм*. Какое давление установится в баллонах, если при открытии крана произойдет изотермическое уравновешивание давления?

215. Какую плотность имеет воздух при 0° С на горе, где давление равно 410 *мм рт. ст.*? (См. таблицу в § 160.)

§ 163. Лабораторная работа № 8. Проверка закона Бойля — Мариотта.

Значение работы. Работа имеет большое значение для усвоения одного из важнейших газовых законов, с которыми в дальнейшем учащиеся встретятся при изучении работы тепловых двигателей.

Произведение объема данной массы газа на давление при постоянной температуре есть величина постоянная:

$$pV = \text{const} = C.$$

Эта формула и подлежит проверке в данной работе.

Принадлежности: трубка Мельде, барометр.

Выполнение работы. Трубка Мельде представляет собой стеклянную трубку, запаянную с одного и открытую с другого конца. В ней находится капля ртути, запирающая некоторое количество воздуха в запаянной части трубки. Делаются три опыта, соответственно трем положениям трубки (рис. 246).

В горизонтальном положении трубки запертый ртутью газ находится под давлением, равным атмосферному, так как давления на столбик ртути с той и другой стороны должны быть равны. Определить это давление p_1 можно барометром с точностью до 1 *мм рт. ст.* Объем запертого воздуха (V_1) пропорционален длине трубки от запаянного конца до капли ртути. Его можно условно выразить числом миллиметров, измеряющих длину этой части трубки.

Во втором положении столбик ртути своим весом сжимает находящийся ниже воздух, так что объем последнего (V_2) меньше V_1 . Давление этого воздуха (p_2), очевидно, равно атмосферному, сложенному с давлением ртутного столбика в трубке (и то, и другое надо выразить в *мм рт. ст.*).

В третьем положении (открытым концом вниз) столбик ртути опускается, но не выливается, так как этому мешает атмосферное давление снизу. Давление запертого газа в этом случае равно атмосферному минус давление столбика ртути (и то, и другое выразите в *мм рт. ст.*).

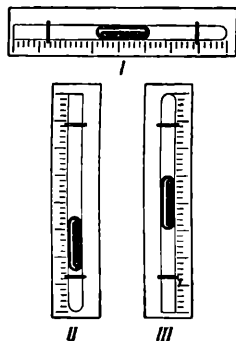


Рис. 246.

Результаты трех опытов сведите в таблицу:

№ опыта	p	V	pV	$\Delta(pV)$	C
1					
2					
3					

Погрешность работы определяется методом границ.

При выполнении опытов нельзя брать трубку руками за ту часть, где находится газ, во избежание изменения температуры. Переворачивать трубку надо осторожно, чтобы столбик ртути не распался на несколько частей. Если это случится, то работу придется начинать сначала, а для соединения частей ртутного столбика друг с другом надо ввести внутрь трубки железную или стальную проволочку и двигать ее вдоль трубки. Ни в коем случае нельзя применять для этой цели медную или никелиновую проволоку, так как она образует с ртутью амальгаму; тогда загрязненная ртуть будет прилипать к стеклу и пользоваться прибором будет нельзя.

§ 164. Закон Гей-Люссака. Мы рассмотрели вопрос о нагревании газа в неизменном объеме (§ 161). Что произойдет, если мы будем нагревать газ, давая ему возможность расширяться (например, в сосуде с подвижным поршнем)? При этом, очевидно, давление газа сначала станет больше наружного. Равновесие нарушится и газ будет расширяться, двигая поршень. Затем, когда давление газа снова сделается равным наружному, поршень остановится. Если ускорение, с которым движется поршень, мало, то изменения давления газа при движении поршня тоже малы. Тогда можно пренебречь ими и считать, что газ расширяется, сохраняя неизменное давление. Процессы, идущие при неизменном давлении, называются *и з о б а р и ч е с к и м и* процессами.

Точные исследования расширения газов при неизменном давлении были произведены в 1802 г. Гей-Люссаком. Он открыл, что при неизменном давлении объемы всех газов увеличиваются при нагревании почти одинаково, а именно, *при нагревании на 1°C объем некоторой массы газа увеличивается на $\frac{1}{273}$ того объема, который данная масса газа имела при 0°C* (з а к о н Г е й - Л ю с - с а к а).

Как видно, увеличение объема и давления газов при нагревании на 1°C характеризуется одним и тем же числом $\left(\frac{1}{273}\right)$. Это не случай-

но, а является следствием закона Бойля — Мариотта. Действительно, нагревание газа на 1° при постоянном давлении можно рассматривать, как два процесса. Сперва газ нагревается при постоянном объеме на 1° , причем его давление увеличивается на $\frac{1}{273}$ начального. Затем газ расширяется при постоянной температуре, причем его давление уменьшается до начального, а объем во столько же раз увеличивается (т. е. на $\frac{1}{273}$ начального объема).

Обозначив объем некоторой массы газа при 0°C через V_0 , а при температуре t° через V_t , мы можем закон Гей-Люссака выразить формулой

$$V_t = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right).$$

Легко видеть, что при постоянном давлении нагревание газа уменьшает его плотность. Это имеет громадное значение. По закону Архимеда нагретый воздух как более легкий вытесняется кверху. Этим объясняются движение воздуха в атмосфере (восходящие токи), подтекание к пламени свежего воздуха, поддерживающего горение, тяга в трубах и т. п.

Упражнения

216. Некоторая масса воздуха вне помещения имеет при 0°C объем 20 м^3 . Какой объем займет та же масса в помещении, где температура равна 27°C ?

217. На рис. 247 показан график зависимости объема от температуры для некоторой массы газа при постоянном давлении. Постройте такой же график для вдвое большей массы газа. В какой точке пересекутся эти графики, если их продолжить в сторону температур ниже 0°C ?

218. Какова плотность воздуха при -23°C и нормальном давлении?

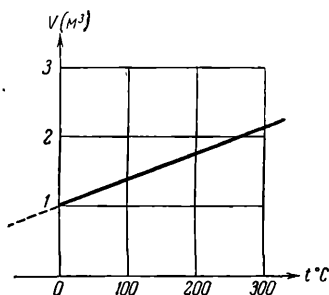


Рис. 247.

§ 165. Применение сжатых газов в технике. Для получения сжатых газов в технике применяются мощные насосы, называемые компрессорами.

На рис. 248 показана схема одноцилиндрового поршневого компрессора. Поршень в цилиндре компрессора совершает поступательно-возвратное движение. При ходе поршня в одну сторону открывается впускной клапан и в цилиндр поступает воздух или другой какой-нибудь газ; при обратном движении поршня впускной клапан закрывается, вошедший в цилиндр газ сжимается поршнем и через выпускной клапан нагнетается в баллоны

для хранения газа. Многоступенчатые компрессоры позволяют сжимать газ до давлений в тысячи атмосфер.

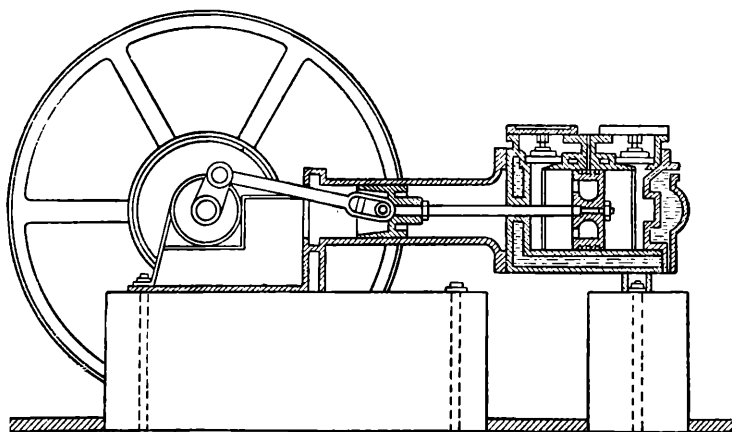


Рис. 248. Схема поршневого компрессора.

Баллоны со сжатым газом можно легко перевозить и доставлять

к месту назначения. В таком виде сжатый кислород, ацетилен или водород могут использоваться для автогенной сварки и резки металлов (рис. 249), сжатый углекислый газ — для производства газированной воды и т. д. Особенно разнообразное применение имеет сжатый воздух в различных пневматических инструментах: отбойных молотках, зубилах дрели. На рис. 250 показан пневматический молот, применяемый при различных строительных и дорожных работах, а также в горнорудном деле (рис. 251). Сжатый воздух подается по шлангу и при помощи золотникового механизма направляется то в заднюю, то в переднюю часть цилиндра. В результате находящийся в цилиндре поршень наносит быстрые следующие друг за другом удары бойку или «пике» молота.

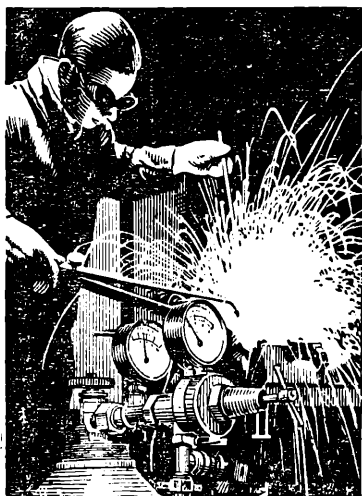


Рис. 249. Автогенная установка.

Общеизвестны применения сжатого воздуха для авто-

матического закрывания и открывания дверей в вагонах метро, троллейбусах и для автоматического торможения поездов (рис. 252).

Наряду с использованием сжатых газов во многих случаях в технике применяются и разреженные газы (вакуумная техника, от

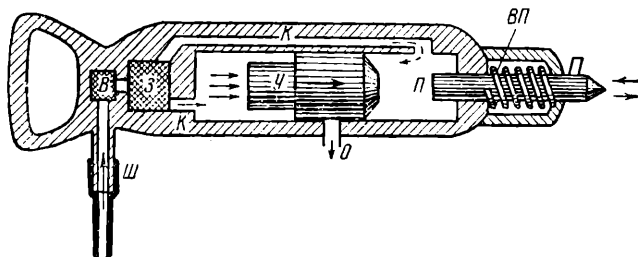


Рис. 250. Схема отбойного молотка.

слова «вакуум» — разрежение). Устройство поршневых воздушных насосов известно из курса восьмилетней школы. Поэтому рассмотрим только устройство ротационного масляного насоса, изображенного на рис. 253. Быстро вращающийся ротор имеет выдвижные лопасти, которые подхватывают газ по всасывающему патрубку, а затем выбрасывают через выхлопную трубу. Выхлопной канал снабжен шариковым клапаном. Для предупреждения от просачивания воздуха насос помещается в масляную ванну.

Ротационными насосами удается достичь разрежения до $0,001$ мм рт. ст. Однако для многих современных вакуумных аппаратов и приборов (электроламп, радиоламп, рентгеновских трубок, фотоэлементов и др.) такая степень разрежения оказывается недостаточной. В этих случаях применяются насосы иного типа — диффузионные, пароструйные насосы (использующие пары ртути или масла), устройство которых мы описывать не будем. Отметим только, что современная вакуумная техника позволяет получить разрежения до 10^{-11} мм рт. ст. В 1 мм³ при таком разрежении остается еще свыше 300 молекул, тогда как при обычных средствах разрежения газа количество молекул в 1 мм³ измеряется несколькими миллионами.



Рис. 251. Применение пневматического молотка в рудниках.

Обычно давление при высоком вакууме оценивают по длине свободного пробега молекулы до первого столкновения с другой молекулой. При нормальном давлении длина свободного пробега молекул азота и кислорода в воздухе мала, около $0,6 \cdot 10^{-3}$ мм.

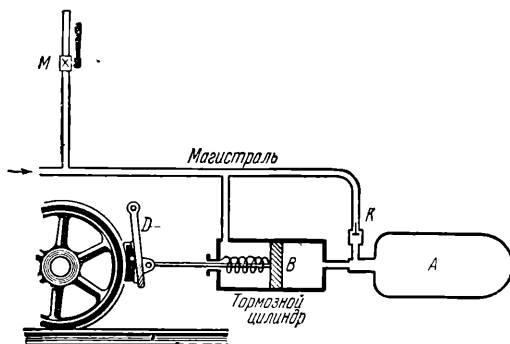


Рис. 252. Схема устройства железнодорожного пневматического тормоза: А — резервуар со сжатым воздухом, В — поршень, D — тормозная колодка, К — клапан, М — кран.

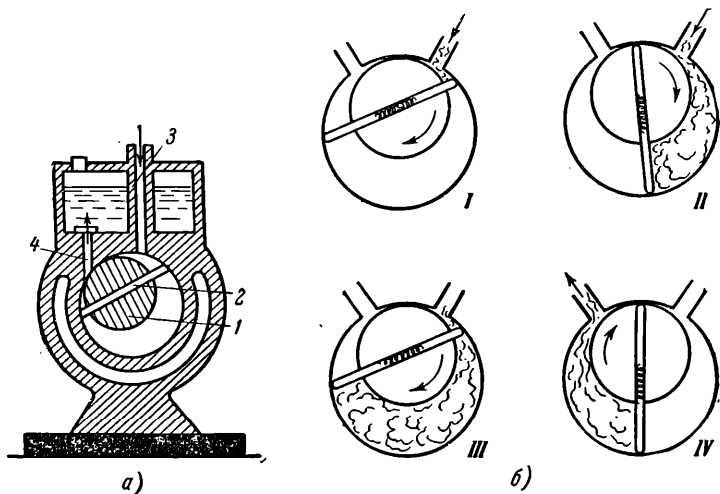


Рис. 253. а) Схема ротационного масляного насоса: 1 — ротор, 2 — подвижные лопасти, 3 — всасывающий патрубок, 4 — выхлопное отверстие; б) — схема работы ротационного масляного насоса.

При очень сильном разрежении удается увеличить свободный пробег до размеров, соизмеримых с размерами сосуда и даже превышающих

их, т. е. молекулы при таком разрежении долетают до стенки сосуда, не испытав столкновений. Такое состояние газа и получило название вакуума. (Заметим, однако, что в технике слово «вакуум» применяют часто более широко — в любом случае сильно разреженного газа.)

§ 166. Абсолютный нуль температуры. Абсолютная температура. Еще М. В. Ломоносов указывал, что охлаждение тел не может быть беспредельным. Исходя из представления об охлаждении тел как уменьшении средней скорости беспорядочного движения молекул, образующих эти тела, Ломоносов считал, что существует предел охлаждения тел, а именно, та температура, при которой тепловое движение молекул совершенно прекращается. В середине прошлого века английский физик Кельвин теоретически доказал, что невозможно охлаждение тел ниже -273°C (точнее, ниже $-273,15^{\circ}\text{C}$). Эта температура была названа **а б с о л ю т н ы м н у л е м т е м п е р а т у р ы**. Очевидно, что при абсолютном нуле кинетическая энергия теплового движения всех молекул тела равна нулю. Из рассуждений Кельвина следует, что *достигнуть абсолютного нуля нельзя*, можно лишь сколь угодно близко подойти к нему. Современные методы охлаждения тел позволяют достичь температур, отличающихся от абсолютного нуля лишь на десятитысячные доли градуса.

Температура, отсчитываемая от абсолютного нуля, называется **а б с о л ю т н о й т е м п е р а т у р о й**. В отличие от шкалы Цельсия, в которой градус обозначается знаком $^{\circ}\text{C}$, в абсолютной шкале температур градус обозначается $^{\circ}\text{K}$. Например, температура таяния льда по абсолютной шкале равна $+273^{\circ}\text{K}$. В отличие от температуры по шкале Цельсия, обозначаемой буквой t , абсолютную температуру принято обозначать буквой T . Согласно определению:

$$t = T - 273; \quad T = t + 273.$$

Подставив это в формулу, выражающую закон Шарля, получим:

$$p = p_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right) = p_0 \left(1 + \frac{T - 273}{273}\right) = p_0 \left(1 + \frac{T}{273} - 1\right) = \frac{p_0 T}{273}.$$

Для каких-либо двух температур T_1 и T_2 мы можем написать:

$$p_1 = \frac{p_0 T_1}{273}; \quad p_2 = \frac{p_0 T_2}{273}.$$

Деля эти равенства почленно, получим:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Это значит, что *давление определенной массы газа в замкнутом сосуде пропорционально абсолютной температуре газа*. Это —

новое, очень удобное выражение закона Шарля. Рассуждая сходным образом, мы можем закон Гей-Люссака выразить формулой

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Объем некоторой массы газа при неизменном давлении пропорционален абсолютной температуре газа.

Пусть, например, масса газа при 17°C занимает объем 320 см^3 . Каков будет ее объем при -13°C , если давление газа не изменится?

В данном случае $V_1 = 320 \text{ см}^3$, $T_1 = 17^\circ + 273^\circ = 290^\circ \text{K}$, $T_2 = -13^\circ + 273^\circ = 260^\circ \text{K}$.

Подставляя это в формулу $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$, имеем:

$$\frac{320}{V_2} = \frac{290}{260}, \quad \text{откуда} \quad V_2 = 287 \text{ см}^3.$$

У п р а ж н е н и я

219. Переведите в абсолютную шкалу температуры: 0°C , $+20^\circ \text{C}$, -190°C , $+36,6^\circ \text{C}$; $+327^\circ \text{C}$.

220. Переведите в шкалу Цельсия температуры: 0°K , 100°K , 1000°K .

221. При температуре 15°C давление газа в баллоне равно 120 кг/см^2 . Каково будет давление, если температура поднимется до 41°C ?

222. При какой температуре объем газа будет равен $1,1 \text{ м}^3$, если при -13°C он равен 1 м^3 ?

223. Температура дымовых газов котельной установки в начале дымохода 1227°C , а в конце 227°C . Найдите отношение объемов 1 кг дымовых газов в конце и в начале дымохода.

§ 167. Уравнение газового состояния. Мы познакомились с двумя основными законами газового состояния: 1) законом Шарля, который выражает зависимость давления определенной массы газа от температуры, если объем газа остается неизменным; 2) законом Бойля — Мариотта, который выражает зависимость давления определенной массы газа от объема, если температура остается неизменной. Возникает вопрос: как будет меняться давление некоторой массы газа, если изменятся и температура, и объем?

Чтобы ответить на этот вопрос, надо объединить законы Шарля и Бойля — Мариотта в одной формуле. Для этого представим себе, что процесс изменения состояния газа состоит из двух переходов: сперва меняется только объем газа, а затем — только температура. При первом переходе имеет место закон Бойля — Мариотта и мы можем написать:

$$p_1 V_1 = p' V_2,$$

где p_1 и V_1 — начальные давления и объем, V_2 — конечный объем, а p' — давление в конце первого и в начале второго перехода. При

втором переходе имеет место закон Шарля и мы можем написать:

$$\frac{p'}{p_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

или

$$\frac{p'}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

Перемножая почленно последнее равенство и равенство, выражающее закон Бойля — Мариотта для первого перехода, и сокращая на p' , получим:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}.$$

Это и есть формула, объединяющая законы Бойля — Мариотта и Шарля. Ее часто называют уравнением газового состояния.

Упражнения .

224. В лаборатории добыто 200 см³ водорода. Комнатная температура 17° С, давление по барометру 780 мм рт. ст. Вычислите объем газа при нормальных условиях (0° С, 760 мм рт. ст.).

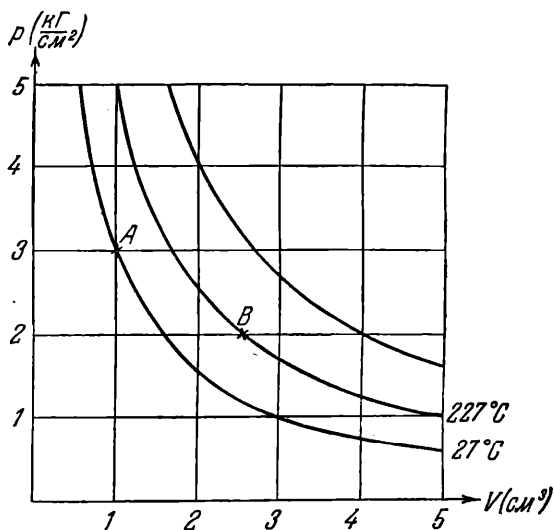


Рис. 254.

225. На рис. 254 показаны графики изотермических процессов для определенной массы газа. Опишите состояния газа, соответствующие точкам A и B графиков. Проверьте, выполняется ли уравнение состояния газа. Определите приблизительно температуру, соответствующую третьей кривой на рис. 254.

226. В 20-литровом баллоне при 27°C давление кислорода равно 30 атм ; в 10-литровом баллоне при 2°C давление кислорода $60,5 \text{ атм}$. В каком из баллонов кислорода больше? Во сколько раз?

§ 168. Лабораторная работа № 9. Уравнение состояния газа.

Значение работы. Уравнение состояния газа $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ является основным в учении о газах. Лабораторная работа способствует лучшему усвоению этого вопроса и окажет большую пользу при последующем изучении теплотехники (машиноведения).

Принадлежности: специальный прибор, 2 стакана (химических на 300 см^3) — один с холодной, другой с горячей водой, — термометр, барометр.

Выполнение работы. Прибор, состоящий из U-образной трубки (рис. 255), открытой с одного и запаянной с другого конца и заключающей в себе некоторое количество запертого ртутью воздуха, помещают сначала в холодную воду, и притом так, чтобы вода полностью покрывала запаянный конец трубки. Измеряют температуру воды (перечисляют на абсолютную шкалу), объем воздуха в закрытом колене (в условных единицах) и давление воздуха

в этом колене, которое, очевидно, равно атмосферному минус разность уровней ртути в открытом и закрытом колене (в мм рт. ст.). Затем переносят прибор из холодной воды в такой же стакан с горячей водой ($80\text{--}90^\circ \text{C}$) и снова измеряют температуру, объем и давление газа.

Результаты записывают в таблицу:

Температура T	Объем V	Давление p	$\frac{pV}{T}$ (до трех значащих цифр)
T_1			
T_2			

§ 169. Давление смеси газов. Мы постоянно имеем дело со смесями нескольких газов. Так, воздух является смесью азота, кислорода, аргона, углекислого газа, паров воды и других газов. Что случится, если из смеси удалить один из газов? Из воздуха, например, легко

удалить кислород, который можно связать химически (сжигая в небольшом объеме воздуха фосфор). При удалении одного из газов, составляющих смесь, давление уменьшается как раз на такую величину, которая соответствовала бы давлению в данном сосуде удаленного газа, если бы других газов не было. Отсюда следует, что *давление смеси газов равно сумме давлений каждого из газов смеси в отдельности* (з а к ђ н Д а л ь т о н а).

Чтобы выяснить суть дела, вспомним, что число молекул в 1 см^3 при нормальных условиях одинаково для любых газов (§ 160). Это означает, что давление газа при определенной температуре зависит только от числа его молекул в 1 см^3 и совершенно не зависит от того, что это за молекулы. Закон Бойля — Мариотта показывает, что, увеличивая число молекул в 1 см^3 , например накачивая в сосуд, где находится азот, новые порции азота, мы увеличиваем его давление. Закон Дальтона говорит, что вместо азота можно накачивать какой-нибудь другой газ, например водород, но если мы добавим в сосуд столько же молекул водорода, сколько молекул азота, то получим такое же увеличение давления. Отсюда следует, что если по какой-нибудь причине молекулы двухатомного газа распадутся на атомы, то это поведет к увеличению давления. Наоборот, если атомы газа, соединяясь вместе, образуют молекулы, то это ведет к уменьшению давления.

Так же как и закон Бойля — Мариотта, закон Дальтона не оправдывается для сильно сжатых газов.

У п р а ж н е н и е

227. В баллоне емкостью 20 л находится кислород, давление которого при некоторой температуре равно 6 *ата*. В другом баллоне емкостью 10 л находится азот, давление которого при той же температуре равно 3 *ата*. Баллоны соединены трубкой с краном. Какое давление установится при открытом кране, когда газы перемещаются?

§ 170. Идеальный газ. Мы не раз подчеркивали, что законы Шарля, Бойля — Мариотта и Гей-Люссака не применимы к слишком сжатым газам. Эти законы вообще являются неточными, но в случае не сильно сжатых газов отступления от указанных законов малы, и ими можно пренебречь. Поэтому в физике и, в особенности, в технике широко пользуются понятием и д е а л ь н о г о г а з а. Идеальными газами называются воображаемые газы с молекулярными весами, равными молекулярным весам реально существующих газов (кислорода, азота и т. п.), но в отличие от них совершенно точно подчиняющиеся законам Бойля — Мариотта, Шарля и Гей-Люссака.

§ 171. Объяснение свойств газов молекулярной теорией. Мы уже говорили (§ 141), что М. В. Ломоносов в своих сочинениях дал ясную картину строения газов. В своем сочинении «Попытка построения

теории об упругой силе воздуха» он дает следующее объяснение закона Бойля — Мариотта.

Давление газа на стенки сосуда есть результат ударов газовых молекул. Молекулы газа при ударе о стенку теряют свою скорость, а затем, отскакивая от стенки, приобретают скорость в обратном направлении. При этом они действуют на стенку с некоторой силой. Очевидно, что общая сила ударов молекул на 1 см^2 стенки, т. е. давление, зависит от числа ударов в секунду. Это соображение дает возможность объяснить закон Бойля — Мариотта. Вообразим сосуд в форме куба, содержащий газ. Если мы увеличим ребро куба в два раза, то объем его увеличится в восемь раз. Как изменится при этом число ударов на 1 см^2 грани куба?

Для простоты рассуждений будем предполагать, что молекулы газа движутся перпендикулярно к стенкам. При увеличении ребра куба вдвое каждая молекула будет ударяться в стенку вдвое реже. Дело в том, что расстояние до противоположной стенки, которое молекула должна пролететь, прежде чем она снова ударится о стенку, увеличится вдвое. Вместе с тем площадь грани куба увеличится в четыре раза, и это поведет к уменьшению числа ударов молекул на 1 см^2 стенки еще в четыре раза. Итак, число ударов молекул на 1 см^2 за секунду, а следовательно, и давление, уменьшится в восемь раз, т. е. во столько же, во сколько увеличится объем. Таким образом, становится понятной суть закона Бойля — Мариотта.

Чем же объяснить отступление газов от этого закона?

До сих пор, говоря о движении молекул, мы не принимали во внимание, что они сами имеют некоторый объем и, двигаясь от одной стенки сосуда к другой, сталкиваются друг с другом. Наличие заметного объема самих молекул равносильно уменьшению свободного пространства, в котором они могут двигаться. А мы только что видели, что уменьшение этого пространства связано с увеличением числа ударов о стенку, т. е. с увеличением давления.

Есть еще второе обстоятельство, которое мы не учли. Мы принимали, что молекулы все время движутся свободно, и пренебрегали тем временем, в течение которого они притягиваются друг к другу при соударениях. Наличие сил притяжения заставляет молекулы некоторое, хотя и очень малое, время двигаться вместе. На это время вместо двух молекул как бы появляется одна молекула двойной массы. Таким образом, притяжение молекул равносильно некоторому уменьшению их числа. Но мы уже знаем, что давление газа зависит от числа молекул и не зависит от того, какие это молекулы. Поэтому наличие сил притяжения между молекулами связано с уменьшением давления.

Таким образом, молекулярная теория объясняет и закон Бойля—Мариотта, и отступления от него.

Закон Шарля легко объясняется, если принять, что повышение температуры связано, как было указано в § 145, с увеличением ско-

рости молекул. При этом увеличение скорости сказывается двояко. Во-первых, с ее увеличением возрастает импульс, который передает стенке ударившаяся о нее молекула; во-вторых, увеличивается число молекул, падающих за 1 секунду на 1 см^2 стенки. Расчет показывает, что давление газа пропорционально квадрату средней скорости молекул. Но давление газа пропорционально и абсолютной температуре. Следовательно, *абсолютная температура газа пропорциональна квадрату средней скорости молекул, т. е. их кинетической энергии.*

§ 172. Скорости газовых молекул.

Мы видели (§ 169), что давление газа при определенной температуре зависит только от числа молекул в 1 см^3 и не зависит от природы молекул, а следовательно, и от масс молекул. Отсюда ясно, что молекулы с меньшей массой имеют при одной и той же температуре бóльшую скорость.

Различие в скоростях молекул разных газов обнаруживается, например, в таком опыте. Приклеим к воронке *B* (рис. 256) сосуд из пористой глины *A*. Опустим конец воронки в воду, накроем стаканом *C* и впустим под стакан водород. Мы увидим, что из конца воронки выходят пузыри газа. Объяснение этого опыта таково. Молекулы водорода быстрее проникают в сосуд сквозь его поры, чем молекулы воздуха из сосуда через стенки. Поэтому внутри сосуда возникает избыточное скопление молекул, давление делается больше атмосферного и смесь воздуха и водорода выходит пузырями через трубку.

Если теперь убрать стакан *C*, водород, проникший в сосуд *A*, начинает выходить обратно; давление в сосуде *A* падает и в воронку вытягивается вода.

Если теперь убрать стакан *C*, водород, проникший в сосуд *A*, начинает выходить обратно; давление в сосуде *A* падает и в воронку вытягивается вода.

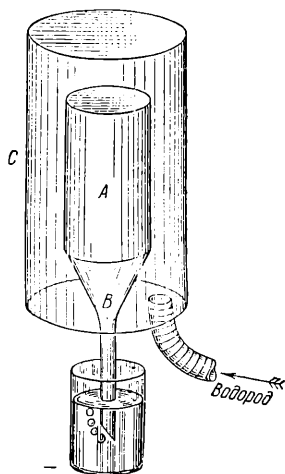


Рис. 256. При наполнении водородом сосуда *C* из опущенного в воду конца воронки *B* выходят пузыри.

§ 173. Измерение скорости молекул. Опыт Штерна.

Средняя скорость молекул данного газа при данной температуре может быть подсчитана теоретически. Первое лабораторное определение скорости молекул было произведено Штерном в 1920 г. Опыт Штерна заключался в следующем. По общей оси двух цилиндров (рис. 257), вращающихся с одинаковой угловой скоростью в вакууме, была натянута посеребренная платиновая проволока, которая накаливалась добела электрическим током, так что молекулы серебра начинали испаряться с поверхности проволоки и разлетались во все стороны

по радиусам. Часть их вылетало через узкую щель, прорезанную вдоль внутреннего цилиндра. Так как процесс происходил в вакууме, молекулы летали по прямой линии и осаждались на холодной стенке внешнего цилиндра в виде черной серебряной полоски. Однако из-за вращения цилиндров за время, в течение которого частица пролетает расстояние между цилиндрами (AB на рисунке), оба цилиндра успевают повернуться на некоторый угол. Поэтому черная полоска оказывается смещенной относительно щели во внутреннем цилиндре на этот угол ($\angle MOB$ на рисунке).

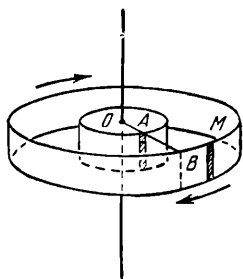


Рис. 257. Схема опыта Штерна.

Измеряя этот угол, можно подсчитать время поворота внешнего цилиндра, а следовательно, и время движения частицы от щели до стенки второго цилиндра. Отсюда легко найти и скорость молекулы серебра при температуре накала проволоки по формуле $v = \frac{S}{t}$.

Измеренная таким способом скорость оказалась близкой к полученной теоретическим расчетом и заключалась для серебра в пределах 500—625 м/сек. Значение этого опыта состоит в том, что совпадение результатов опыта и полученных теоретически подтвердило правильность выводов молекулярной теории.

Теоретически подсчитанные средние скорости молекул некоторых газов и паров в м/сек при 0° С таковы:

Водород	1692	Азот	454
Кислород	425	Водяной пар	566

Как видите, эти скорости громадны и могут быть лишь сравниваемыми со скоростями пуль и артиллерийских снарядов.

§ 174. Понятие об адиабатическом процессе в газах. Из опыта известно, что при накачке велосипедных шин воздух, нагнетаемый в камеру, нагревается. Причина этого явления заключается в том, что при сжатии газа поршень совершает над ним работу, увеличивает его внутреннюю энергию (в случае газа это кинетическая энергия движения молекул, пропорциональная абсолютной температуре). Только путем соответствующего охлаждения со стороны внешней среды можно достичь сжатия газа без повышения температуры (изотермический процесс). При расширении газа можно, наоборот, наблюдать понижение температуры его, если не возмещать потерю внутренней энергии газа путем нагревания.

Процесс изменения объема газа без теплового обмена энергией с внешней средой (без охлаждения или нагревания) называется

адиабатическим процессом *). Теоретически его можно представить как сжатие или расширение газа в сосуде с идеальными теплонепроницаемыми стенками. Практически мы можем приблизиться к нему, если будем быстро производить изменение объема газа в сосуде, стенки которого обладают малой теплопроводностью.

Быстро вдвигая поршень в цилиндр с толстыми стеклянными стенками, наполненный воздухом, можно вызвать воспламенение смоченной эфиром ватки на дне цилиндра (рис. 258). На том же принципе основано зажигание горючего в двигателях Дизеля.

Расширение газа при адиабатическом процессе приводит, наоборот, к понижению температуры, внутренняя энергия газа расходуется в этом случае на совершение работы расширения газа против внешнего давления. Так, например, известно, что неравномерный нагрев земной поверхности приводит к возникновению в атмосфере восходящих и нисходящих потоков воздуха и к интенсивному перемешиванию в слое толщиной около 10 км, называемому тропосферой. При этом воздух, поднимаясь в зону меньшего давления, расширяется и охлаждается.

Поэтому на высоте 10 км температура воздуха очень низка (-50°C и ниже). Выше 10 км перемешивание воздуха менее ин-

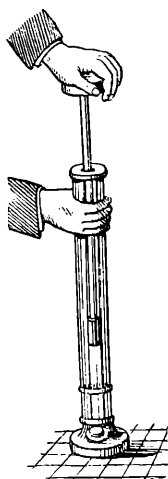


Рис. 258. Нагревание газа при его адиабатическом сжатии.

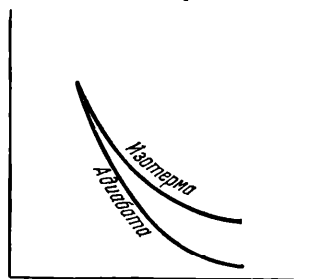


Рис. 259. Адиабата идет круче изотермы.

тенсивно. В этом слое, называемом стратосферой, уже нет такого падения температуры с высотой.

*) От греческого «адиабатос» — непроницаемый.

График зависимости давления газа от объема при адиабатическом процессе показан на рис. 259. Как видим, адиабата идет круче, чем изотерма: давление газа при адиабатическом расширении падает быстрее, чем при изотермическом, потому что понижение давления усиливается происходящим при этом охлаждением.

Адиабатических (теплонепроницаемых) оболочек в действительности не существует, однако если процесс протекает очень быстро, то обмен внутренней энергией с внешней средой не успевает произойти сколько-нибудь заметно. В работе тепловых машин адиабатический процесс играет весьма важную роль.

У п р а ж н е н и е

228. В цилиндре двигателя Дизеля воздух всасывается при температуре 27°C и сжимается в 12 раз до давления 32 ат. До какой температуры нагреется воздух в цилиндре?

ИЗМЕНЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ ТЕЛА. ТЕПЛОТА И РАБОТА. ТЕПЛООБМЕН

§ 175. **Изменение внутренней энергии тела в процессе совершения работы и при теплообмене.** Изучая механические явления, мы видели, что изменения энергии в любой системе тел всегда являются результатом работы каких-либо сил. Работа всегда связана с увеличением одного вида энергии и таким же уменьшением другого вида энергии. Например, работа силы тяжести при падении тела связана с увеличением кинетической энергии падающего тела и с уменьшением его потенциальной энергии. Важный случай изменения энергии связан с работой упругих сил при соударении тел. При ударе упругих тел кинетическая энергия сначала убывает, превращаясь в энергию, связанную с упругой деформацией тел (например, при ударе упругих бильярдных шаров они сплющиваются). Затем деформация исчезает, тела возвращаются к прежней форме; энергия упругой деформации исчезает, снова превращаясь в кинетическую энергию. При этом после удара кинетическая энергия одного из шаров оказывается меньше той, какая была до удара, а у другого шара кинетическая энергия оказывается, наоборот, больше, чем до удара. Таким образом, в результате работы упругих сил кинетическая энергия «передается» от одного шара другому.

Обратимся к изменениям внутренней энергии тел, связанным, как мы уже знаем, с изменениями движения и расположения частиц, из которых состоят тела. Рассмотрим нагревание металлического шара. Это можно осуществить двумя способами. Во-первых, шар можно нагреть трением*)

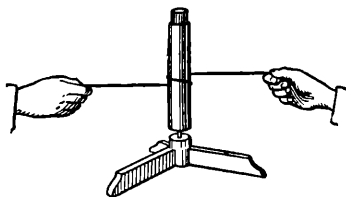


Рис. 260. Нагревание трением.

*) На рис. 260 изображен опыт по нагреванию трением. В тонкостенную латунную трубку, прочно зажатую в штативе, наливают 3—4 см³ эфира и закупоривают пробкой. Обертывают один раз вокруг трубки прочный мягкий шнур и, натянув его, быстрыми движениями натирают трубку. Эфир закипает, и давление пара выбрасывает пробку.

о другое тело, т. е. произведя механическую работу. Во-вторых, шар можно нагреть, поместив его вблизи горячего тела. В этом случае горячее тело, хоть и немного, но охладится (его внутренняя энергия уменьшится), а шар нагреется (внутренняя его энергия увеличится). Произойдет передача энергии от горячего тела к холодному, сходная, по сути дела, с передачей энергии при ударе упругих шаров. Роль упругих шаров играют в подобных случаях молекулы, атомы, а иногда и более мелкие частицы, из которых состоят тела. Однако наблюдать движение громадного числа чрезвычайно малых частиц нельзя. Можно только наблюдать его окончательный результат: внутренняя энергия одного из тел увеличится (оно нагревается, иногда плавится или испаряется), а другого — уменьшится (оно охлаждается, иногда затвердевает или конденсируется). Такой процесс передачи энергии мы будем называть **тепловой передачей энергии** или **теплообменом**. Величина, характеризующая тепловую передачу энергии с количественной стороны, называется **количеством теплоты**.

В качестве другого примера рассмотрим изменения внутренней энергии газа.

Изменение энергии некоторой массы газа тоже может происходить двумя способами:

1) Газ нагревается изохорически, при этом происходит теплообмен.

2) Газ нагревается сжатием при отсутствии теплообмена. При этом имеет место механическая передача энергии от поршня, сжимающего газ (адиабатический процесс, см. § 174).

Итак, внутренняя энергия какого-нибудь тела может меняться в двух процессах: 1) при механической передаче энергии, когда производится работа; 2) при теплообмене, когда работы не производится. Конечно, возможны случаи, когда одновременно совершаются и работа, и тепловая передача энергии.

Как выражается произведенная работа, мы уже знаем: работа равна произведению силы на смещение. В следующих параграфах мы займемся вопросом, как учитывается количество переданной энергии при тепловых процессах.

У п р а ж н е н и е

229. Охарактеризуйте следующие процессы, в которых меняется внутренняя энергия газа:

- а) температура газа повышается при изохорическом процессе;
- б) в цилиндр, сделанный из материала с очень малой теплопроводностью (плексиглас), быстро вдвигается поршень; газ нагревается, что обнаруживается по вспышке помещенной в цилиндр ватки, смоченной эфиром;
- в) температура газа повышается при изобарическом процессе;
- г) газ в цилиндре нагревается горелкой, и в то же время поршень вдвигается внешней силой в цилиндр.

§ 176. Количество теплоты как мера изменения внутренней энергии при теплообмене. Ввиду наличия двух способов изменения внутренней энергии исторически возникли и две различные меры этого изменения. Количественную меру изменения внутренней энергии путем совершения работы называют «количеством работы» или просто работой. Она легко подсчитывается, если известны действующие на тело силы F и перемещения S точек приложения этих сил ($A = F \cdot S$). Количественную меру изменения внутренней энергии при теплообмене называют «количеством теплоты».

Мы не можем проследить за движениями и соударениями отдельных частиц в процессе теплообмена; практически невозможно также определить внутреннюю энергию тела как сумму потенциальной и кинетической энергий огромного количества молекул; поэтому о количестве теплоты, переданном телу, судят по изменению внутренней энергии, которое проявляется в изменении температуры тела или в другом измеримом изменении.

Количество теплоты при изменении температуры тела определяется формулой

$$Q = c \cdot m (t_2 - t_1).$$

Здесь m — масса тела, $t_2 - t_1$ — изменение температуры тела, c — особый коэффициент, характеризующий свойство вещества легче или труднее нагреваться и именуемый удельной теплоемкостью вещества (см. § 178).

Следует твердо помнить, что «количество теплоты» — это количество энергии, передаваемой в процессе теплообмена. Как до, так и после теплового процесса никакого «запаса» количества теплоты ни в передающем энергию, ни в получающем ее теле нет. В телах есть только внутренняя (молекулярно-кинетическая и молекулярно-потенциальная) энергия, каким бы способом она ни была получена телом.

§ 177. Единица количества теплоты. В системе СИ единица для измерения количества теплоты и работы одна и та же, а именно джоуль.

Для измерения количества теплоты допущена также и внесистемная тепловая единица — калория. Возникшая в период господства теории теплорода эта единица получила свое название от введенного французским химиком Лавуазье обозначения причины тепла *calorique* (калорик). Калория определялась как количество теплоты, необходимое для нагревания 1 г воды на 1° С. В 1000 раз большая единица называется килокалорией (*ккал*). В настоящее время калория определяется через джоуль (1 *ккал* = 4186,8 *дж*) *)

*) При решении задач можно пользоваться приближенным значением 1 *кал* = 4,19 *дж*.

и в различных областях применения она все больше и больше вытесняется джоулем.

§ 178. **Теплоемкость тела и удельная теплоемкость вещества.** Одно из наиболее важных изменений внутренней энергии тел связано с изменением их температуры. Если температура тела повышается, внутренняя энергия его увеличивается, и наоборот. Рассмотрим изменение температуры тела в результате тепловой передачи энергии. Примером такого процесса может служить нагревание холодной железной гирьки, опущенной в кипящую воду. Конечно, при этом гирька немного расширится, преодолевая давление воды, т. е. будет произведена некоторая механическая работа. Однако в случае твердых и жидких тел расширение при нагревании очень мало и работа по преодолению давления окружающей среды столь ничтожна, что ею можно пренебречь. Поэтому мы можем считать, что изменение внутренней энергии гирьки определяется количеством теплоты, характеризующим тепловой процесс при опускании гирьки в кипяток (нагревание).

От чего зависит количество теплоты, требуемое для некоторого повышения температуры тела?

Во-первых, оно зависит от массы тела. Для нагревания чайника с большим количеством воды требуется большее количество теплоты, чем для такого же нагревания чайника с малым количеством воды.

Во-вторых, оно зависит от разности конечной и начальной температуры тела.

В-третьих, оно зависит от вещества, из которого состоит тело. Опыт показывает, что для одинакового нагревания разных веществ одинаковой массы (например, железной гири и такой же массы воды) требуются разные количества теплоты. Поэтому мы говорим, что разные тела имеют разную *теплоемкость*. *Теплоемкостью тела называется количество теплоты, которое повышает его температуру на 1° С.* Согласно определению теплоемкость тел выражают в $\frac{\text{дж}}{\text{град}}$ или в $\frac{\text{ккал}}{\text{град}}$.

Чтобы охарактеризовать тепловые свойства вещества, из которого сделано тело, вводится понятие *удельной теплоемкости* вещества. *Удельной теплоемкостью вещества называется количество теплоты, которое повышает температуру 1 г вещества на 1° С.* Удельную теплоемкость веществ выражают в $\frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ или в $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$. Легко видеть, что

$$1 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}} = 1 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = 4190 \frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

До сих пор мы говорили о теплоемкости твердых и жидких тел, которые расширяются при нагревании очень мало, так что работой

при их расширении можно пренебречь. Теперь рассмотрим нагревание газов. При изохорическом процессе объем газа не меняется и количество теплоты есть, так же как у твердых и жидких тел, изменение его внутренней энергии. Однако при изобарическом процессе в газе работой его расширения пренебречь уже нельзя. В этом случае подвод энергии при нагревании определенной массы на 1°C должен быть больше изменения ее внутренней энергии, так как расширяющийся газ все время совершает работу, на которую расходует энергию. Поэтому *теплоемкость газа при постоянном давлении больше его теплоемкости при постоянном объеме.*

§ 179. Измерение удельных теплоемкостей веществ. Приборы для измерения количества теплоты называются к а л о р и м е т р а м и. Простейший калориметр состоит из отполированного металлического стакана, поставленного на пробках внутри другого металлического стакана (рис. 261), мешалки M и термометра T . Устройство калориметра имеет целью как можно сильнее снизить теплоотдачу внутреннего стакана окружающим телам.

В калориметр наливается вода или другая жидкость и производится какая-либо операция, связанная с тепловой передачей энергии. Зная, сколько взято воды и как изменилась ее температура, можно судить о переданном ей или отнятом от нее количестве теплоты.

При точных исследованиях принимают во внимание также теплоемкость внутреннего стакана калориметра, мешалки, которой перемешивают воду, и термометра. При грубых определениях этим пренебрегают.

Измерение удельной теплоемкости металла проводится так: кусок металла определенного веса нагревают (например, положив его в сосуд с кипящей водой) и затем помещают в калориметр с холодной водой. Для расчета удельной теплоемкости металла надо воспользоваться тем фактом, что изменение внутренней энергии металла равно изменению внутренней энергии воды и сосуда калориметра, который тоже нагрелся. Пусть, например, при внесении куска металла в холодную воду ее внутренняя энергия увеличилась на 3500 дж , а внутренняя энергия сосуда калориметра увеличилась на 180 дж . В таком случае внутренняя энергия куска металла уменьшилась на $3500 \text{ дж} + 180 \text{ дж} = 3680 \text{ дж}$.

Если кусок металла весил 100 г и охладился в калориметре на 80° , то удельная теплоемкость металла равна

$$\frac{3680}{0,1 \cdot 80} \frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = 460 \frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} = 0,46 \cdot 10^3 \frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$$

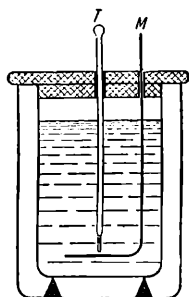


Рис. 261. Простейший калориметр.

Приведем значения удельных теплоемкостей некоторых веществ.

Вещество	$10^3 \frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	Вещество	$10^3 \frac{\text{дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$
Вода	4,19	1,00	Кирпич	0,75	0,18
Лед	2,1	0,50	Песок	0,96	0,23
Алюминий	0,88	0,21	Сосна	2,72	0,65
Железо	0,46	0,11	Асбест	0,21	0,05
Медь	0,4	0,09	Воздух при постоянном давлении	1,0	0,24
Латунь	0,4	0,09	Воздух при постоянном объеме .	0,71	0,17
Свинец	0,1	0,03			

Из этой таблицы сразу видно, что вода обладает значительно большей удельной теплоемкостью, чем другие вещества. Это является одной из причин того, что вода в природных водоемах прогревается солнечными лучами медленнее, чем суша, и, наоборот, ночью, когда энергия с поверхности Земли излучается в космическое пространство, вода остывает медленнее, чем суша. Большая теплоемкость воды — одна из причин умеренности климата приморских стран.

Отметим, что удельная теплоемкость вещества не является строго постоянной величиной. При повышении температуры она немного изменяется (обычно увеличивается). Однако при изменении температуры на несколько десятков градусов этим изменением можно пренебречь.

§ 180. Расчет количества теплоты при изменении температуры тела. Знание удельной теплоемкости материалов дает возможность рассчитывать количества теплоты, нужной для нагревания тел. Рассчитаем, например, какое количество теплоты нужно для нагревания 5 г железа на 40°C . Удельная теплоемкость железа равна $0,46 \cdot 10^3 \text{ дж/кг} \cdot \text{град}$. Для нагревания 5 г железа на 1°C нужно в пять раз больше теплоты, чем для нагревания 1 г железа, а для нагревания на 40°C требуется еще в 40 раз большее количество теплоты. Поэтому общее количество теплоты равно

$$0,46 \frac{\text{кдж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 5 \text{ г} \cdot 40 \text{ град} = 92 \text{ кдж}.$$

Из этого примера видно, что количество теплоты, нужное для нагревания тела, равно произведению удельной теплоемкости вещества на массу тела (теплоемкости тела) и на изменение его температуры.

Выразим это формулой. Обозначим количество теплоты через Q , массу тела через m , удельную теплоемкость через c , начальную

температуру тела через t_1 и конечную его температуру через t_2 . Изменение температуры равно $t_2 - t_1$. Поэтому можно написать

$$Q = cm(t_2 - t_1).$$

Если конечная температура больше начальной (нагревание тела), то количество теплоты является положительной величиной. При охлаждении тела конечная температура меньше начальной и количество теплоты отрицательно.

У п р а ж н е н и я

230. Какова теплоемкость печи, сделанной из 20 кг железа; печи, сложенной из 1,2 т кирпича?

231. Сколько энергии требуется для нагревания железного утюга в 5 кг от 80° до 300° С?

232. Сколько энергии выделит 250 г воды при остывании от 100° до 20° С?

233. В медной кастрюле весом 500 г находится 500 г воды при 20° С. Какое количество теплоты нужно для нагревания кастрюли с водой от 20° до 100° С?

234. Количество теплоты при нагревании некоторой массы воздуха при неизменном давлении равно 20 Дж. Какое количество теплоты нужно для того же нагревания при неизменном объеме? Какая работа производится при расширении этой массы воздуха?

§ 181. Уравнение теплового баланса. Любая тепловая передача энергии от одного тела к другому связана с уменьшением внутренней энергии одного тела и с увеличением внутренней энергии второго тела. Мы уже говорили, что изменения внутренней энергии тел при тепловых процессах характеризуются количеством теплоты. Количество теплоты при увеличении внутренней энергии одного тела, очевидно, равно количеству теплоты при уменьшении внутренней энергии другого тела, так как они характеризуют один и тот же процесс тепловой передачи энергии.

От двух тел можно перейти к системе нескольких тел. В этом случае сумма количеств теплоты, идущих на увеличение внутренней энергии одних тел в системе, равно сумме количеств теплоты, отдаваемых при уменьшении внутренней энергии других тел в системе. Уравнение, выражающее это положение, называется **у р а в н е н и е м т е п л о в о г о б а л а н с а**.

Применим уравнение теплового баланса к измерению удельной теплоемкости металла (§ 179), принимая во внимание количество теплоты, идущей на нагревание калориметра и мешалки. Введем обозначения: масса металла m_1 ; его удельная теплоемкость c_1 ; его температура до внесения в калориметр t_1 ; масса воды в калориметре m_0 ; удельная теплоемкость воды c_0 (как было указано, c_0 обычно принимают равной $1 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$); общая масса внутреннего сосуда калориметра и мешалки m_2 ; удельная теплоемкость их материала c_2 (она предполагается известной); общая начальная температура воды,

калориметра и мешалки t_0 . Пусть после внесения металла вода, калориметр, мешалка и сам металл приняли температуру t . Тогда количество теплоты, отдаваемое металлом при охлаждении, равно

$$c_1 m_1 (t_1 - t).$$

Количество теплоты, идущее на нагревание воды, равно

$$c_0 m_0 (t - t_0).$$

Количество теплоты, идущее на нагревание калориметра и мешалки, равно

$$c_2 m_2 (t - t_0).$$

Приравнивая друг другу количества отдаваемой и приобретаемой теплоты, получим уравнение теплового баланса:

$$c_1 m_1 (t_1 - t) = c_0 m_0 (t - t_0) + c_2 m_2 (t - t_0).$$

Из этого уравнения можно найти неизвестную величину (например, t или c_1 , в зависимости от задачи). Уравнение теплового баланса можно рассматривать как одно из следствий закона сохранения энергии. Отметим, что приведенное выше уравнение никоим образом не является формулой, пригодной для решения всех задач, связанных с тепловыми процессами, а есть решение только одной из них. При составлении уравнения теплового баланса нужно прежде всего выяснить, у каких тел, участвующих в процессе, внутренняя энергия увеличивается, у каких — уменьшается, выразить количества теплоты при этих изменениях и сумму количеств теплоты при увеличении энергии одних тел приравнять сумме количеств теплоты при уменьшении энергии других тел.

Применим уравнение теплового баланса к нахождению температуры смеси двух порций m_1 и m_2 какой-либо жидкости, имеющих разные температуры (t_1 и t_2). Удельную теплоемкость жидкости обозначим через c . Температура смеси t определится из уравнения

$$c m_1 (t_1 - t) = c m_2 (t - t_2),$$

откуда

$$t = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2}.$$

Это соотношение называется формулой Рихмана.

У п р а ж н е н и я

235. Решите и иллюстрируйте графиком задачу Рихмана: смешано 300 г воды при 20°C с 200 г воды при 60°C ; найти температуру смеси.

236. Кусок стали массой 12,7 кг и температурой 900°C погружен в воду температурой 11°C . Сколько воды надо взять, чтобы окончательная температура не превысила 55°C , если средняя теплоемкость стали в интервале тем-

ператур между 0° и 900° С соответствует $0,71 \frac{\text{кдж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$? (Считайте что образовавшийся пар тут же сконденсировался в воду.)

237. В алюминиевую кастрюлю (масса 500 г, температура 15° С) вливают 900 г воды при 30° С; через некоторое время установилась общая температура 20° С. Какое количество теплоты передано окружающим телам?

§ 182. Лабораторная работа № 10. Определение удельной теплоемкости металла.

Значение работы. Работа имеет целью укрепить энергетические представления учащихся о тепловых процессах. Знание удельной теплоемкости необходимо для тепловых расчетов, которые часто приходится производить в технике.

Принадлежности: испытуемое тело, технические весы с разновесом, калориметр, термометр, кастрюлька, электрическая плита, крючок для вынимания тела из воды *).

Выполнение работы. Ставят кастрюльку с водой на электрическую плитку, чтобы, пока подготавливается работа, вода нагрелась до 100° С. Определяют массу калориметра сначала без воды, потом с водой, налив воды столько, чтобы положенное в калориметр исследуемое тело могло быть покрыто водой, т. е. примерно до $\frac{1}{3}$ высоты калориметра. Измеряют температуру воды с точностью до $0,5^\circ$. Взвешенное тело опускают в кастрюльку с кипящей водой и держат в ней около 5 минут.

Считая, что тело приняло температуру 100° С, его вынимают крючком и, быстро обтерев промокательной бумагой, опускают в калориметр. Наблюдают по термометру повышение температуры. Воду осторожно помешивают.

Когда температура перестанет повышаться, записывают окончательное ее значение.

Далее по результатам опыта составляют уравнение теплового баланса, из которого и находят искомую удельную теплоемкость:

Количество энергии, отданное горячим металлом	=	Количество энергии, полученное водой	+	Количество энергии, полученное калори- метром
---	---	---	---	---

При подсчете последнего члена уравнения надо знать удельную теплоемкость металла калориметра (см. таблицу на стр. 260).

§ 183. Удельная теплота сгорания топлива. В качестве топлива могут служить все вещества, которые хорошо горят в топках и которые можно добывать из природных источников в больших количествах (каменный уголь, нефть, торф, дрова, солома, горючие газы).

*) Если в физическом кабинете техникума имеется паровой обогреватель, то для нагревания металла предпочтительно пользоваться им.

Известно, что разные виды топлива дают при сжигании различные количества теплоты. Для оценки топлива в этом отношении определяют его удельную теплоту сгорания. *Теплотой сгорания топлива называется количество теплоты, отданное при полном сгорании 1 кг топлива.*

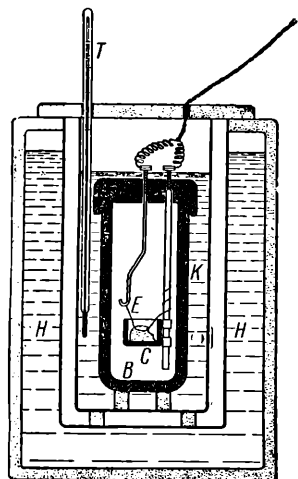


Рис. 262. Прибор для определения калорийности топлива.

Внутри опущенной в калориметр *K* бомбы *B* находится тигель *C* для сжигаемого топлива, укрепленный на трубке, служащей для нагнетания кислорода. *E* — электрический запал (проболок, накаливаемая током). *H* — цилиндр с водой определенной температуры, защищающий калориметр от колебаний температуры окружающего воздуха.

ты из печи и др. Первые две потери можно уменьшить умелым обращением с топками. При отоплении дровами кпд сильно падает в случае сырых дров. Укажем примерные кпд некоторых отопительных установок:

Установка	Топливо	Кпд, %
Камин	каменный уголь	5
Голландская печь . .	дрова	30
Примус	керосин	35
Центральное водяное отопление	каменный уголь	50
Паровой котел в паросиловых установках	»	75

Зная необходимую теплоотдачу топки, удельную теплоту сгорания топлива и кпд топки, можно рассчитывать нужные количества топлива. Подсчи-

Определение удельной теплоты сгорания топлива производят в толстостенном, наглухо закрывающемся металлическом сосуде — к а л о р и м е т р и ч е с к о й б о м б е (рис. 262). В бомбу помещают некоторое количество топлива и нагнетают по имеющейся в ней трубке чистый кислород. Затем поджигают топливо запалом — тоненькой проволочкой, накаливаемой электрическим током. Зная, сколько сгорело топлива, и определив при помощи калориметра количество выделившейся теплоты, можно рассчитать удельную теплоту сгорания топлива.

Приведем теплоты сгорания некоторых видов топлива.

Топливо	$10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$
Мазут	4	10 000
Керосин, бензин	4,6	11 000
Антрацит	3,1	7 500
Каменный уголь	3	7 000
Древесный уголь	3,2	8 000
Бурый уголь	2	5 000
Дрова сухие	1,2	3 000
Торф	1,4	3 300
Условное топливо	3	7 000

Ни одна печь не использует целиком всю энергию, заключенную в топливе. Причин потерь энергии несколько: неполное сгорание топлива, унос теплоты с топочными газами наружу, унос теплоты золой, рассеяние теплоты из печи и др. Первые две потери можно уменьшить умелым обращением с топками. При отоплении дровами кпд сильно падает в случае сырых дров. Укажем примерные кпд некоторых отопительных установок:

таем, например, сколько керосина нужно, чтобы вскипятить на примусе чайник с 2,2 кг воды, если начальная температура воды 10°C , КПД примуса 35%.

Для нагревания 2,2 кг воды на $100^{\circ} - 10^{\circ} = 90^{\circ}$ требуется $4,2 \cdot 2,2 \times \times 90 \cdot 10^3 = 832 \cdot 10^3$ Дж. При сгорании керосина в примусе получается $4,6 \cdot 0,35 \cdot 10^7 = 1,6 \cdot 10^7$ Дж. Следовательно, нужно $\frac{832 \cdot 10^3}{16 \cdot 10^6} = 0,052$ кг = 52 г керосина.

У п р а ж н е н и я

238. Сколько энергии получается при сжигании 15 кг каменного угля?

239. Сколько надо сжечь дров, чтобы получить 38 000 ккал?

240. Какое количество дров нужно, чтобы нагреть от 10 до 50°C кирпичную печь массой 1,2 т? КПД печи примите равным 30%.

241. Каков КПД самовара, если для согревания в нем 6 л воды от 12 до 100°C требуется 0,15 кг древесного угля?

242. До какой температуры нагреется котел с 3 м³ воды, если истратить 40 кг каменного угля? КПД котла равен 60%, начальная температура воды 10°C .

§ 184. Из истории закона сохранения и превращения энергии в механических и тепловых процессах. «Если, как Вы утверждаете, техника в значительной степени зависит от состояния науки, то в гораздо большей мере наука зависит от состояния и потребностей техники. Если у общества появляется техническая потребность, то она продвигает науку вперед больше, чем десяток университетов...», — писал Фридрих Энгельс в одном из своих писем *).

Промышленный переворот — переход от ручного к машинному производству — сначала в Англии (последняя треть XVIII в.), потом в других странах Европы и в Америке привел к коренному преобразованию техники производства. Вызванные к жизни развитием каменноугольной, текстильной и металлургической промышленности тепловые двигатели пробудили широкий интерес к тепловым явлениям и процессам. Первые паровые машины Ньюкомена, Ползунова, Уатта требовали усовершенствования: коэффициент полезного действия даже лучших из них не превышал 5%. Стремление повысить производительность тепловых машин неизбежно вело к исследованию тепловых явлений.

В 1824 г. появляется работа молодого французского инженера Сади Карно «Размышления о движущей силе огня», в которой он разбирает условия работы тепловых двигателей и выводит формулу идеального двигателя. Работа Карно положила начало новой науке — термодинамике — научной основе теплотехники. Вопрос о природе теплоты и о путях наилучшего ее использования приобрел небывалую остроту.

Еще в 1798 г. военный инженер Бенджамин Томсон (Румфорд) ставил специальные опыты по сверлению пушек и наблюдал нагревание стволов и опилок. Что при трении происходит нагревание, было, конечно, известно задолго до Румфорда, но его опыты показывали неограниченное выделение тепла и таким образом подрывали теорию теплорода. Ведь теплород мог бы содержаться в металле лишь в определенном количестве и выделение его должно было бы прекратиться после исчерпания этого запаса.

Опыты с таянием льда при трении двух кусков льда друг о друга, проведенные английским химиком Дэви (1802 г.) и независимо от него русским

*) К. Маркс, Ф. Энгельс, Избранные письма, ОГИЗ, 1947, стр. 469.

физиком В. В. Петровым, не только подрывали теплородную теорию, но подбодили вплотную к вопросу об уточнении количественного соотношения между теплотой и работой. А отсюда был один шаг до самого широкого обобщения о превращаемости различного вида движений при сохранении общей меры движения — энергии.

Первый, кто установил количественное соотношение между теплотой и работой, был немецкий врач Роберт Майер (1842 г.). Описывая мысленный опыт с расширением воздуха при нагревании в цилиндре, закрытом поршнем, Майер вычислил, какое количество работы совершает в этом случае газ при нагревании на 1°C . В то же время на основании имевшихся к тому времени опытных данных о поглощении тепла при расширении газов Майеру удалось подсчитать и количество теплоты, требуемое для совершения этой работы. Отсюда Майер

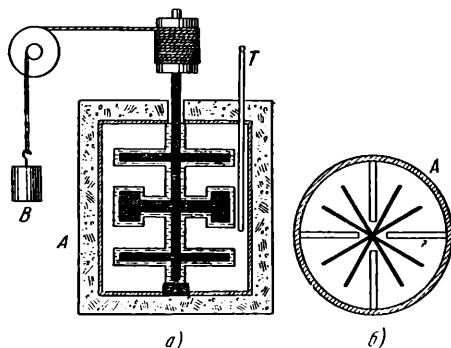


Рис. 263. а) Вертикальный разрез прибора Джоуля; б) горизонтальный разрез цилиндра А.

Лопатки вращаются внутри цилиндра А посредством шнура, натягиваемого грузом В. Внутренность цилиндра А разделена на части перегородками с прорезями для прохода лопаток. Т — термометр.

вычислил, какое количество работы соответствует одной единице количества теплоты. Исправленное после многочисленных позднейших опытов соотношение между тепловой единицей и работой оказалось равным 427 кГм на 1 килокалорию. Это соотношение получило название «механического эквивалента теплоты» (от латинского *aequivalens* — равноценный, равнозначный).

Современник Майера английский техник Джоуль определил механический эквивалент тепла опытным путем. Один из многочисленных опытов Джоуля состоял в перемешивании воды в сосуде вращающимися лопатками (рис. 263). Трение лопаток о воду, воды о стенки сосуда и трение слоев воды между собой вызывали нагревание воды. Зная массу воды и повышение температуры, можно было вычислить количество теплоты, соответствующее механической работе во время опыта, а отсюда рассчитать механический эквивалент теплоты.

Механический эквивалент теплоты является таким образом переводным множителем при переходе от тепловых единиц энергии к механическим, от килокалорий к килограммометрам. Если потребуется сделать перерасчет с калорий на джоули, то одна калория будет соответствовать 4,2 джоуля. Наоборот, один джоуль эквивалентен 0,24 калории.

Работы Майера, Джоуля, Ленца, Гельмгольца и ряда других ученых легли в основу установления важнейшего закона природы — закона сохранения и превращения энергии *).

Во всех процессах, происходящих в природе, энергия не возникает и не исчезает — она только превращается из одного вида в другой в эквивалентных количествах.

Применительно к изменениям внутренней энергии этот закон может быть записан математически так:

$$U_2 - U_1 = Q + A,$$

т. е. изменение внутренней энергии ($U_2 - U_1$) может происходить двумя способами: путем теплообмена Q и путем работы A .

Если $A = 0$, то $U_2 - U_1 = Q$ (пример: нагревание воды на горячей плите). Если $Q = 0$, то $U_2 - U_1 = A$ (пример: адиабатический процесс сжатия газа). Несмотря на то, что с устранением калорий U и A выражаются в одинаковых единицах — джоулях, своеобразие (специфичность) теплового движения и несводимость его к механическому заставляют нас сохранять разделение передаваемой энергии по способу передачи на «количество теплоты» и «количество работы».

*) В установлении закона сохранения энергии в форме, близкой к современной, особенно велика роль Роберта Майера и другого выдающегося немецкого ученого — Германа Гельмгольца.

ИЗМЕНЕНИЕ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

А. ПЛАВЛЕНИЕ И ОТВЕРДЕВАНИЕ ВЕЩЕСТВ

§ 185. **Плавление и отвердевание.** Кусок льда, внесенный в теплую комнату, через некоторое время расплавится, т. е. перейдет из твердого состояния в жидкое. Дело, очевидно, в том, что энергия теплого воздуха передается льду; внутренняя энергия льда постепенно увеличивается, причем лед сперва нагревается, а затем плавится. Кусок олова при комнатной температуре не плавится, но его можно расплавить, поместив на раскаленную плиту. Температура проиходит плавление олова, если приток энергии к нему не прекращается. Таким образом, увеличивая внутреннюю энергию тел и этим повышая их температуру, можно расплавить все вещества, за исключением, конечно, тех, которые при повышении температуры разлагаются химически или обращаются сразу в газ. И обратно, всякая жидкость, внутренняя энергия которой почему-либо убывает, может, охладившись до определенной температуры, затвердеть.

При этом существует следующее отличие между кристаллическими и аморфными веществами. Чистые кристаллические вещества плавятся и отвердевают при некоторой определенной температуре, называемой *т о ч к о й* *п л а в л е н и я*. Например, чистый лед плавится, а чистая вода замерзает при одной и той же температуре — 0°C . Смесь льда с водой имеет температуру 0°C , пока не растает весь лед или пока не замерзнет вся вода.

Аморфные вещества (например, стекло) не имеют определенной точки плавления. Они размягчаются при нагревании постепенно, оставаясь при этом вполне однородными. Можно рассматривать аморфные тела как очень густые жидкости, вязкость которых при нагревании уменьшается.

Ниже в таблице даны температуры плавления некоторых веществ (в $^{\circ}\text{C}$):

Вольфрам	3350	Бронза	900	Вода (морская)	— 2,5
Кварц	1625	Свинец	327	Ртуть	— 39
Железо (чистое)	1520	Олово	232	Спирт	— 114
Чугун	1200	Вода (дистил-		Водород	— 257
Медь	1083	лированная). 0			

Ртуть и спирт имеют очень низкие точки плавления, поэтому в обычных условиях они всегда жидкие. Еще ниже лежат точки плавления твердых веществ, получающихся при охлаждении газов (азота, кислорода, водорода и др.).

Обратим внимание, что точка замерзания равна 0°C только для химически чистой воды. Если в воде растворено какое-либо вещество, то точка замерзания воды понижается. Например, раствор 30 г поваренной соли в 100 см^3 воды замерзает при -21°C .

Что происходит с молекулами вещества при плавлении? В кристаллических веществах молекулы колеблются около определенных положений равновесия. По мере повышения температуры колебательное движение молекул усиливается. Наконец, молекулы покидают свои места и начинают двигаться беспорядочно. При этом тело теряет форму, т. е. вещество плавится. Таким образом, постепенное изменение некоторого количества — скорости молекул — приводит к скачкообразному изменению качества — переходу вещества из твердого состояния в жидкое.

У п р а ж н е н и я

243. Волосок электролампы должен выдерживать сильное накаливание. Какой из указанных в таблице металлов особенно пригоден для него?

244. Имеются сведения, что люди научились обрабатывать бронзу раньше, чем железо. Чем это объяснить?

245. Для охлаждения помещений ниже 0°C по трубам пропускается крепкий раствор соли («рассол»). Почему для этого не годится пресная вода?

§ 186. Переохлаждение жидкостей. Мы указали, что аморфные тела можно рассматривать как густые жидкости. Мы видели также, что всем аморфным веществам свойственно переходить в кристаллическое состояние (если только температура вещества не выше некоторой определенной величины). Поэтому при низких температурах аморфное состояние можно рассматривать как неустойчивое состояние, переход которого к устойчивому, кристаллическому, состоянию чем-то затруднен. Чем же именно?

Во-первых, кристаллизация не может происходить во вполне однородном веществе. Для начала кристаллизации нужны так называемые центры кристаллизации — какие-либо неоднородности, способствующие стремлению молекул к правильному расположению. Такими центрами могут быть очень мелкие обломки кристалликов. Например, при получении песка из сахарного сиропа к нему с целью ускорения кристаллизации подмешивают сахарную пудру, состоящую из очень мелких кристалликов сахара. Во-вторых, и при наличии центров кристаллизации скорость ее может быть крайне мала из-за вязкости жидкости.

Жидкость, в которой кристаллизация при охлаждении ниже точки замерзания почему-либо не произошла, называется п е р е о х -

ла ж д е н н о й. Очень легко наблюдать переохлаждение гипосульфита. Поместив в пробирку несколько кристаллов гипосульфита, осторожно расплавим их над горелкой и предоставим охлаждаться. Гипосульфит плавится около 48°C . Если принять меры, чтобы в расплав не попали кристаллики гипосульфита, то он охладится, оставаясь жидким, до комнатной температуры. Стоит, однако, бросить в пробирку мелкий кристаллик гипосульфита, как тотчас он начнет быстро расти, и скоро весь расплав закристаллизуется, причем разогреется до 48°C . Часто переохлаждены находящиеся в воздухе капельки воды. Осаждаясь на покрытых слоем льда предметах, они моментально затвердевают, образуя гладкую неровную поверхность; это можно наблюдать на почве в гололедицу. Самолеты, попавшие в пространство с переохлажденными капельками воды, быстро покрываются опасными для них наростами льда.

§ 187. Теплота плавления. Сосуд со смесью тающего льда и воды, находящийся в теплом помещении, несомненно, получает извне энергию, и его внутренняя энергия увеличивается. Та же смесь, выставленная на мороз, несомненно, теряет часть своей внутренней энергии. Однако температура смеси ни в том, ни в другом случае не меняется, оставаясь равной 0°C , пока весь лед не растает или пока вся вода не замерзнет.

Очевидно, энергия, передаваемая сосуду, поглощается плавящимся льдом. Это легко объяснить. Молекулы в кристаллах занимают такие положения, что потенциальная энергия их имеет наименьшие значения. При всяком изменении расположения молекул потенциальная энергия их увеличивается. Расплавить кусок льда — значит увеличить потенциальную энергию, обусловленную силами взаимодействия между его молекулами. Наоборот, при затвердевании вода отдает часть своей внутренней энергии, и это не дает уменьшаться температуре смеси воды и льда. Подобные явления наблюдаются для всех кристаллических веществ.

Итак, внутренняя энергия расплава больше, чем внутренняя энергия кристалла такой же массы и той же температуры.

Количество энергии, которое нужно передать 1 г кристаллического вещества, чтобы превратить его в расплав той же температуры, называется удельной теплотой плавления вещества. Столько же энергии отдает 1 г этого вещества при затвердевании.

У аморфных тел нет определенной точки плавления. К ним понятие теплоты плавления не относится.

Определение теплоты плавления производится так же, как и определение удельной теплоемкости, с помощью калориметра. Рассмотрим, например, измерение теплоты плавления льда. В калориметр, содержащий m_0 граммов воды при $t_0^{\circ}\text{C}$, помещают m граммов льда при 0°C . Лед плавится, и получается общая температура t° .

Обозначим теплоту плавления через r . Лед, плавясь, поглотит rm калорий теплоты. Далее он в виде воды нагреется до t° , поглотив при этом c_0mt калорий, где c_0 — удельная теплоемкость воды. Итого приход теплоты составит $rm + c_0mt$ калорий. В то же время вода в калориметре остынет на $t_0 - t$ градусов, отдав при этом $c_0m_0(t_0 - t)$ калорий. Если пренебречь теплоемкостью калориметра, то уравнение теплового баланса будет следующим:

$$rm + c_0mt = c_0m_0(t_0 - t),$$

откуда

$$r = \frac{c_0m_0(t_0 - t) - c_0mt}{m}.$$

Приведем значения теплоты плавления некоторых веществ.

Вещество	$10^5 \frac{\text{дж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	Вещество	$10^5 \frac{\text{дж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$
Лед	3,3	80	Ртуть	0,1	3
Железо	2,7	65	Олово	0,58	14
Свинец	0,3	6	Хлористый натрий . .	5,2	123

Зная теплоту плавления, можно рассчитать количество теплоты, необходимой для расплавления всего тела. Если тело имеет температуру ниже точки плавления, то надо принять во внимание еще и количество теплоты, нужное для предварительного нагревания тела до точки плавления.

У п р а ж н е н и я

246. В ведре с водой при 0°C плавают куски льда тоже при 0°C . Будет ли лед таять или вода замерзает? От чего это зависит?

247. Какие вещества дольше задерживаются при нагревании на точке плавления — с большой или с малой теплотой плавления? Какое значение имеет для скорости весеннего таяния снега и льда, весенних паводков и влажности почвы большая теплота плавления льда? Что происходило бы весной, если бы теплота плавления льда была так же мала, как ртути?

248. Сколько джоулей энергии требуется для расплавления 1 г льда?

249. Какое количество теплоты надо затратить, чтобы кусок льда в 5 кг, взятый при -10°C , превратить в воду при 20°C ? Иллюстрируйте расчет графиком подъема температуры тела в зависимости от времени нагревания, считая приток теплоты равномерным.

250. При водопроводных работах на расплавление чушки свинца (3 кг) полагается 5,5 кг древесного угля. Каков кпд использования угля? (Начальную температуру свинца считайте равной 7°C .)

251. Вместо вывоза снега с улиц иногда пользуются «снеготаялками». Какое количество снега при 0°C можно расплавить, затратив 1 т сухих дров, если кпд снеготаялки равен 40%?

§ 188. Лабораторная работа № 11. Определение удельной теплоты плавления льда *).

Значение работы. В процессе плавления происходит затрата энергии на разрушение кристаллической решетки, поэтому во время плавления, несмотря на непрерывающийся подвод энергии, температура плавящегося тела остается постоянной. Данная работа имеет целью способствовать уяснению происходящих при плавлении процессов превращения энергии и методов учета их.

Принадлежности: калориметр, термометр, весы с разновесом, тазик с кусками льда (размером с кусок пиленого сахара), теплая вода (около 30°C).

Выполнение работы. Взвешивают внутренний сосуд калориметра; наливают в него до половины теплую воду. Записывают температуру. Бросают в воду кусочки льда (считать его температуру равной 0°C), размешивая воду, пока лед не растает. Работу прекращают тогда, когда температура воды понизится до $8-10^{\circ}\text{C}$ (в воде не должно остаться нерастаявших кусочков льда). Измеряют окончательную температуру. Взвесив снова сосуд калориметра с имеющейся в нем водой, узнают, сколько было внесено льда.

Составляют уравнение теплового баланса, из которого находят удельную теплоту плавления льда:

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Энергия,} \\ \text{отданная} \\ \text{теплой водой} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{Энергия,} \\ \text{отданная} \\ \text{сосудом} \\ \text{калориметра} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{Энергия на} \\ \text{расплавление} \\ \text{льда} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{Энергия на} \\ \text{нагревание} \\ \text{талой воды} \\ \hline \end{array}$$

Рекомендуется иллюстрировать процесс плавления льда графиком, изобразив на одном чертеже изменение температуры воды и льда.

§ 189. Изменение объема при плавлении. Известно, что воду в водопроводных трубах нельзя доводить до замерзания: при этом трубы лопаются. Точно так же лопаются на морозе бутылки с водой. Значит, вода при замерзании увеличивает свой объем. Это ясно также из того, что лед плавает на воде, т. е. имеет меньшую плотность, чем вода.

Как же ведут себя при затвердевании другие вещества? Оказывается, что почти все вещества, наоборот, уменьшают свой объем

*) Эта работа не входит в программный перечень работ техникума и рекомендуется как дополнительная для учащихся, не выполнявших ее в школе.

при затвердевании. На рис. 264 представлена, например, форма поверхности застывшего воска. Видна выемка, получившаяся вследствие уменьшения объема.

Вода, таким образом, представляет собой исключение из общего правила. Это свойство воды стоит в ближайшей связи с неправильностями ее расширения при нагревании, а именно, при нагревании от 0°C до 4°C вода не увеличивается в объеме, а сжимается.

Отметим, что у всех веществ, которые при плавлении расширяются, увеличение внешнего давления повышает точку плавления. У воды увеличение давления, наоборот, понижает точку замерзания.

У п р а ж н е н и я

252. Почему вода, попавшая в трещины камня, при замерзании раскалывает его?

253. Почему замерзание сока в тканях растения ведет к разрушению их?

254. Есть ли опасность, что ртутный термометр лопнет, если температура понизится ниже -39°C ?

255. Будет ли плавать кусок свинца в расплавленном свинце?

256. В сосуде, наполненном до краев водой, плавает кусок льда. Перельется ли вода через край, когда лед растает?



Рис. 264. При застывании воска на его поверхности образуется выемка.

§ 190. Сплавы и их применение в технике. Расплавленные металлы могут при смешивании и затвердевании образовывать сплавы. При этом в зависимости от природы составных частей, образующих сплав, могут получаться или твердые растворы металлов или химические соединения. В сплавах — твердых растворах атомы растворимого вещества замещают в произвольной пропорции некоторые атомы растворителя в кристаллической решетке или внедряются в нее.

В случае химического соединения составных частей сплава получается кристаллическая решетка с периодическим чередованием атомов разных видов. В этом случае соотношение числа атомов составных частей вполне определенное.

Не всякое сочетание элементов дает сплав. Расплавленное железо и свинец разделяются на два слоя и сплава из них получить нельзя.

Сплавы железа, алюминия, меди, титана и других металлов находят разнообразное применение в технике. Достаточно напомнить о сплаве железа с углеродом — стали. Разные добавки (присадки) к стали резко изменяют ее свойства. Примеси хрома, никеля, ванадия, вольфрама, молибдена, марганца придают стали большую твердость, прочность и другие ценные качества.

Температура плавления сплавов обычно ниже, чем у чистых металлов, входящих в их состав. Легкоплавкие сплавы находят применение в качестве припоев для пайки, для заливки подшипников, для изготовления плавких предохранителей.

Но понижение точки плавления сплава не является общим правилом. Известны сплавы с высокой температурой плавления. Обычно это малоуглеродистые стали с добавкой молибдена, никеля, хрома, ванадия. Резцы, изготовленные из твердых жаростойких сплавов, позволяют обрабатывать металл со скоростью 700—800 вместо 10—30 м/мин, доступных для обычных режущих инструментов. В настоящее время в связи с бурным развитием современной техники изучение условий создания жаропрочных сплавов приобретает особенно важное значение.

Постройка паровых и газовых турбин, ракет и космических кораблей невозможна без применения жаропрочных материалов.

В. ИСПАРЕНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ ВЕЩЕСТВ

§ 191. Испарение и конденсация. В ясный летний день быстро высыхают лужи, оставшиеся после дождя, сено, белье на веревке. Куда же исчезает вода из высыхающих предметов? Она испаряется, т. е. превращается в невидимый водяной пар, смешивающийся с окружающим воздухом.

К вечеру, когда становится холодно, испарение прекращается. Становится сыро. Появляются туман и роса. Откуда они берутся? Это происходит обратный процесс: пары воды, находящиеся в воздухе, конденсируются в воду.

Все жидкости испаряются, но способность испаряться у различных жидкостей разная. Некоторые жидкости — эфир, бензин, спирт — испаряются очень быстро. Такие жидкости называются *летучими*. Другие жидкости, например вода или керосин, испаряются более медленно. Некоторые жидкости, например ртуть или масло, испаряются очень медленно, почти незаметно.

Твердые тела тоже немного испаряются; заметно испаряется лед, например с замерзшего белья, испаряются нафталин и камфара.

§ 192. Насыщение парами. Одна и та же жидкость, например вода, при разных условиях испаряется по-разному. Это зависит от двух обстоятельств: от скорости удаления образующихся паров (смены воздуха) и от температуры. Влиянием температуры мы займемся далее (§ 194).

Как влияет на испарение смена воздуха? На ветру и в открытом месте белье сохнет быстро. При безветрии испарение идет медленнее. Значит, чем быстрее сменяется воздух, чем быстрее удаляется удаляющийся пар, тем скорее идет испарение. Если же поместить

жидкость в замкнутое пространство, например в закупоренную бутылку, то образовавшийся пар никуда не удаляется, и это прекращает дальнейшее испарение.

Когда испарение жидкости в данном пространстве прекратилось, говорят, что в системе жидкость — пар достигнуто равновесие, пространство насыщено паром и пар является насыщенным. Если же насыщение не достигнуто, пар является ненасыщенным.

Почему же испарение прекращается, если не удалять пара? Это объясняется так. При испарении жидкости отдельные более быстро движущиеся молекулы вылетают через ее поверхность, преодолевая силы сцепления, действующие на поверхности жидкости. Вырвавшись за пределы жидкости и испытав несколько столкновений с другими молекулами газа, молекула может снова влететь в жидкость.

Таким образом, идет двойной процесс: одни молекулы вырываются из жидкости, другие возвращаются в нее. Пока число уходящих из жидкости молекул превышает число возвращающихся обратно, жидкость испаряется. По мере увеличения числа молекул над жидкостью обратно возвращается их все больше и больше. Наконец, когда над жидкостью скопится достаточное количество молекул, то обратно в жидкость будет возвращаться столько же молекул, сколько и вылетает из нее. Количество пара перестанет увеличиваться — наступит насыщение. Если по каким-либо причинам количество возвращающихся молекул превысит количество вылетающих, происходит конденсация пара.

У п р а ж н е н и я

257. Почему на лесных дорогах большее количество луж, чем на полевых?

258. Почему белье, развешанное на веревке, сохнет, а белье, сложенное в кучу, остается мокрым?

§ 193. Испарение различных жидкостей. Для быстрого испарения воды нужна интенсивная смена воздуха, например ветер. Для того же, чтобы испарились эфир или бензин, ветра не нужно вовсе; они быстро испаряются даже при небольшой смене воздуха в комнате. Это показывает, что в случае воды уносится с воздухом гораздо меньше паров, чем для эфира. Иными словами, в одно и то же пространство эфира испарится много, а воды — мало. Таким образом, у различных жидкостей для насыщения при одной и той же температуре требуется разное количество пара: у летучих жидкостей больше, у нелетучих — меньше.

Соответственно с этим и давление насыщающих паров у разных веществ разное. О давлении насыщающих паров можно судить по такому опыту. Бутылку с резиновой пробкой присоединяют к ртут-

ному манометру. В бутылку помещают закупоренную пробирку с эфиром (рис. 265, а). Сильно встряхнув бутылку, разобьем пробирку, и эфир начнет испаряться. Согласно закону Дальтона (§ 169) давление его паров прибавится к давлению воздуха, и манометр покажет увеличение давления (рис. 265, б). Спустя некоторое время ртуть в манометре перестанет подниматься. Это значит, что количество паров эфира внутри бутылки больше не увеличивается — достигнуто насыщение. Повторив этот опыт с разными жидкостями (эфиром, спиртом, водой), мы увидим, что давления их паров различно. Пары воды дают слабо, пары спирта — немного сильнее, пары эфира. Давление паров ртути при комнатной температуре столь мало, что им обычно пренебрегают.

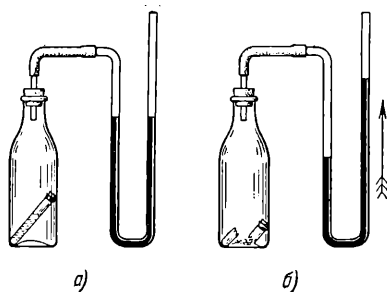


Рис. 265. а) В бутылке находится закупоренная пробирка с эфиром; манометр показывает, что давление воздуха равно атмосферному; б) пробирка разбита, и к воздуху примешались пары эфира; манометр показывает увеличение давления.

Отчего же для разных жидкостей насыщение достигается при разных количествах пара? Это зависит от сил сцепления между молекулами. Чем меньше силы сцепления, тем больше молекул вылетает из жидкости и, следовательно, тем больше молекул должно носиться над жидкостью, чтобы возврат их покрывал уход из жидкости.

Отчего же для разных жидкостей насыщение достигается при разных количествах пара? Это зависит от сил сцепления между молекулами. Чем меньше силы сцепления, тем больше молекул вылетает из жидкости и, следовательно, тем больше молекул должно носиться над жидкостью, чтобы возврат их покрывал уход из жидкости.

§ 194. Свойства насыщающих паров. Если в опыте, изображенном на рис. 265, брать бутылки разного объема, а пробирки с одной и той же жидкостью, мы получим всегда одно и то же давление паров, если только не изменилась температура. Подобно этому, манометр парового котла при определенной температуре показывает всегда одно и то же давление, независимо от того, какое пространство занимает в котле пар.

Легко понять, почему это так. Если увеличить объем, заполненный паром, то жидкость будет испаряться до тех пор, пока не получатся прежние плотность и давление пара. При этом масса пара увеличится. Если уменьшить объем, то часть паров сконденсируется в жидкость и масса пара уменьшится. Напомним, что законы, которые имеют место для газов (закон Бойля — Мариотта, закон Шарля), относятся к определенной массе газа. В случае паров, находящихся в соприкосновении с жидкостью, нельзя говорить об определенной массе пара. Поэтому газовые законы к насыщающим парам неприменимы.

Значит, в отличие от газов давление соприкасающихся с жидкостью паров нельзя изменить, сжимая их или давая им расширяться. Давление насыщающих паров при данной температуре всегда одинаково.

Это обуславливает следующее важное для техники отличие между насыщающим паром и воздухом. Воздух, попавший в трубу с водой, «пружинит», образуя «воздушную подушку», давление которой возрастает по мере уменьшения ее объема.

Насыщающий пар не может «пружинить». Если давление воды заставляяет пространство, заполненное паром, уменьшаться, то пар без остатка может превратиться в воду.

Поэтому, если превращение пара в жидкость происходит вблизи твердой стенки, то жидкость резко ударяет в стенку. В некоторых случаях удары жидкости в твердые тела разрушают их (это явление называется кавитацией). Например, если форма пароходного винта такова, что при его вращении в воде за ним образуются пузыри водяного пара, то возникает кавитация, быстро разрушающая винт.



У п р а ж н е н и е

259. На рис. 266 изображен «водяной молоток» — стеклянная трубка, заполненная водой и ее парами (воздуха в трубке нет). При опрокидывании прибора вода сквозь узкий перешеек без задержки перетекает из одной части прибора в другую. Если резким рывком подбросить столб воды в приборе кверху, то при падении его вниз на дно слышен стук, как при ударе молотком. Объясните это явление.

Рис. 266.

§ 195. **Насыщение парами при различных температурах.** Как влияет на плотность насыщающих паров температура? Это влияние очень сильно. В жаркий день предметы сохнут быстрее, чем в холодный. Белье у теплой печки высыхает скорее, чем вдали от нее. Наоборот, при охлаждении испарение замедляется и прекращается, а затем начинается обратное сгущение пара в жидкость: выпадает роса, появляется туман. Холодный предмет, внесенный в теплую комнату, «запотевает». Это значит, что ненасыщающие пары воды при охлаждении сделались насыщающими.

Итак, чем выше температура, тем больше плотность пара, при которой достигается насыщение пространства. В самом деле, в нагретой жидкости молекулы движутся быстрее, потому гораздо большее их число имеет достаточную скорость, чтобы вылететь за пределы жидкости. К тому же жидкость при нагревании расширяется, и это вызывает ослабление сил сцепления.

Наоборот, в холодной жидкости возвратившиеся в нее молекулы пара теряют свою скорость, а следовательно, и возможность

вылететь обратно. Поэтому пар, пришедший в соприкосновение с холодной жидкостью, конденсируется.

Увеличению плотности насыщающих паров при повышении температуры соответствует и резкое повышение их давления. Наоборот, давление пара, приходящего в соприкосновение с холодной стенкой, сразу уменьшается. И то и другое можно показать, опустив бутылку с испаряющимся эфиром в теплую воду или в тающий снег. В первом случае манометр покажет значительное увеличение давления, а во втором — уменьшение.

Резкое изменение давления насыщающих паров в зависимости от температуры станет понятным, если обратить внимание на то, что у насыщающих паров при повышении температур увеличивается не только скорость молекул, как у газа, но и число их в 1 см^3 .

У п р а ж н е н и я

260. Что происходит со стенами, когда зимой одни комнаты в доме отапливаются, а другие — нет?

261. Почему в ясный летний день, когда нагретый воздух поднимается вверх, появляются облака?

262. При зажигании спички над горячим керосином может произойти вспышка его паров, а над холодным — нет. Почему?

263. Наибольшая высота подъема воды, практически достигаемая всасывающими насосами, составляет: 6,75 м при 15°C ; 5,3 м при 40°C ; 2,75 м при 60°C . Чем объяснить убывание высоты подъема горячей воды?

264. Если пустить пар из кипятильника по стеклянной трубке, то вначале прогреется до температуры пара только ближняя к вводу пара часть трубки, а остальная останется совершенно холодной. Когда прогреется вся трубка, из ее открытого конца пойдет пар, образуя при смешивании с холодным воздухом облачка тумана. Объясните явления. Что находится в той части трубки, которая прогрелась? Что находится в холодной части трубки?

§ 196. Кипение. Нагревая воду в открытом сосуде, мы заставим ее в конце концов закипеть. В отличие от испарения при более низких температурах, при кипении пар образуется не только на поверхности, но и внутри жидкости, создавая пузыри. Они бурно поднимаются вверх и выбрасывают пар в пространство над водой. Подобно воде могут кипеть и все другие жидкости.

Как только жидкость закипела, дальнейшее повышение ее температуры прекращается. Температура, при которой происходит кипение при нормальном давлении, называется т о ч к о й к и п е н и я данной жидкости. Точки кипения ($^\circ \text{C}$) различных жидкостей сильно разнятся, как видно из следующих данных:

Вода	100	Железо жидкое	2450
Спирт	78	Медь жидкая	2810
Эфир	35	Жидкий кислород	—181
Ртуть	357	Жидкий водород	—253

Почему же кипение, т. е. образование пузырей пара, начинается лишь при определенной температуре? Чтобы образовался пузырь,

нужно «приподнять» воду, а вместе с тем преодолеть и давление атмосферного воздуха. Стало быть, жидкость закипает при той температуре, при которой давление ее паров в состоянии преодолеть давление жидкости и атмосферное давление.

Отсюда ясно, почему более летучие жидкости — эфир, спирт — кипят при сравнительно низких температурах. У них давление паров уже при комнатной температуре велико. Поэтому нужно лишь небольшое нагревание, чтобы давление их паров достигло атмосферного. Давление паров ртути при комнатной температуре ничтожно. Оно становится равным атмосферному лишь при 357°C .

Отметим, что при кипении смеси (например, нефти) сперва выкипает более летучая часть (керосин, бензин и т. д.). Этим пользуются для разделения фракций жидкостей.

Отметим также, что кипение растворов (например, водного раствора сахара) происходит всегда при более высокой температуре, чем кипение чистого растворителя (воды).

У п р а ж н е н и я

265. Если в самоваре остались горячие угли, а вода вся выкипела, то самовар может распаяться. Почему?

266. Для варки клея устраивают сосуд с двойными стенками, между которыми наливают воду. Зачем это делают?

§ 197. Кипение при пониженном и при повышенном давлении. Если уменьшать давление на поверхность воды, например, откачивая воздух из сосуда насосом, то вода закипает не при 100°C , а при более низкой температуре, например при 80°C . Это объясняется тем, что при пониженном давлении над жидкостью для кипения нужно меньшее давление паров, и оно достигается при более низкой температуре.

Наоборот, при увеличении давления кипение жидкости начинается при более высоких температурах. Особенно высокие температуры кипения получаются в прочных герметичных сосудах (а в т о к л а в а х), в которых можно получить большое давление (рис. 267). Такие сосуды употребляются в химической промышленности в тех случаях, когда для ускорения процессов нужна более высокая температура жидкости, чем можно получить при атмосферном давлении.

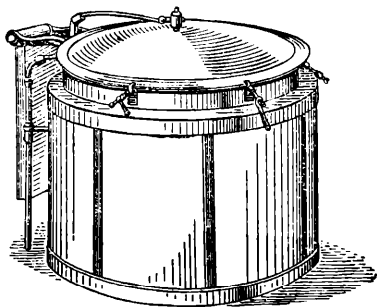


Рис. 267.

У п р а ж н е н и я

267. Почему на высоких горах плохо разваривается мясо?

268. На равнине точка кипения чистой воды в открытом сосуде колеблется в разные дни от 98,5 до 101° С. Чем это можно объяснить?

269. Почему, пока жидкость не кипит, пузыри пара, образующиеся у горячего дна сосуда, поднимаясь вверх, снова уменьшаются и исчезают?

270. В кондитерском производстве раствор сахара надо выпаривать при температуре ниже 100° (иначе он пригорает). Как этого достичь?

271. В круглодонной колбе кипятят воду, затем колбу снимают с огня и быстро закупоривают резиновой пробкой (пар вытеснил из колбы воздух). Если теперь перевернуть колбу и облить ее холодной водой, то вода в колбе вскипает (рис. 268). Объясните, почему.

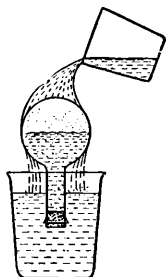


Рис. 268.

§ 198. Давление насыщающего водяного пара при различных температурах. Для расчета паровых двигателей очень важно знать давление водяного пара при разных температурах.

Результаты промеров этого давления приведены в таблице:

Температура, °С	Давление водяных паров, мм рт. ст.	Плотность водяных паров, $\frac{g}{m^3}$
— 10	1,95	2,14
0	4,58	4,84
5	7,54	6,84
10	9,21	9,4
15	12,8	12,8
20	17,54	17,3
50	92,5	83
80	355,0	293
100	760,0	600

Температура, °С	Давление водяных паров, $\frac{kg}{cm^2}$	Плотность водяных паров, $\frac{kg}{m^3}$
120	2	1,1
133	3	1,6
151	5	2,6
179	10	5,0
197	15	7,4
300	87,6	—

На рис. 269 приведена кривая давления водяного пара при различных температурах.

У п р а ж н е н и я

272. Определите приблизительно, пользуясь кривой рис. 269, какое давление имеет пар при 140°C ; при 185°C .

273. До какой температуры надо нагреть паровой котел, чтобы получить давление 4 кг/см^2 ? 13 кг/см^2 ?

274. Как сильно надо разредить воздух под колоколом воздушного насоса, чтобы вода закипела при 50°C ? при 20°C ?

§ 199. Перегретый пар. Как мы узнали в предыдущем параграфе, каждой определенной температуре насыщенного пара соответствует определенное давление. Это как раз те давления пара, какие соответствуют точкам конденсации при указанных температурах. При меньшем давлении конденсации не происходит — пар является ненасыщенным.

Для ненасыщенного пара одной какой-нибудь определенной температуре соответствует бесчисленное множество значений давления. Например, ненасыщенный пар воды при значениях давления ниже $17,54 \text{ мм}$

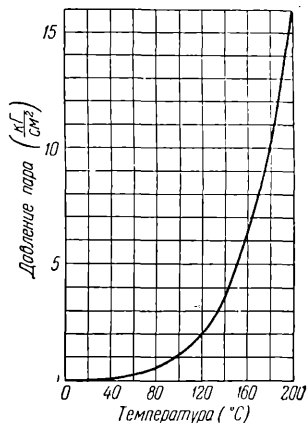


Рис. 269. График зависимости давления водяного пара от температуры.

20°C может иметь любые рт. ст. : 17, 16, 15 и т. д.

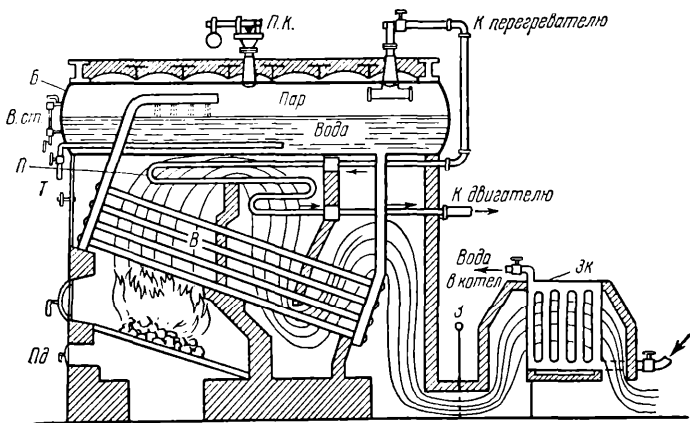


Рис. 270. Схема котельной установки. Водотрубный котел: Б — барабан котла, В — водотрубная часть, В.ст. — водомерное стекло, П — перегреватель, Т — труба для подачи воды в котел, Пд — поддувало, П.к — предохранительный клапан, З — заслонка, Эк — экономайзер для подогрева воды.

И наоборот, определенному давлению ненасыщенного пара может соответствовать бесчисленное множество температур выше температуры насыщенного пара данной температуры. Например, водяной пар при давлении 760 мм рт. ст. может быть нагрет до 101, 102, 103, ..., 110, ..., 200° С и т. д.

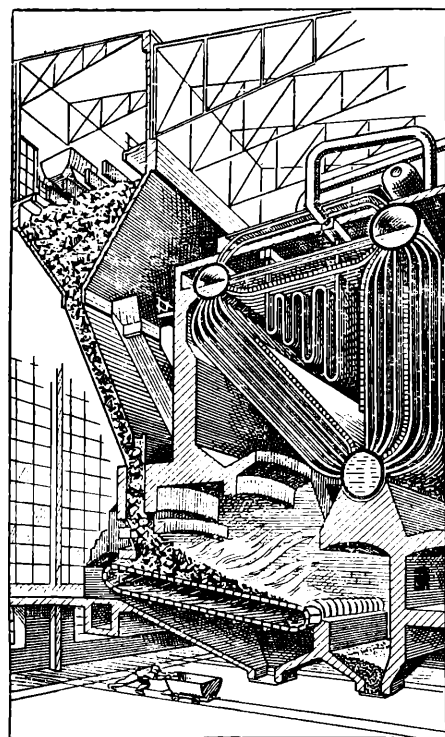


Рис. 271. Современная котельная установка большой мощности.

Поскольку все эти температуры выше соответствующей данному давлению насыщенного пара (100° С), то в технике для ненасыщенных паров укоренилось название «перегретый пар». Перегретый пар находит самое широкое применение в технике. Основная выгода применения перегретого пара вместо насыщенного состоит в том, что такой пар не конденсируется, пока не охладится до температуры насыщенного пара данного давления.

Перегрев пара ведут на 150—180° выше точки кипения при данном давлении. Так, перегретый пар, поступая в цилиндр паровой машины или на лопатки паровой турбины, не успевает охладиться до температуры конденсации. Перегрев пара производится в специальных пароперегревателях, представляющих собой систему изогнутых трубок, располагаемых в первом дымоходе или в самой топке, где нагревается уходящими, но еще горячими газами. Такое использование уходящих продуктов сгорания повышает экономичность всей установки. На рис. 270 изображена схема котельной установки с пароперегревателем.

В современной технике применяются котлы более сложных устройств, представляющих собой сложную систему труб и барабанов. Весь котельный агрегат помещается в котельной, по высоте превышающей иногда пятиэтажный дом. Рис. 271 дает некоторое представление о такой котельной установке.

Экономически целесообразно максимально увеличивать мощность паросиловой установки, давление и температуру пара. Уже существуют турбины мощностью 200—300 тыс. *квт* на параметры пара 240 *ат* и 580° С, и это не предел, разрабатываются проекты для турбин мощностью 500 тыс. *квт* и более. Переход от давлений 100 *ат* и температур 510° С к давлениям 300 *ат* и температурам 650° С даст экономию топлива 15—20%.

Рис. 272 изображает схему оригинальной конструкции котла, называемого прямооточным. В нем нет резервуаров (барбанов) с запасом большого количества воды. Вся конструкция представляет собой систему последовательных труб, в которых поступающая в котел вода сначала нагревается до парообразования, потом пар перегревается и поступает к потребителю (паровой машине или турбине).

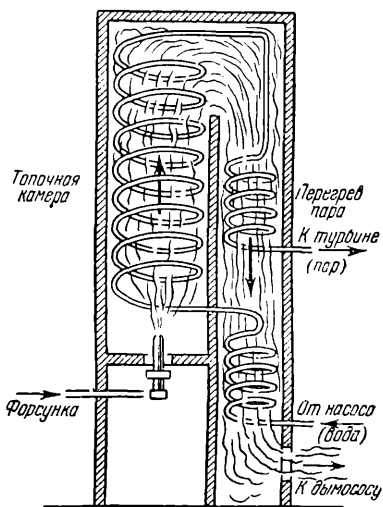


Рис. 272. Схема прямооточного котла.

§ 200. Теплота испарения.

Всем известно, что в мокром платье холодно, особенно на востру. Дело в том, что испарение, подобно плавлению, требует притока энергии. Эта энергия поступает от окружающих тел (например, от тела человека, одетого в мокрую одежду), отчего внутренняя энергия этих тел уменьшается и температура понижается. Ветер же ускоряет испарение. Особенно сильное охлаждение получается при испарении летучих жидкостей, например эфира.

Теперь рассмотрим, что происходит при кипении жидкости. Пока нагреваемая жидкость не закипела, испарение происходит только с ее свободной поверхности. При достаточном притоке энергии на испарение тратится лишь часть ее, а остальная часть идет на увеличение внутренней энергии жидкости (повышается температура жидкости). Когда достигнута температура кипения, испарение уже не ограничивается свободной поверхностью жидкости, а происходит также внутри пузырей. При этом образуется такое количество пара, что на испарение тратится весь приток энергии. Внутренняя энергия жидкости теперь не увеличивается и температура жидкости не повышается.

Почему испарение требует подвода энергии к жидкости?

Это понятно. При образовании пара молекулы воды отдаляются друг от друга; следовательно, внутренняя энергия пара больше, чем энергия воды, из которой он получился. Кроме того, при образовании пара производится работа против сил атмосферного давления.

При конденсации паров, наоборот, энергия передается от получающейся жидкости окружающим телам. Это проще всего обнаружить, дохнув на руку. Пары, содержащиеся в выдыхаемом воздухе, конденсируются на руке, увлажняя ее и вместе с тем нагревая. Очень сильно прогревается вода, сквозь которую пропускают пар. Нагреванием окружающих тел при конденсации паров часто пользуются в технике, например для быстрого прогрева воды (рис. 273). Это же явление используется в паровом отоплении зданий.

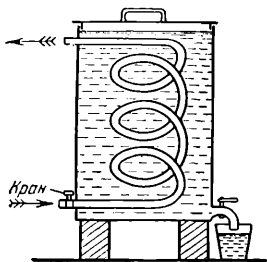


Рис. 273. Прогревание воды в кипятильнике паром, идущим по трубе.

Количество теплоты, необходимое для превращения 1 г жидкости в пар той же температуры, называется удельной теплотой испарения данного вещества.

Удельную теплоту испарения жидкостей, например воды, определяют при помощи калориметра. Налив в калориметр известное количество воды, ее нагревают паром при 100°C , проходящим по змеевику, причем пар конденсируется. Измерив, сколько сконденсировалось пара, и отсчитав начальную и конечную температу

ры воды в калориметре, можно составить уравнение теплового баланса (§ 181) и определить теплоту испарения воды при 100°C .

Удельная теплота испарения разных жидкостей и при разных температурах различна. Теплота испарения всех жидкостей при повышении их температуры уменьшается:

	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Теплота испарения	
		$10^3 \frac{\text{дж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$
Вода	17	24,5	586
»	60	23,5	564
»	100	22,6	539
»	151	21,0	504
»	179	20,0	481
»	300	13,9	330
Спирт	78	8,6	205
Ртуть	357	3,0	68
Аммиак	-10	13,5	322

Из таблицы видно, что у воды теплота испарения особенно велика. Это обстоятельство имеет большое значение. Испарение воды происходит в природе в громадных количествах. На него тратится примерно около половины всей энергии солнечных лучей,

достигающих поверхности Земли. Именно испарение умеряет жару в ясную погоду. С другой стороны, при холоде (например, ночью) пары воды конденсируются, выделяя при этом энергию, и не позволяют воздуху чрезмерно охлаждаться.

Для определения удельной теплоты парообразования пользуемся так же, как и при определении удельной теплоты плавления, калориметром. В калориметр, содержащий m_0 граммов воды, при температуре t_0 °С пропускаем m граммов пара при температуре парообразования t_n °С. Пар конденсируется, и конденсат смешивается с водой калориметра и нагревает ее. Общая температура в калориметре устанавливается t . Обозначим удельную теплоту парообразования через r . При конденсации пара выделяется энергия rm дж. Далее конденсат, остывая от температуры парообразования (равной температуре конденсации) до окончательной температуры смеси в калориметре, выделит $m(t_n - t)$. Итого приток энергии составит: $rm + m(t_n - t)$. По нагреванию же воды в калориметре это же количество энергии равно $m_0(t - t_0)$ дж. Без учета теплоемкости калориметра уравнение теплового баланса по закону сохранения энергии будет

$$rm + m(t_n - t) = m_0(t - t_0),$$

откуда

$$r = \frac{m_0(t - t_0) - m(t_n - t)}{m}.$$

При лабораторном определении удельной теплоты парообразования теплоемкость калориметра, конечно, учитывается (см. ниже § 201).

У п р а ж н е н и я

275. Почему чай стынет скорее, если на него дуть?
276. Почему фонтаны умеряют жару?
277. Почему ожог паром сильнее, чем ожог кипятком?
278. Можно ли пропусканием водяного пара при 100°С довести воду до кипения?
279. Определите количество теплоты, нужное для того, чтобы 200 г воды при начальной температуре 10°С довести до кипения при нормальном давлении и превратить в пар.
280. Вода поступает в котел при 10°С и превращается в нем в пар при 179°С. Сколько каменного угля надо затратить на получение 1 кг пара, если КПД котла равен 75%?
281. В 2 л воды при 20°С пропускают 100 г водяного пара при 100°С. До какой температуры нагреется вода? Иллюстрируйте расчет графиком.
282. Смесь 5 кг льда и 15 кг воды при 0°С нагревается пропусканием пара при 100°С до окончательной температуры 80°С. Определите количество пропущенного пара.
283. Подсчитайте полезную теплоту сгорания дров 50% влажности. При расчете примите калорийность сухих дров равной 3000 ккал/кг. Начальную температуру считайте 20°С.

§ 201. Лабораторная работа № 12. Определение удельной теплоты испарения воды.

Значение работы. Работа способствует лучшему усвоению очень важного для теплотехники понятия теплоты испарения. Кроме того, она углубляет понимание процессов превращения энергии при испарении.

Принадлежности: кипятильник для получения пара, электроплитка, калориметр, термометр, сухопарник, весы с разновесом.

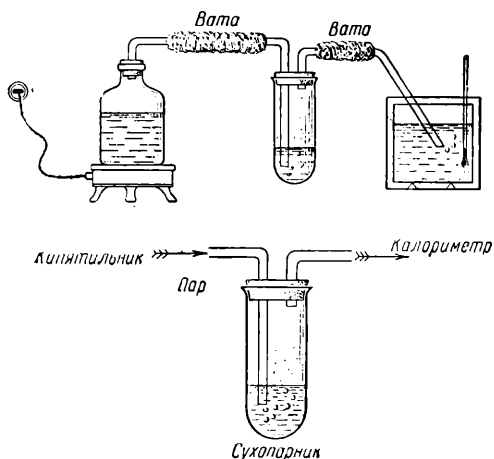


Рис. 274.

Выполнение работы. Взвешивают внутренний сосуд калориметра, наливают до половины водой и снова взвешивают. Измеряют температуру воды. Пар из кипятильника (медный или жестяной сосуд, в крайнем случае колба) пропускается через сухопарник в калориметр (рис. 274). Наблюдают за повышением температуры. Когда температура воды в калориметре поднимется до 50—60° С, опыт прекращают, вынув паропроводную трубку из калориметра, и только после этого выключают плитку. Если забыть это сделать, то воду из калориметра засосет в кипятильник. Количество пропущенного в калориметр и сконденсировавшегося в нем пара определяют по разности весов воды в калориметре до и после пропускания пара. Составляют уравнение теплового баланса, из которого и находят удельную теплоту парообразования воды:

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Энергия,} \\ \text{переданная} \\ \text{при конденса-} \\ \text{ции пара} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{Энергия,} \\ \text{переданная} \\ \text{конденсацион-} \\ \text{ной водой} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{Энергия,} \\ \text{полученная} \\ \text{холодной водой} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{Энергия,} \\ \text{полученная} \\ \text{сосудом} \\ \text{калориметра} \\ \hline \end{array}$$

§ 202. Влажность воздуха. В воздухе всегда имеются водяные пары. Если их слишком много, то появляются частые туманы, осадки, предметы отсыревают, стены домов покрываются плесенью и т. д. Если паров в воздухе, напротив, слишком мало, то это губит растения, вызывает жажду, приводит к растрескиванию деревянных предметов и т. д. Как оценить количество водяных паров в воздухе? Можно пропустить определенный объем воздуха сквозь трубку с веществом, поглощающим пары воды (хлористый кальций). Определив, насколько увеличился вес трубки, можно узнать, сколько паров (по весу) находится в единице объема воздуха.

Зная плотность водяных паров, можно найти их давление. Давление водяных паров, находящихся в воздухе, называется *абсолютной влажностью воздуха*.

Кроме абсолютной влажности, имеет большое значение *относительная влажность*. Относительной влажностью воздуха называется отношение абсолютной влажности к давлению насыщающих водяных паров при данной температуре. Легко видеть, что *при неизменной абсолютной влажности повышение температуры ведет к уменьшению, а понижение — к увеличению относительной влажности*.

Имея подробную таблицу давлений насыщающих водяных паров, можно приблизительно определить абсолютную и относительную влажности следующим способом. Начнем медленно охлаждать блестящую металлическую поверхность (например, стенки металлического стаканчика можно охлаждать, бросая кусочки льда в налитую в него воду). При некоторой определенной температуре на поверхности стаканчика появится влажный налет (*роса*). Пусть термометр, опущенный в воду, в это время показывает 5°C . Так как роса начинает появляться, когда водяные пары в воздухе делаются насыщающими, то по таблице (стр. 280) мы можем найти, что абсолютная влажность равна $7,54$ мм рт. ст. Если температура воздуха в это время равна 20°C , то, пользуясь той же таблицей, найдем, что относительная влажность равна $\frac{7,54}{17,54} \cdot 100\% = 43\%$.

Существуют приборы, непосредственно указывающие относительную влажность воздуха (*гигрометры*). Устройство одного из типов гигрометра показано на рис. 275. Оно основано на свойстве очищенного от жира волоса набухать и удлиняться во влажном воздухе. При увеличении длины волоса *В* грузик *Г* оттягивает рычажок, к которому прикреплен нижний конец волоса, вниз и поворачивает стрелку *С*. Деления на шкале указывают относительную влажность воздуха в процентах.

Помимо гигрометров, для определения влажности часто употребляют *психрометры*. Психрометр состоит из двух одинаковых термометров (рис. 276); резервуар одного из них (на рисунке — левого) обернут материей, опущенной концом в чашечку с водой и

поэтому влажной. Вследствие испарения воды резервуар термометра охлаждается и притом тем сильнее, чем суше воздух. В результате разница между показаниями термометров будет тем большей, чем меньше влажность воздуха. К прибору прилагается табличка, по

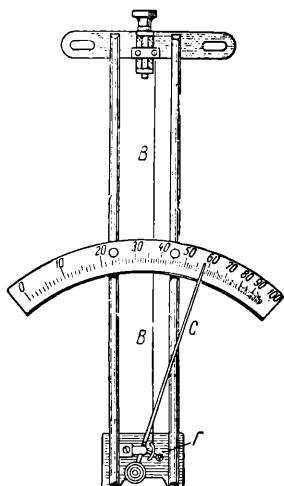


Рис. 275. Волосяной гигрометр.

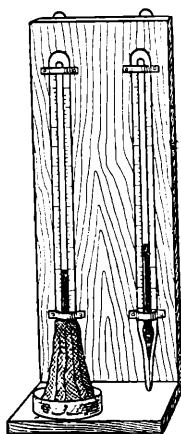


Рис. 276. Психрометр.

которой можно найти влажность воздуха, соответствующую отсчитанным показаниям термометров. Составить такую табличку можно, пользуясь иными приборами для определения влажности воздуха.

У п р а ж н е н и я

(При выполнении упражнений пользуйтесь таблицей на стр. 280.)

284. Давление водяных паров в воздухе при температуре 10°C равно 5 мм рт. ст. Какова относительная влажность? Каково давление остальных газов воздуха, если атмосферное давление равно 760 мм рт. ст.?

285. Влажность воздуха при 10°C равна 80%. Сколько паров содержится в 1 м^3 ?

286. При какой температуре появится роса, если в 1 м^3 воздуха содержится 6,84 г водяных паров?

287. Почему заморозки ночью маловероятны, если вечером прошел дождь?

§ 203. Критическая температура. В сосуде, в котором находятся только жидкость и ее пар, мы имеем два состояния вещества: внизу — жидкость, сверху — насыщающий пар.

При всякой ли температуре имеет место такое положение? На этот вопрос опыт дает отрицательный ответ. При температурах выше некоторой (для разных веществ различной) температуры граница между жидкостью и паром исчезает и сосуд оказывается запол-

ненным однородным веществом. Это легко наблюдать, нагревая запаянную трубочку, в которой находятся жидкий эфир и его пар (рис. 277). При некоторой температуре граница между эфиром и его паром исчезает. При последующем охлаждении появляется густой туман, после чего жидкий эфир и его пар снова разделяются. Температура, при которой исчезает граница между жидкостью и паром, называется критической температурой. Очевидно, что вещество, нагретое выше его критической температуры, не может существовать в виде жидкости.

Необходимость существования критической температуры ясна из следующих соображений. При низких температурах плотности жидкости и ее насыщающего пара сильно разнятся. По мере повышения температуры разница между плотностями жидкости и пара уменьшается: плотность насыщающего пара при повышении температуры увеличивается (§ 197), а плотность жидкости вследствие теплового расширения уменьшается. Наконец плотности пара и жидкости в сосуде сравниваются. Равенство плотностей жидкости и пара означает, что различие между ними исчезает. Таким образом, критическая температура вещества есть та температура, при которой плотности жидкости и пара сравниваются друг с другом.

Из этого можно сделать несколько выводов. Мы указывали (§ 200), что по мере повышения температуры теплота испарения всех веществ уменьшается. Русский физик М. П. Авенариус впервые указал, что при критической температуре теплота испарения делается равной нулю. Д. И. Менделеев указал, что при критической температуре исчезает также поверхностное натяжение жидкости.

Критические температуры различных веществ весьма различны. Приведем примеры:

Вещество	Критическая температура, °C
Вода	374
Этиловый эфир	194
Углекислота	31
Кислород	—119
Азот	—147
Водород	—240
Гелий	—268

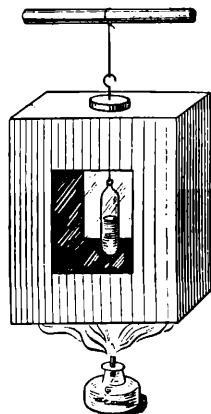


Рис. 277. Прибор Авенариуса для наблюдения критического состояния.

Внутри воздушной бани находится ампула с эфиром, видимая сквозь окошко.

§ 204. Сжижение газов. Исследования превращений газов в жидкости были начаты в начале прошлого века. Для этого применяли большие давления и охлаждение. В скором времени удалось произвести сжижение многих газов. Только некоторые газы (азот, кислород, водород и др.) не поддавались сжижению, несмотря на применение громадных давлений. Когда было обнаружено существование критической температуры, стало ясно, что для получения жидких азота, кислорода и др. необходимо их охлаждение ниже критической температуры, т. е. более глубокое, чем применявшееся ранее. В настоящее время удалось получить в жидком и в твердом состояниях все известные вещества *).

В машинах для сжижения газ сперва подвергается сжатию. От этого он нагревается (упражнение 229, г). Затем его охлаждают проточной водой и дают ему расшириться, что ведет к охлаждению газа. Таким образом удается настолько охладить газ, что он превращается в жидкость.

В настоящее время в технике широко используется сжижение воздуха для извлечения из него кислорода, азота, аргона и других газов. При этом учитывается тот факт, что из сжиженного воздуха испаряется сначала аргон, затем азот и, наконец, кислород. Таким способом эти элементы отделяют друг от друга. Аргон и другие инертные газы, входящие в состав воздуха, широко применяются в осветительной технике. Азот нужен хими-

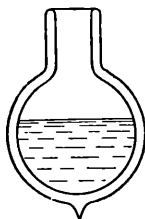


Рис. 278. Сосуд Дьюара для хранения сжиженных газов.

Снизу — запаянный кончик трубки, через которую была произведена откачка воздуха из пространства между двойными стенками сосуда.

ческой промышленности для синтеза аммиака, кислород — для дутья в доменных, мартеновских и конверторных печах. Применение при этом жидкого кислорода способствует значительному увеличению производства чугуна и стали. Кислород также широко

*) Среди работ по технике сжижения газов необходимо отметить блестящие работы советского физика П. Л. Капицы. Он изобрел дешевый способ сжижения воздуха и оригинальный способ сжижения гелия.

применяется для медицинских целей. Особо отметим применение жидкого кислорода как одного из лучших окислителей ракетного топлива в космических ракетах. Жидкий кислород, пропитывая вату, опилки и т. п., образует взрывчатое вещество (о к с и л и к в и т), очень удобное для целей мирной подрывной техники. Сжиженные газы (кислород, азот и др.) имеют при атмосферном давлении температуру почти — 200° С. Их можно сохранить только в сосудах с двойными стенками (металлическими или посеребренными стеклянными), из пространства между которыми воздух удален (с о с у д ы Д ь ю а р а, рис. 278). Такое устройство сосуда существенно уменьшает передачу энергии. Так как сосуды Дьюара не закупорены, то жидкий кислород постепенно в течение нескольких дней испаряется и поэтому остается все время холодным.

У п р а ж н е н и е

283. Можно ли хранить жидкий воздух в плотно закрытом сосуде?

Г Л А В А Х V I

Т Е П Л О В Ы Е М А Ш И Н Ы

§ 205. Работа при расширении газа и пара. В тепловых двигателях мы используем внутреннюю энергию топлива (химическую), превращая ее в механическую энергию.

Процесс превращения энергии в тепловых двигателях осуществляется при помощи вещества-носителя энергии, называемого

рабочим телом. Таким рабочим телом в тепловых двигателях является пар или газ. Находясь под высоким давлением, он обладает значительным запасом энергии, которую и передает при расширении поршню двигателя или лопаткам турбины. Несколько по иному принципу устроены реактивные двигатели, в которых при истечении газа в одну сторону создается реакция отдачи в противоположном направлении. Но во всех указанных случаях работа совершается за счет расширения газа.

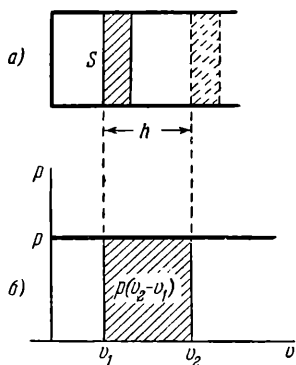


Рис. 279. К подсчету работы газа при изобарическом расширении.

Простейший пример работы расширяющегося газа можно проследить на изобарическом процессе расширения газа (рис. 279, а). Допустим, газ расширяется при нагревании в цилиндре и при этом перемещает свободно, без трения движущийся поршень. При этом давление газа p в цилиндре остается постоянным, равным внешнему давлению на поршень. Величина работы, совершаемой газом, может быть рассчитана по обычной формуле

$$A = F \cdot h,$$

где h — перемещение поршня. Сила давления F равна давлению газа p , помноженному на площадь поршня s . Таким образом,

$$A = p \cdot s \cdot h.$$

Но $s \cdot h$ — произведение площади поршня на его перемещение — есть приращение объема газа $v_2 - v_1$.

Следовательно,

$$A = p(v_2 - v_1).$$

График этого процесса в системе координат pV изображен на рис. 279, б. Работа расширения газа равна по величине площади прямоугольника, ограниченного изобарой, ординатами давлений, в пределах которых происходит расширение газа, и осью абсцисс.

Графический способ выражения работы широко применяется в теплотехнике.

Как подсчитать работу газа, расширяющегося изотермически? Разобьем площадь, ограниченную изотермой (рис. 280), вертикальными линиями на ряд участков. Если каждую получившуюся полоску дополнить до прямоугольной формы, то, суммируя площади всех узеньких прямоугольников, мы получим величину, приближающуюся к величине площади криволинейной фигуры, соответствующей работе изотермического расширения газа от объема v_1 до объема v_2 или от давления p_1 до давления p_2 . Чем на большее число участков мы будем разбивать данную площадь, тем меньше будут выступающие уголки и тем ближе будет полученный результат приближаться к истинному значению.

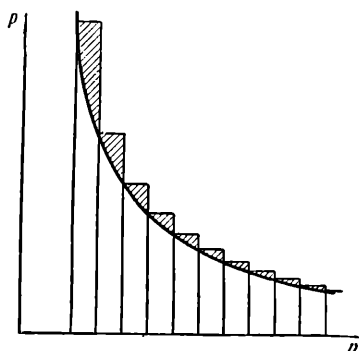


Рис. 280. К подсчету работы газа при изотермическом расширении.

Пользуясь таким же приемом, можно подсчитать и работу газа, расширяющегося адиабатически.

За счет чего совершается работа расширения газа? В адиабатическом процессе работа совершается за счет внутренней энергии газа — газ, расширяясь, охлаждается (§ 174).

В изотермическом процессе изменения температуры не происходит. Работа расширения возможна в этом случае только за счет подвода энергии извне от какого-то нагревателя, поддерживающего температуру и внутреннюю энергию газа на одном уровне. В простейшем случае нагревателем может быть окружающая среда. И наконец, для изобарического процесса также необходим внешний источник энергии. В этом случае нагреватель отдает энергию частью на совершение работы, частью на увеличение внутренней энергии газа (газ нагревается). Получившийся запас внутренней энергии газа может быть использован путем адиабатического расширения

или в случае отсутствия изоляции путем изотермического процесса за счет энергии окружающей среды. Подобный прием применяется в паровых поршневых машинах, когда после отсечки пара (прекращения подачи его в цилиндр) поршень продолжает движение за счет внутренней энергии пара.

§ 206. Условия, необходимые для работы тепловой машины. Карно (§ 184) показал, что получение движения в тепловых машинах всегда сопровождается переходом тепла от тела, температура которого более или менее высока, к другому, где она ниже. Отсюда первое основное условие работы тепловой машины — необходимость наличия нагревателя и холодильника.

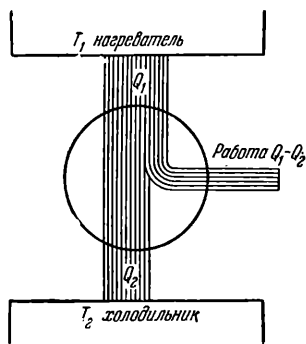


Рис. 281. Схема работы тепловой машины.

«Недостаточно, — писал Карно, — создать теплоту, чтобы вызвать появление движущей силы: нужно еще добыть холод. Без него теплота стала бы бесполезна. В самом деле, если бы вокруг нас были бы тела только такие же, как и топка, каким бы образом можно было сконденсировать пар? Куда бы его деть, раз он получен? Не следует думать, что его можно, как это практикуется в некоторых машинах, выбросить в атмосферу: атмосфера не приняла бы его. Она принимает его в обычных условиях,

потому что играет роль большого холодильника, потому что она находится при более низкой температуре ...».

Вторая особенность тепловой машины состоит в том, что во всякой тепловой машине не все количество энергии, полученной от нагревателя, превращается в энергию движения механизмов, часть энергии передается холодильнику.

Современная молекулярно-кинетическая теория позволяет понять причину этой особенности. Внутренняя энергия пара складывается из кинетической и потенциальной энергии его молекул. Что означало бы полное превращение внутренней энергии в механическую в тепловой машине? Это означало бы, что все молекулы пара (или газа) должны бы вместо хаотического движения начать двигаться упорядоченно и передавать свою энергию в одном направлении поршню или лопаткам турбины. Возможно ли это? Конечно, вероятность такого совпадения миллиардов событий настолько мала, что оно практически невозможно. Поэтому полного превращения внутренней энергии, заимствованной рабочим телом от нагревателя (Q_1), в механическую энергию быть не может. Часть энергии (Q_2) в форме энергии беспорядочного движения передается холодиль-

нику, и только часть в виде полезной работы используется для приведения в движение механизмов.

Мы можем, таким образом, представить процесс превращения энергии в тепловых двигателях в виде следующей схемы (рис. 281).

§ 207. Коэффициент полезного действия тепловых машин. Возникает вопрос: какая же часть внутренней энергии, заимствованной у нагревателя, используется в работе тепловых двигателей? От чего зависит коэффициент полезного действия теплового двигателя и как получить наилучшее использование энергии нагревателя, а следовательно, и наиболее выгодное использование топлива — угля, нефти, бензина и пр.? Карно показал, что максимальный возможный коэффициент полезного действия теплового двигателя совершенно не зависит от природы рабочего вещества, не зависит от того, будет ли это газ или пар (водяной, ртутный и т. д.). Единственно, что влияет на величину кпд тепловой машины, это разность температур нагревателя и холодильника.

Коэффициент полезного действия, выражающий степень использования энергии, заимствованной от нагревателя, скажем мы на современном языке, может быть выражен так:

$$\eta = \frac{\text{Энергия использованная}}{\text{Энергия, заимствованная от нагревателя}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

где Q_1 — энергия, заимствованная от нагревателя; Q_2 — отданная холодильнику.

При этом, пользуясь законами термодинамики, можно доказать, что для идеальной тепловой машины, которую описал Карно, из этой формулы можно написать другую:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

где T_1 — абсолютная температура нагревателя, T_2 — температура холодильника. Следовательно, чем выше температура нагревателя и чем ниже температура холодильника, тем меньше дробь $\frac{T_2}{T_1}$ и тем ближе кпд машины к единице. Стопроцентного использования топлива достигнуть нельзя, так как при этом или T_1 должно быть равно бесконечности, или T_2 — абсолютному нулю.

У п р а ж н е н и я

289. Определить кпд паровой машины, в которой пар поступает в цилиндр при температуре 200°C , а уходит из цилиндра в холодильник при температуре 100°C .

Примечание: Полученный по формуле Карно результат выше кпд действительной паровой машины. Вследствие некоторых особенностей конструкции и работы машины, а также потерь на трение на работу

обслуживающих машину насосов и пр. кпд всей установки у лучших даже паровых машин не превышает 16—17%.

290. Вычислить кпд тепловой машины при перепаде температур 580°K от T_1 до $T_2 = 373^\circ \text{K}$.

291. То же самое при $T_1 = 580^\circ \text{K}$ и $T_2 = 300^\circ \text{K}$. Результаты всех трех задач сравнить и объяснить.

§ 208. Двигатель внутреннего сгорания (дизельный). Основные понятия об устройстве и принципе работы паровых машин (поршневых и турбин) даются в восьмилетней школе. Ознакомимся теперь с принципом работы других тепловых двигателей. Начнем с поршневого же двигателя, но в котором рабочим телом является не пар, а газ, образующийся в рабочем цилиндре при сгорании внутри его вводимого туда топлива. Такие двигатели называются двигателями внутреннего сгорания.

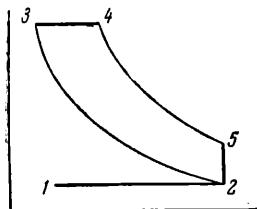


Рис. 282. Диаграмма цикла Дизеля.

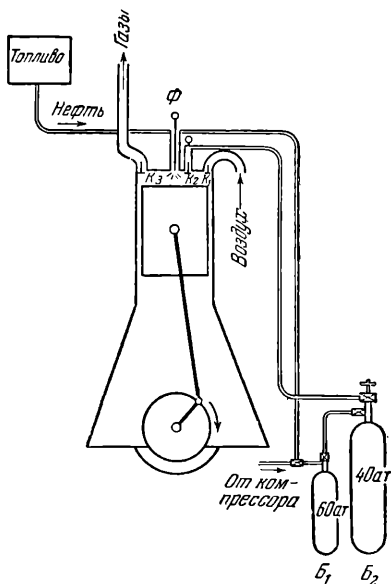


Рис. 283. Упрощенная схема конструкции дизеля.

Наиболее высоким коэффициентом полезного действия из двигателей внутреннего сгорания обладает дизельный двигатель.

Свое название он получил от фамилии немецкого инженера Дизеля. Еще будучи студентом и слушая лекции по термодинамике, Дизель поставил целью своей жизни найти конструкцию тепловой машины, которая работала бы по циклу, наиболее близкому к циклу идеальной машины Карно. Полностью осуществить свою идею ему не удалось, однако изобретенный им двигатель по коэффициенту полезного действия превосходит все остальные поршневые двигатели внутреннего сгорания.

Диаграмма цикла работы двигателя Дизеля представлена на рис. 282. Рис. 283 дает схему конструкции двигателя.

В настоящее время топливом для двигателей дизеля служат более высококипящие фракции перегонки нефти, остающиеся после отгонки бензина и керосина. Применение этих более дешевых, чем керосин или бензин, видов топлива составляет большое преимущество дизельных двигателей перед другими двигателями внутреннего сгорания.

Другое важное преимущество дизельного двигателя заключается в простоте системы зажигания горючего в нем.

Работа дизеля начинается с того, что при ходе поршня вниз в рабочий цилиндр засасывается чистый воздух через клапан K . Эта стадия цикла показана на диаграмме изобарой 1—2. Затем при дальнейшем вращении маховика поршень совершает обратное движение вверх, сжимая воздух в цилиндре (клапан закрыт). Давление в цилиндре поднимается до 30—34 ат. В других двигателях, в которых в цилиндр засасывается не воздух, а горючая смесь воздуха с парами бензина, нельзя добиться таких высоких степеней сжатия — горючее может преждевременно воспламениться. Это еще одно преимущество дизелей.

Адиабатическое сжатие (2—3 на диаграмме) приводит к повышению температуры. В данном случае мы можем считать процесс адиабатическим, так как он протекает очень быстро и теплообмен с окружающей средой не успевает произойти. Температура воздуха в конце такта сжатия повышается до 500—700° С.

В этот сжатый и раскаленный воздух впрыскивается через форсунку Φ нефть под давлением воздуха из баллона B_1 . Необходимый для работы форсунки сжатый воздух накачивается в баллон специальным компрессором, приводимым в движение самим двигателем в процессе работы (чтобы не усложнять чертежа, компрессор и механизм, приводящий его в движение, не показаны на рисунке).

Вылетающая из форсунки струя распыленной нефти воспламеняется в горячем воздухе в цилиндре и образует горячий факел, который в течение некоторого времени пополняет количество продуктов сгорания и тем поддерживает давление расширяющегося газа на одном уровне (изобара 3—4).

По окончании горения впрыснутой порции топлива происходит адиабатическое расширение газа (участок диаграммы 4—5) и, наконец, открывается выпускной клапан K_3 , давление падает по изохоре (5—2). Поршень при обратном движении выталкивает продукты сгорания в атмосферу. Цикл закончен.

Впускной клапан K_2 нужен только для первоначального хода при пуске двигателя. Через него пускают воздух под давлением и из пускового баллона B_2 . В дальнейшем во все время работы дизеля он закрыт.

Кроме описанной схемы компрессорного дизельного двигателя, имеются системы бескомпрессорных дизелей. Весьма совершенные дизельные двигатели стали выпускать наши отечественные заводы.

Дизельные двигатели устанавливаются на речных и морских теплоходах, на тепловозах железнодорожного транспорта, в виде стационарных установок на электростанциях и пр.

У п р а ж н е н и я

292. Укажите преимущества дизельных двигателей перед другими поршневыми двигателями.

293. Опишите принцип работы тепловоза (по литературным источникам).

294. Подсчитайте (по формуле Карно) кпд двигателя внутреннего сгорания, если температура продуктов горения 1800°C , а температура выхлопных газов 800°C .

§ 209. Газовая турбина. К числу достижений современной техники принадлежит применение газовых турбин. Температура газа, поступающего на ротор газовой турбины, значительно выше температуры пара в паровой турбине. Следовательно, и кпд газовой турбины должен быть выше, чем паровой. Он достигает у новейших турбин 60—65%.

Другим большим преимуществом газовых турбин перед паровыми является отсутствие громоздкой котельной установки. Отсюда возможность применения газовых турбин не только на электростанциях, но и на транспорте и в авиации.

Цикл работы газовой турбины показан на рис. 284, а общая схема — на рис. 285.

Рис. 284. Цикл работы газовой турбины: 1—2 сжатие воздуха в компрессоре, 2—3 — горение топлива в камере сгорания, 3—4 — расширение газов в турбине, 4—1 — выпуск газа из сопла.

Откуда берется газ для работы турбины? Таким газом является атмосферный воздух, который подается центробежным компрессором в сильно сжатом

состоянии в камеру сгорания. В камеру сгорания при помощи форсунки впрыскивается распыленное топливо (керосин, нефть или распыленный уголь). Образовавшаяся горючая смесь зажигается при запуске двигателя электрической искрой от «запальной свечи», подобно тому как это делается в автомобильных двигателях. В дальнейшем свеча не потребуется, так как, в отличие от поршневых двигателей внутреннего сгорания, горение топлива в камере турбины происходит непрерывно и воспламенение последующих порций горючего будет происходить от раскаленных газов двигателя.

Температура, развиваемая в камере, достигает 2000°C и более. Газ при такой температуре нельзя направлять непосредственно на лопатки турбины: лопатки сгорели бы. Поэтому горячие газы смешивают с дополнительным количеством воздуха, подаваемым

компрессором и обтекающим жаровую трубу камеры. Температура смеси понижается до $600\text{--}900^\circ\text{C}$ и в таком виде уже может поступать на рабочие лопатки. Для защиты от высокой температуры вала, на котором размещены компрессор и турбина, камера сгорания делается или кольцевой или из нескольких камер, располагаемых по окружности вокруг вала.

Цикл, по которому работает газовая турбина, подобен циклу дизельного двигателя. Но надо иметь в виду, что отдельные такты — сжатие воздуха, горение топлива, расширение и выхлоп продуктов сгорания — у дизеля происходят последовательно один за другим, тогда как в газовой турбине они происходят непрерывно и в одно

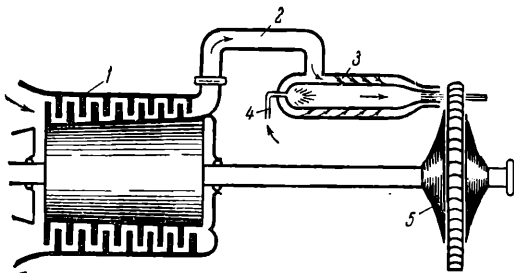


Рис. 285. Схема газотурбинного двигателя: 1 — компрессор, 2 — воздуховод, 3 — камера сгорания, 4 — трубопровод для подачи горючего, 5 — ротор газовой турбины.

время, но в разных отделениях турбины (сжатие в компрессоре, горение в камере сгорания, расширение на лопатках турбины и выхлоп из сопла выходного канала). Газотурбинные установки находят все большее и большее применение в народном хозяйстве СССР и других стран. Имеются сотни газотурбинных установок для электростанций, для химических и металлургических заводов и пр.

Наибольшее распространение получило применение газовых турбин на транспорте — газотурбовозы ведут тяжелые составы поездов, по шоссейным дорогам курсируют междугородные автобусы, оборудованные газотурбинными двигателями, газотурбинные двигатели устанавливаются на судах. Газотурбостроение — многообещающая область техники. Особенно большое применение имеют газотурбинные двигатели в авиации. Мы рассмотрим этот вопрос отдельно в связи с реактивными двигателями.

§ 210. Реактивные двигатели. Напомним, в чем заключается принцип реактивного движения. Если в замкнутом сосуде находится газ, то вследствие хаотического движения его молекул он производит давление на стенки сосуда во все стороны равномерно

и равнодействующая всех сил давлений равна нулю. Но если в одной из стенок открыть отверстие для выхода газа, то давление на противоположную стенку окажется неуравновешенным и может вызвать движение всей системы. При этом импульс газа, вытекающего из отверстия (сопла ракеты), равен с обратным знаком импульсу, приобретенному ракетой.

При полете в воздушной среде (в авиации) сила тяги может быть увеличена при передаче части импульса воздуху. Современные авиационные двигатели бывают трех типов: 1) прямоточные воздушно-реактивные, 2) турбореактивные и 3) турбовинтовые.

1. **Прямоточные воздушно-реактивные двигатели.** Конструкция воздушно-реактивных двигателей отличается простотой. На рис. 286 показана схема такого двигателя. Двигатель состоит из трех частей: входного устройства (диффузора), камеры сгорания и выходного



Рис. 286. Схема прямоточного воздушно-реактивного двигателя.

сопла. Набегающий во время полета воздух входит в переднее отверстие со скоростью самолета и, проходя по расширяющемуся каналу диффузора, уменьшает скорость, сжимается новыми набегающими массами воздуха, и его кинетическая энергия превращается во внутреннюю энергию — он нагревается.

В камере сгорания в поток воздуха впрыскивается горючее (керосин) и смесь распыленного горючего с воздухом зажигается запальными свечами.

Чем больше скорость самолета, тем больше давление воздуха, поступающего в камеру сгорания. При скорости 600 км/час давление повышается только на $\frac{1}{5}$ ат и совершенно недостаточно для эффективной работы двигателя. При скорости полета 2000 км/час давление возрастает в 5 раз против атмосферного. Следовательно, прямоточные воздушно-реактивные двигатели могут применяться только при очень больших, сверхзвуковых, скоростях.

Самостоятельно взлетать с места прямоточный воздушно-реактивный двигатель не может, так как атмосферный воздух в неподвижный двигатель не потечет. Для запуска двигателя его надо сначала разогнать при помощи двигателя другого типа.

2. **Турбореактивные двигатели.** В турбореактивных двигателях воздух поступает в камеру сгорания не в результате движения самолета, а нагнетается компрессором. Компрессор и газовая турбина устанавливаются на одном валу. Вся мощность турбины поглоща-

ется компрессором и возвращается воздушному потоку, поступающему в камеру сгорания, при его сжатии. Движущей силой является сила реакции струи воздуха, вытекающей из выходного сопла.

Для запуска двигателя необходимо сначала раскрутить его ротор при помощи небольшого вспомогательного двигателя. Рис. 287 дает общий вид турбореактивного двигателя.

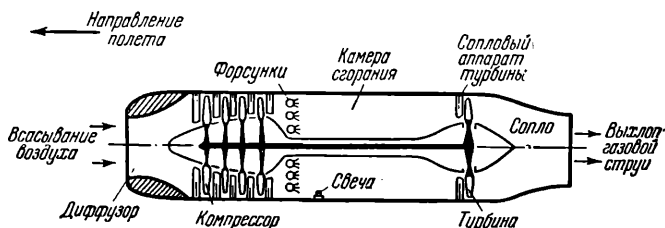


Рис. 287. Схема турбореактивного двигателя.

Всемирно известный советский самолет ТУ-104 оборудован двумя такими двигателями. Мощность каждого двигателя превышает 30 000 л. с. Крейсерская скорость самолета 800—900 км/час, максимальная 1000 км/час. Беспосадочная дальность полета 3000—4000 км.

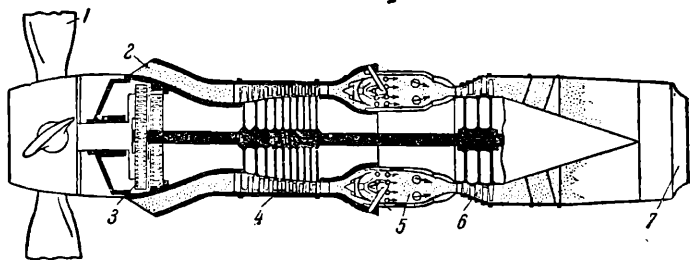


Рис. 288. Схема турбовинтового двигателя: 1 — воздушный винт, 2 — воздухозаборник, 3 — редуктор, 4 — компрессор, 5 — камера сгорания, 6 — турбина, 7 — сопло.

3. Турбовинтовые двигатели. В турбовинтовых двигателях образуется большая сила тяги. Это вызвано наличием винта — пропеллера (рис. 288). Мощность, развиваемая турбиной в двигателях такого типа, больше, чем требуется для работы компрессора. Избыток мощности и позволяет использовать его на вращение винта.

К самолетам, снабженным турбовинтовыми двигателями, относятся ТУ-114 (рис. 289) и ИЛ-18, составляющие гордость нашей авиации.

Сопоставление перечисленных типов двигателей позволяет сделать следующие выводы.

При скоростях полета свыше 2000 км/час сжатие набегающего воздуха в диффузоре настолько велико, что позволяет обходиться без компрессора.

Когда же полеты будут проводиться со скоростью 5000 км/час на высоте нескольких десятков километров в сильно разреженных слоях атмосферы, единственно возможным из известных сейчас

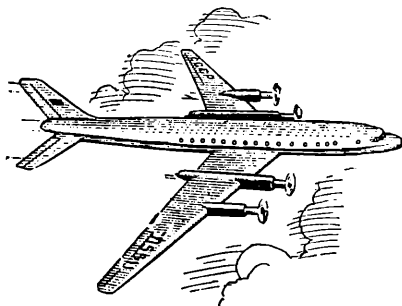


Рис. 289. Турбовинтовой самолет в полете.

двигателей будет жидкостно-реактивный двигатель (типа ракеты) ЖРД. Такие двигатели сейчас позволяют поднимать почти за пределы атмосферы искусственные спутники Земли, космические корабли и межпланетные станции-лаборатории.

Достижения советской науки и техники в деле освоения космоса грандиозны и вызывают восхищение всего мира.

Благодаря совместной работе советских ученых, инженеров, техников и рабочих именно в нашей стране был запущен первый в мире искусственный спутник Земли 4 октября 1957 г. В Советском Союзе был осуществлен и первый в мире запуск космического корабля «Восток» с первым космонавтом Ю. А. Гагариным на борту. Ракета-носитель корабля имела шесть двигателей общей мощностью 20 млн. л. с.

У п р а ж н е н и я

295. Подберите материал для доклада на тему «Развитие космонавтики в СССР».

296. Чему равна сила, движущая ракету, если ежесекундный расход горючего 1 кг , а скорость вылетающих из выходного сопла газов равна 4000 м/сек ?

297. Прямоточный воздушно-реактивный двигатель при скорости полета 1000 км/час развивает мощность 7400 л. с. и расходует 2 кг бензина в секунду. Найти силу тяги и КПД двигателя.

298. При полете того же двигателя со скоростью 2000 км/час расход бензина стал 4 кг в секунду, а мощность достигла $60\,000 \text{ л. с.}$, определите силу

тяги и кпд в этом случае и сделайте вывод о том, в каких условиях воздушно-реактивные двигатели работают более эффективно.

§ 211. Теплофикация. Известно, что кпд тепловых машин довольно низки. Так, кпд

стационарной паровой машины	17%
карбюраторного двигателя внутреннего сгорания	25%
дизельного двигателя	40%
паровой турбины	20%
газотурбинной установки (стационарной)	30%
турбореактивного двигателя	24%

Низкий кпд тепловых машин объясняется не несовершенством машин, а самой природой работы тепловой машины, при которой часть (и притом большая часть) энергии нагревателя (топлива) не используется, а должна быть передана холодильнику.

Передаваемое холодильнику «количество теплоты» можно, однако, использовать, но уже не в самой тепловой машине, а в различных промежуточных установках, обслуживая различные производства теплом и паром, а также для отопления и снабжения горячей водой жилищ. В этом случае удается поднять процент полезно используемой энергии топлива. Такой способ использования пара называется теплофикацией. Развитие теплофикации в нашей стране началось в 1924 г. В настоящее время теплофикацией охвачено большинство городов.

РАЗДЕЛ III

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ГЛАВА XVII

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ

§ 212. Предварительные сведения. Из курса физики общеобразовательной школы известно, что электрический ток можно получать от источников различных типов. Наиболее распространенными являются химические источники тока (например, аккумуляторы, рис. 290) и машины, устанавливаемые на электрических станциях (рис. 291). В школьных лабораториях иногда пользуются электрофорными машинами (рис. 292).

Напомним, что каждый источник тока имеет два полюса, т. е.

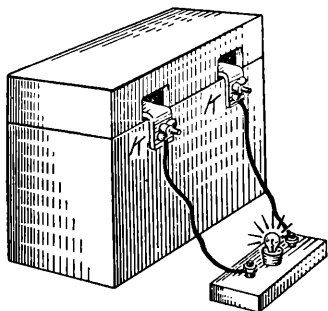


Рис. 290. Батарея аккумуляторов дает ток, накаливающий лампочку. *K, K* — клеммы.

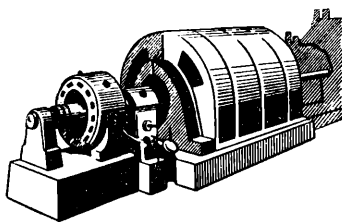


Рис. 291. Внешний вид машинного генератора электрического тока.

два металлических вывода (к л е м м ы) для присоединения к ним металлических проводов (см. рис. 290). По внешнему виду полюсов источника (например, аккумулятора) и присоединенных к ним проводов нельзя определить, дает ли источник ток, т. е. находятся ли провода под напряжением. Однако это легко выяснить разными способами: например, можно коснуться проводами, присоединенными к полюсам аккумулятора, патрона лампочки карманного фонаря или электрического звонка. Если волосок лампочки накалится, а молоточек звонка начнет колебаться, значит, аккумулятор «заряжен» и между его полюсами имеется достаточное напряжение.

Существование напряжения между полюсами источника тока или между присоединенными к ним проводами может иногда обнаружиться неожиданным и неприятным действием на тело человека. Это действие не чувствуется, если коснуться двумя руками полюсов аккумулятора: напряжение в этом случае низкó и ток, который идет по телу при прикосновении к полюсам аккумулятора, слишком мал. Коснувшись руками оголенных концов проводов осветительной сети, мы почувствуем неприятное жжение. Напряжение в этом случае значительно выше, чем у аккумулятора, и вызываемый им

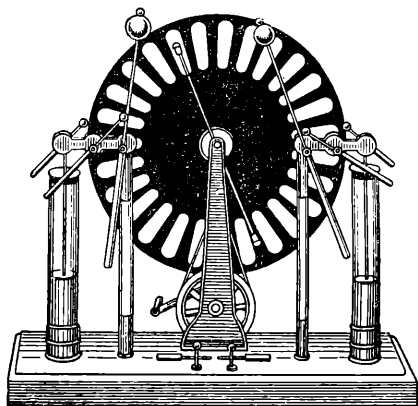


Рис. 292. Электрофорная машина.

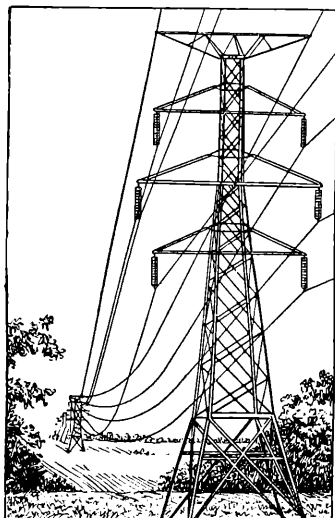


Рис. 293. Провода линии высокого напряжения, подвешенные на фарфоровых изоляторах к мачтам.

ток в теле уже значителен. В некоторых случаях (например, если руки влажны), ток является опасным для здоровья и даже для жизни человека. Безусловно смертельным было бы прикосновение к проводам линий высокого напряжения (рис. 293), по которым передается ток от электростанций к предприятиям.

Отметим, что электрофорная машина не представляет опасности, хотя напряжение между ее полюсами довольно высоко; она может давать лишь очень слабые токи (а опасен именно ток).

Пользуясь электрофорной машиной, можно обнаружить еще одно явление, позволяющее сделать заключение о наличии напряжения между проводами. Присоединим к полюсам электрофорной машины две легкодвигающиеся проволочки; при действии машины эти проволочки заметно притянутся друг к другу (рис. 294). У проводов, присоединенных к источнику тока низкого напряжения

(например, к аккумулятору), взаимное притяжение очень слабо. Однако при помощи чувствительных приборов его все же можно обнаружить.

Итак, провода, соединенные с полюсами какого-нибудь источника тока, находятся в особом состоянии, хотя по внешнему виду это не заметно: они «наэлектризованы». Состояние электризации может передаваться от одного тела к другому. В проводниках тока

(металлы, уголь, растворы солей и кислот) передача электризации происходит быстро; в изоляторах (фарфор, слюда, парафин, шелк, масла и др.) этот процесс идет медленно. Повторим опыт, изображенный на рис. 294, присоединив подвижные проволочки к полюсам электрофорной машины посредством длинных проволок, подвешенных на изоляторах: по приведении машины в действие проволочки

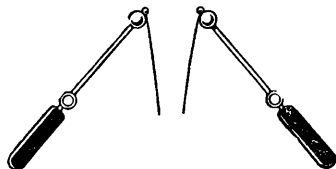


Рис. 294. Легкие проволочки, соединенные с полюсами электрофорной машины, заметно притягиваются.

немедленно притянутся друг к другу. Если заменить металлические проволочки сухими белыми нитками, притяжение проволочек станет заметным только через несколько минут после начала действия машины. Различие в способности передавать состояние электризации у изоляторов по сравнению с металлами огромно.

Когда состояние электризации передается от одного тела другому, мы говорим, что одно тело передает другому э л е к т р и ч е с к и й з а р я д. Заряд, полученный телом от одного из полюсов источника, называется п о л о ж и т е л ь н ы м, от другого — о т р и ц а т е л ь н ы м. Зарядим два одинаковых проводящих шарика, подвешенных на изолирующих нитях, положительно и отрицательно. Они будут притягиваться. Но если дать им соприкоснуться, шарики станут ненаэлектризованными, их заряды взаимно уничтожатся, в сумме давая нуль. Как известно, свойством взаимного уничтожения обладают две одинаковые величины, имеющие противоположные знаки (плюс и минус). Этим и объясняются названия электрических зарядов.

§ 213. Притяжение и отталкивание заряженных тел. Видоизмененный опыт, изображенный на рис. 294. Вместо двух проволочек присоединим к полюсам электрофорной машины «султаны», сделанные из бумажных лент и помещенные на изолирующих подставках (рис. 295). Сперва поместим «султаны» далеко друг от друга. Вращая машину, зарядим ленты. Мы увидим, что ленты расположатся по радиусам, т. е. так, что находящиеся на них заряды отдалятся друг от друга. Будем теперь, продолжая вращать машину, сближать «султаны». При сближении «султанов» ленты, продолжая отталки-

ваться друг от друга, вместе с тем притягиваются к лентам другого «султана» (рис. 296).

Этот опыт показывает, что, кроме притяжения между положительно и отрицательно заряженными телами, которое мы обнаружили ранее, существует отталкивание между двумя телами, заряженными положительно, а также между двумя телами, заряженными отрицательно. Иными словами: *тела, заряженные разноименно, притягиваются, тела, заряженные одноименно, отталкиваются.*

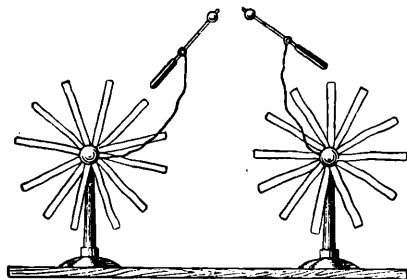


Рис. 295. Бумажные ленты каждого из «султанов» отталкиваются друг от друга.

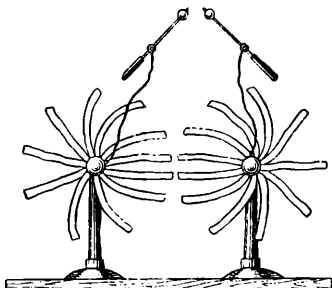


Рис. 296. Ленты «султанов», заряженных противоположными зарядами, притягиваются друг к другу.

Это дает возможность узнать знак заряда на теле. Пусть на шелковой нитке висит заряженная бумажка (рис. 297). Приближим

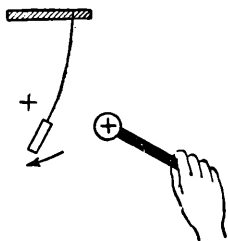


Рис. 297. Положительно заряженная бумажка отталкивается от положительно заряженного шара.

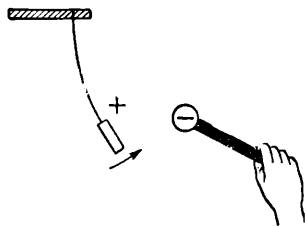


Рис. 298. Положительно заряженная бумажка притягивается к отрицательно заряженному шару.

к ней положительно заряженное тело. Если бумажка оттолкнется от него, значит, она заряжена тоже положительно. Приблизив к той же бумажке отрицательно заряженное тело, мы обнаружим притяжение (рис. 298).

§ 214. Электризация трением. Очень удобно изучать взаимодействие электрических зарядов, полученных электризацией трением.

Электризация трением — самый старый опыт по электричеству. Еще древние греки знали, что кусочки янтаря при трении о шерсть приобретают свойство притягивать легкие тела, например пушинки *). Подобные явления можно наблюдать у эбонита и сургуча, потертых о шерсть, или у стеклянной палочки, потертой о шелк.

Как мы увидим далее (§ 223), заряженные тела притягивают к себе окружающие тела. Следовательно, притяжение легких тел к янтарю или эбониту является доказательством наличия на последних зарядов, получающихся при трении. Легко убедиться на опыте, что одно из трущихся тел заряжается положительно (например, стекло), а другое заряжается отрицательно (шелк). Далее, опыт показывает, что электризуются при трении в большей или меньшей мере все тела, но на проводниках эта электризация обычно не обнаруживается, так как заряды с них моментально стекают. Впервые электризация металлов трением была обнаружена В. В. Петровым в 1804 г.

Вследствие трения электризуются во время работы приводные ремни, бумага на печатных машинах, нити пряжи и т. п. Очень часто являются заряженными носящиеся в воздухе пылинки, частички дыма.

Исследования показали, что электризация тел происходит не только при трении, но также и при соприкосновении их.

§ 215. Строение атома. Чем отличаются заряженные тела, например полюсы батареи аккумуляторов, от незаряженных? Что происходит в металлических проводах, в растворах солей или кислот, в газах, когда в них движутся электрические заряды? Каким образом происходит движение зарядов внутри источников тока?

Чтобы ответить на эти и другие возникающие при изучении электрических явлений вопросы, надо вооружиться современными представлениями о сущности электрических явлений. Изучение электрических явлений показывает, прежде всего, что незаряженное тело имеет в себе одинаковые количества положительных и отрицательных зарядов.

Ниже мы познакомимся с явлениями перехода заряда с твердого или жидкого тела в окружающее пространство. Это относится только к отрицательному заряду. Перехода в окружающее пространство положительных зарядов не наблюдается.

Точными измерениями было доказано, что отрицательный заряд, переходящий в окружающее пространство из твердого или жидкого тела, никогда не бывает меньше некоторой величины, названной

*) От греческого названия янтаря «электрон» произошло название «электричество».

элементарным зарядом. Оказалось, далее, что любой заряд всегда равен целому числу элементарных зарядов.

Эти, а также и другие факты привели к убеждению, что атомы имеют следующее строение. Атом состоит из центрального положительно заряженного ядра и движущихся вокруг него значительно более легких отрицательно заряженных частиц — электронов. Ядра атомов разных химических элементов различны (самое легкое — ядро атома водорода). Электроны же во всех атомах одинаковы, но число их различно. Вокруг ядра атома водорода обращается только один электрон, вокруг ядра атома кислорода — восемь электронов, вокруг ядра атома меди — 29 электронов, а у некоторых недавно открытых элементов — около ста электронов.

Заряд электрона равен упомянутому выше элементарному заряду. Так как атом в целом незаряжен, то положительный заряд ядра равен сумме отрицательных зарядов всех обращающихся электронов (например, у меди он равен 29 элементарным зарядам).

Движение электронов вокруг ядра возможно, конечно, только при наличии каких-то сил, действующих между электроном и ядром. Это — силы электрического взаимодействия между положительным зарядом ядра и отрицательным зарядом электрона. Отметим, что они невообразимо (в 10^{40} раз) больше сил тяготения между ядром и электроном.

Если вблизи данного атома находится другой атом, то, кроме внутреннего взаимодействия между ядром и электронами, возможно взаимодействие между электронами и ядром одного атома и электронами и ядром другого. Эти взаимодействия и являются теми молекулярными силами, о которых шла речь в § 144. Они же обуславливают и химическое сродство между атомами и молекулами.

Под действием соседних атомов электроны, более удаленные от ядра, могут отрываться от атомов. Особенно легко это происходит в атомах металлов. Можно считать, что твердый металл представляет собой собрание не перемещающихся друг относительно друга положительно заряженных частей атомов (ядро и почти все электроны), между которыми легко перемещаются не связанные с определенным атомом, так называемые свободные электроны. Наличие свободных электронов и обуславливает высокую электропроводность металлов.

Атомы некоторых других элементов, наоборот, легко присоединяют к себе электроны сверх нормы.

Атомы, потерявшие один или несколько наружных электронов, а также молекулы, в состав которых входят такие атомы, называются положительными ионами. Атомы или молекулы, имеющие лишние электроны, называются отрицательными ионами.

§ 216. **Электростатические явления.** Пока мы имеем дело с телами, в которых нет ни избытка, ни недостатка электронов, мы не наблюдаем в окружающем их пространстве никаких электрических явлений. Если по какой-либо причине электронов в одном месте будет больше, чем нормально, а в другом — меньше, то получаются взаимодействующие между собой электрические заряды и наблюдаются различные электрические явления.

На отрицательно заряженном теле, например на отрицательном полюсе источника тока, имеется избыток электронов, а на положительно заряженном теле — недостаток их. Отметим, что число недостающих или избыточных электронов на заряженном теле всегда составляет лишь *ничтожную* долю общего числа электронов в теле. Подавляющее число атомов в теле имеет нормальное число электронов. Тем не менее, и эта ничтожная доля представляется весьма большим числом (например, на шариках электрофорной машины имеются миллиарды лишних или недостающих электронов). Конечно, «лишние» электроны на заряженном теле не прекращают своего хаотического движения. Однако, поскольку число этих частиц велико и их движение беспорядочно, то взаимодействие заряженных тел происходит так, как если бы имеющиеся на них заряженные частицы были неподвижными.

§ 217. **Закон Кулона.** От чего зависит сила взаимодействия зарядов? Первые исследования взаимодействия зарядов, находящихся на шариках малых размеров, были произведены при помощи крутильных весов (см. § 106) в XVIII в. французским физиком Кулоном. Чтобы менять определенным образом величину заряда, он прикасался к заряженному шарiku один (или несколько) раз совершенно таким же незаряженным изолированным шариком. При этом с шарика стекала половина имеющегося на нем заряда и заряд на нем делался вдвое, вчетверо и т. д. раз меньше начального. Из своих измерений Кулон вывел следующее заключение: *сила взаимодействия заряженных тел пропорциональна величине каждого из зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними (з а к о н К у л о н а).*

Отметим, что закон Кулона относится к зарядам, находящимся на телах, размеры которых малы по сравнению с расстоянием между ними.

Впоследствии было обнаружено, что сила взаимодействия зарядов зависит, кроме того, от свойств диэлектрика, т. е. изолирующей среды, в которой находятся заряды. Наиболее велика сила взаимодействия зарядов в вакууме. В диэлектриках те же заряды на таком же расстоянии взаимодействуют значительно слабее (в керосине — в два раза, в этиловом спирте — в 26 раз). Очень велико ослабление взаимодействия зарядов в воде — в 81 раз. В воздухе взаимодействие зарядов почти не отличается от взаимодействия в вакууме (чуть-чуть меньше).

Величина, показывающая, во сколько раз взаимодействие зарядов в данном веществе меньше, чем в вакууме, называется относительной диэлектрической проницаемостью вещества. Таким образом, относительная диэлектрическая проницаемость вакуума равна 1, газов чуть больше 1 (например, воздуха 1,0006), керосина 2, этилового спирта 26, воды 81 и т. д.

У п р а ж н е н и я

299. Как изменится сила взаимодействия зарядов, если величину каждого из них уменьшить вдвое, а расстояние между ними увеличить втрое?

300. На каком расстоянии следует поместить в этиловом спирте два точечных заряда, чтобы они взаимодействовали так же, как и в вакууме на расстоянии 2 см?

§ 218. Единицы электрических величин. Описанные явления приводят к выводу, что электрический заряд (называемый также количеством электричества) есть физическая величина. Существует ряд способов определения величины электрического заряда. Во-первых, можно судить о величине заряда по силе взаимодействия покоящихся зарядов на основании закона Кулона. Во-вторых, можно судить о величине заряда, перенесенного током в течение определенного времени, по силе взаимодействия токов. Как мы узнаем при изучении магнетизма, два параллельных провода, по которым текут токи в одном направлении, притягиваются друг к другу с силой, зависящей от того, какие заряды переносятся токами в течение 1 секунды. В-третьих, о величине протекшего по цепи заряда можно судить по химическому действию тока.

Напомним опыт, известный из школьного курса физики. Присоединим к батарее аккумуляторов две медные пластинки, опущенные в раствор сернокислой меди. Пропуская достаточно длительно ток по раствору, можно обнаружить, что положительно заряженная медная пластинка утончается, т. е. медь переходит с пластинки в раствор. В то же время на отрицательной пластинке нарастает слой меди, т. е. медь переходит из раствора на пластинку. В этом опыте мы наблюдаем химическое действие тока, результатом которого является перенос меди с положительно заряженной пластинки на отрицательную. Аналогичные опыты можно произвести и с другими металлами и растворами.

Чем длительнее опыт, т. е. чем больше величина заряда, перенесенного током, тем больше металла переносится с положительной пластинки на отрицательную. Это обстоятельство дает возможность судить о величине перенесенного заряда по количеству металла, выделенного током.

В настоящее время употребляются две единицы зарядов, принадлежащие к разным системам единиц.

В системе СИ единицей количества электричества служит кулон. Это количество электричества, которое переносится

неизменяемым током в 1 ампер в течение 1 секунды. Напомним, что в этой системе единиц ампер является одной из шести основных единиц (§ 11), из которых выводятся остальные, производные единицы. Точное определение ампера по силе взаимодействия токов будет дано нами впоследствии (§ 288), пока же отметим только, что опытным путем установлено, что при прохождении тока в 1 а через раствор азотнокислого серебра за 1 сек выделяется на катоде 1,118 мг серебра.

В системе СГСЭ (системе сантиметр — грамм — секунда, распространенной на электрические величины) единицей количества электричества является так называемая электростатическая единица заряда, сокращенно обозначаемая 1 СГСЭ_q. Это заряд, который на равный ему заряд на расстоянии 1 см в вакууме действует с силой в 1 дину. Оказалось, что такая единица содержит около $2 \cdot 10^9$ элементарных зарядов. 1 кулон = $3 \cdot 10^9$ СГСЭ_q, т. е. около $6 \cdot 10^{18}$ элементарных зарядов.

§ 219. Формула закона Кулона. Диэлектрическая проницаемость. Электрическая постоянная. Закон Кулона в системе СГСЭ можно записать так:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{\epsilon_{\text{отн}} r^2}.$$

F — сила взаимодействия между зарядами q_1 и q_2 , r — расстояние между ними, $\epsilon_{\text{отн}}$ относительная диэлектрическая проницаемость. Поскольку $\epsilon_{\text{отн}}$ для вакуума равна 1, то формула Кулона для зарядов в вакууме будет

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Вычислим, чему равна сила взаимодействия между двумя зарядами по 1 кулону каждый, находящимися в вакууме на расстоянии 1 м один от другого.

$$F = \frac{3 \cdot 10^9 \cdot 3 \cdot 10^9}{(100)^2} \text{ дин} = 9 \cdot 10^{14} \text{ дин} = 9 \cdot 10^9 \text{ н.}$$

В системе СИ кроме относительной диэлектрической проницаемости, характеризующей сравнительную проницаемость какой-нибудь среды и пустоты, вводится еще понятие об абсолютной проницаемости самой среды ϵ_a . Абсолютная проницаемость вакуума получила название электрической постоянной (обозначение ϵ_0). Следовательно, относительная диэлектрическая проницаемость есть отношение $\frac{\epsilon_a}{\epsilon_0} = \epsilon_{\text{отн}}$ (значок a в обозначении абсолютной диэлектрической проницаемости обычно опускается), откуда

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{отн}}.$$

Формула закона Кулона в системе СИ для вакуума

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 r^2}.$$

Такая форма записи закона Кулона называется рационализированной. В системе СИ принята рационализированная форма электрических и магнитных единиц. Множитель 4π в знаменатель введен искусственно. Смысл рационализации состоит в том, что она сильно упрощает расчеты по наиболее часто применяемым формулам электротехники. Ясно, однако, что сила взаимодействия между зарядами (как явление природы) не может измениться от такого преобразования расчетной формулы, и потому весь коэффициент формулы $4\pi\epsilon_0$ должен иметь такую же величину, как если бы 4π не было введено. Но это возможно только при условии, что ϵ_0 уменьшится тоже в 4π раз сравнительно с нерационализированной формой.

Из формулы закона Кулона можно получить

$$\epsilon_0 = \frac{q_1 q_2}{4\pi \cdot F \cdot r^2},$$

откуда легко установить числовую величину и размерность ϵ_0 в системе СИ. Для этого дадим значения $q_1 = q_2 = 1 \text{ к}$, $r = 1 \text{ м}$, а F — это сила, с которой действуют друг на друга заряды в 1 кулон на расстоянии 1 м. Эта сила, как мы знаем, равна $9 \cdot 10^9 \text{ н}$. Подставляя в формулу, имеем

$$\epsilon_0 = \frac{1 \cdot 1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 1^2} \frac{\text{к}^2}{\text{н} \cdot \text{м}^2} = 8,84 \cdot 10^{-12} \frac{\text{к}^2}{\text{н} \cdot \text{м}^2} *).$$

Таковую же размерность $\frac{\text{к}^2}{\text{н} \cdot \text{м}^2}$ имеет и в любой среды.

Формула закона Кулона для любой среды получает вид

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{отн}} \cdot r^2}.$$

Напомним, что $\epsilon_{\text{отн}}$ как отношение есть величина безразмерная и на ее значении рационализация не отражается.

У п р а ж н е н и я

301. Выразите в электростатических единицах заряд в 5 микрокулонов.

302. С какой силой взаимодействуют два заряда по 6 ед. СГСЭ, если они находятся в воздухе и расстояние между ними равно 10 см?

303. Каковы заряды двух капелек, массы которых равны 0,1 мг каждая, если электрическое отталкивание в воздухе уравнивает силу взаимного притяжения по закону всемирного тяготения? Считайте заряды равными.

*) В § 239 будет указано другое, часто применяемое в расчетах, выражение размерности ϵ_0 в системе СИ.

304. Заряд грозового облака обычно составляет несколько десятков кулонов. Принимая для расчета облака за точки, определите силу взаимодействия двух грозовых облаков с зарядами по 20 к каждое, находящихся на расстоянии 10 км друг от друга.

305. Два маленьких заряженных шарика, находясь в воздухе на расстоянии 5 см друг от друга, притягиваются с силой 3 дин. Отдалившись после соприкосновения на то же расстояние, шарики взаимодействуют с силой 1 дин. Определите заряды шариков.

306. Два точечных заряда (25 ед. СГСЭ и — 9 ед. СГСЭ) находятся в вакууме на расстоянии 12 см друг от друга. На каком расстоянии от них находится третий точечный заряд, если действующая на него сила равна нулю?

307. Заряд электрона $1,6 \cdot 10^{-10}$ к. С какой силой ядро атома водорода притягивает электрон, если радиус орбиты электрона $0,5 \cdot 10^{-10}$ м?

308. Сколько электронов было снято при трении стеклянной палочки о кожу, если в результате трения она получила заряд $8 \cdot 10^{-8}$ к?

§ 220. Электроскоп. Для исследования свойств зарядов удобно воспользоваться э л е к т р о с к о п о м — прибором, при помощи

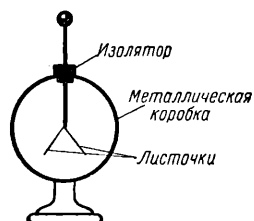


Рис. 299. Один из типов электроскопов.

которого можно узнать, заряжено тело или нет. На рис. 299 изображен один из типов электроскопов; основная его часть — металлический стержень с подвешенными к нижнему концу двумя легкими бумажными или металлическими листочками. Стержень через пробку из изолирующего материала вставлен в металлическую коробку со стеклянными окнами. Верхний конец стержня выходит за коробку и заканчивается шариком. Если прикоснуться к стержню заряженной палочкой, то ли-

сточка зарядятся одноименно и потому оттолкнутся друг от друга. Чем сильнее разойдутся листочки, тем, очевидно, больше заряд, находящийся на электроскопе.

§ 221. Распределение зарядов на проводниках. Как располагаются заряды на проводнике? Чтобы узнать это, воспользуемся свойством зарядов переходить с заряженного тела на незаряженный проводник. Зарядим металлическую коробку без крышки, помещенную на изолирующей подставке (рис. 300). Будем касаться разных точек ее поверхности небольшим металлическим шариком на изолирующей ручке и испытывать получающийся на шарике заряд посредством электроскопа. Опыт показывает, что при прикосновении шарика к наружной поверхности коробки он получает большой заряд, в особенности от острых ребер и вершин углов. Если же касаться шариком внутренних поверхностей коробки, то шарик или совсем не получает заряда, или (если коробка не очень глубока) очень малый заряд. Отсюда следует, что *заряд проводника располагается на наружной его поверхности*. Это и понятно. Заряды

в разных участках проводника являются одноименными, а потому отдаляются друг от друга на возможно большее расстояние. Это

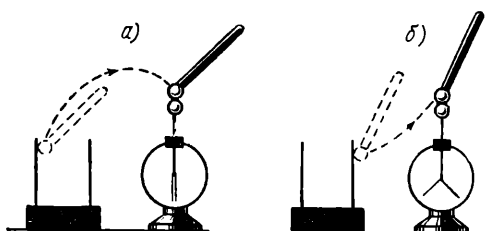


Рис. 300. а) Если коснуться шариком, укрепленным на изолирующей ручке внутренней стороны стенки заряженной металлической коробки, и передать заряд электроскопу, то его листочки почти не разойдутся; б) если повторить опыт, коснувшись наружной стороны электроскопа, то его листочки разойдутся сильно.

соответствует размещению зарядов на границе проводника и окружающего изолятора (воздуха), т. е. на наружной поверхности проводника, в особенности на выдающихся ее частях.

У п р а ж н е н и е

309. Если соединить стержень электроскопа с его коробкой, поставить электроскоп на изолирующую подставку и зарядить, то листочки электроскопа не расходятся. Как это объяснить?

§ 222. **Электризация влиянием.** Приблизим к незаряженному электроскопу заряженное тело (рис. 301). Мы увидим, что листочки электроскопа при приближении заряда расходятся, т. е. заряжаются, а по удалении заряда вновь сходятся, т. е. разряжаются. Как это объяснить?

Всякое тело (в данном случае стержень электроскопа) в незаряженном состоянии содержит положительные и отрицательные заряды (ионы и электроны) в одинаковых количествах. Так как действия равных положительных и отрицательных зарядов на какое-нибудь заряженное тело равны по величине и противоположны по направлению, то эти действия взаимно уничтожаются, а потому и не обнаруживаются.

Когда мы приблизили к верхнему концу стержня электроскопа заряд (например, положительно заряженный шар на изолирующей ручке), то на стержне произошло перераспределение электронов. Они под действием положительного заряда переместились вверх, а положительные ионы остались на своих местах. Вследствие этого на верхнем конце стержня образовался избыток электронов (по сравнению с нормальным числом), т. е. отрицательный заряд. На

листочках электроскопа, наоборот, возник недостаток электронов, или, что то же, избыток положительных ионов, т. е. положительный заряд. Наличие одноименных зарядов на листочках и вызвало их отталкивание друг от друга.

Итак, если к какому-нибудь незаряженному проводнику приблизить заряженное поле, то на проводнике обнаруживаются два равных по величине заряда: на ближнем конце — разноименный, а на дальнем конце — одноименный с зарядом тела. Общий заряд проводника остался по-прежнему равным нулю. Это явление называется электрическим влиянием.

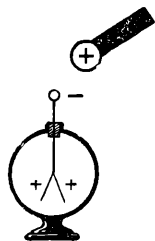


Рис. 301. При приближении к незаряженному электроскопу заряженного шара листочки электроскопа расходятся.

Продолжим наш опыт. Коснемся положительно заряженным шаром верхнего конца стержня электроскопа и отнесем шар. Мы увидим, что листочки электроскопа при касании шара разойдутся еще больше, а при удалении шара угол между листочками несколько уменьшится. При касании шара и стержня имеющиеся на верхнем конце стержня лишние электроны перешли на шар и этим уменьшили на нем число недостающих электронов. Заряд шара уменьшился, и общий заряд стержня, который до касания был равен нулю, теперь стал положительным, так как число электронов на нем меньше, чем соответствует норме. Этот недостаток особенно велик на листочках, поскольку оставшийся на шаре заряд притягивает электроны к верхнему концу стержня. По удалении шара электроны частично перемещаются на листочки и положительный заряд на них уменьшается.

Продолжим опыт далее. Разрядив электроскоп, поднесем к нему еще раз заряженный шар, но не будем касаться им стержня. Вместо этого коснемся ненадолго пальцем стержня электроскопа. Листочки опадут, но если отвести заряженный шар, вновь разойдутся. Что же произошло? При касании пальцем на стержень перешло некоторое число электронов; недостаток электронов на нижнем конце стержня исчез, но возник недостаток электронов на телах, окружающих стержень. Общий заряд на стержне теперь стал отрицательным, но пока шар не удален, лишние электроны находятся на верхнем конце стержня, а на листочках заряда нет. По удалении заряженного шара электроны переходят и на листочки, заряжая их отрицательно.

Последний опыт показывает, что, имея положительно заряженное тело, можно другое тело зарядить отрицательно, причем положительный заряд не изменится. Точно так же, имея отрицательно заряженное тело, можно другое тело зарядить положительно. Этот способ электризации тел называется электризацией посредством влияния.

§ 223. **Притяжение незаряженных тел заряженным телом.** Зарядим шар на изолирующей ручке положительно или отрицательно. Поднесем его к незаряженной бумажке, лежащей на столе или подвешенной на нитке. Мы увидим, что бумажка притянется к шару (рис. 302). Поднесем заряженный шар к доске, которая может поворачиваться с малым трением (рис. 303). Доска тоже притянется

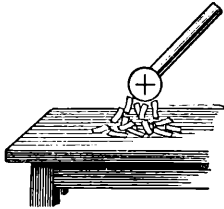


Рис. 302. Незаряженные бумажки, лежащие на столе, притягиваются к заряженному телу.

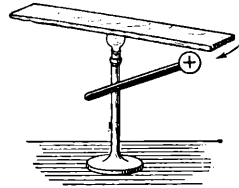


Рис. 303. Незаряженная доска притягивается к заряженному шару.

к шару. Очевидно, к заряженному телу притягиваются вообще все окружающие тела.

Чем это объяснить? На незаряженной бумажке вследствие электрического влияния поднесенного заряда образуются два заряда. Заряд на ближнем конце, как разноименный, притягивается к поднесенному, а заряд на дальнем конце отталкивается. Так как притягивается ближний конец, а отталкивается — дальний, то притяжение сильнее, и оно преодолевает отталкивание.

У п р а ж н е н и е

310. Если поднести руку к наэлектризованному «султану», то бумажные листы притягиваются к ней. Объясните явление.

§ 224. **Электрофор.** Электризация посредством влияния позволяет снимать с проводника неограниченное количество положительных и отрицательных электрических зарядов. Это можно сделать, например, при помощи прибора, называемого э л е к т р о ф о р о м (рис. 304). Он состоит из эбонитового диска *A* и металлического диска *B*, снабженного изолирующей ручкой *C*. Наэлектризуем трением шерстяной материей положенный на стол эбонитовый диск *A* (отрицательно). Поместим на него диск *B*. Так как эбонит плохо проводит электричество, то заряд с диска *A* на диск *B* практически не перейдет. Вследствие электризации влиянием на нижней поверхности

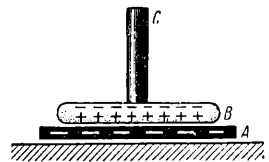


Рис. 304. Электрофор.

диска B получится положительный заряд, а на верхней — отрицательный. Коснемся рукой диска B . Отрицательный заряд с диска B «уйдет в землю», а положительный останется, так как он притягивается к отрицательному заряду на диске A . Положительный заряд на диске B и отрицательный заряд на диске A , находясь на малом расстоянии, уничтожают действие друг друга в окружающем пространстве. Мы можем отдалить положительный заряд от отрицательного, подняв диск B за ручку C . Отдаляя диски, мы производим работу против сил электрического притяжения. За счет этой работы появляется электрическая энергия.

Изолированный заряд на диске B можно передать другим телам и затем повторить опыт.

Способ получения зарядов посредством электризации влиянием используется в электрофорной машине, которая была изображена на рис. 292.

У п р а ж н е н и е

311. Совершается ли работа против сил электрического притяжения при поднимании и опускании диска, если не отводить отрицательный заряд в землю? Что будет происходить, если поднимать и опускать диск B , не меняя имеющегося на нем положительного заряда?

§ 225. Появление и исчезновение зарядов. Мы видели, что при трении двух незаряженных тел одновременно появляются два равных заряда — положительный и отрицательный. При электризации влиянием тоже одновременно появляются положительный и такой же величины отрицательный заряды. Это справедливо и для любого физического процесса, используемого в источниках тока. Во всех этих процессах на полюсах источников создаются одновременно положительные и отрицательные заряды. Итак, электризация тел всегда состоит в одновременном появлении положительного и отрицательного зарядов. Если же заряды исчезают, то одновременно с исчезновением положительного заряда исчезает такой же отрицательный заряд (и наоборот).

Иногда, говоря о заряженном теле, мы не упоминаем о другом, которое заряжено противоположным зарядом. Однако такой заряд всегда существует. Если, например, мы получили на изолированном шаре положительный заряд, то на окружающих телах — на стенах, на потолке, на столе, на близстоящих людях — образуются отрицательные заряды, в сумме равные заряду на шаре (рис. 305 а). Если мы соединим заряды на шаре и на окружающих телах проводником, например коснемся шара рукой, то эти заряды соединятся и взаимно уничтожатся (рис. 305 б). В таких случаях принято говорить, что заряд с шара «уходит в землю».

Вдумаемся, почему появляются и исчезают заряды. Пусть, например, мы имеем два незаряженных тела A и B (рис. 306). Можно

представить себе следующие способы появления зарядов. а) С тела *A* снимается положительный заряд (отчего тело *A* заряжается отрицательно) и переносится на тело *B*, которое при этом заряжается

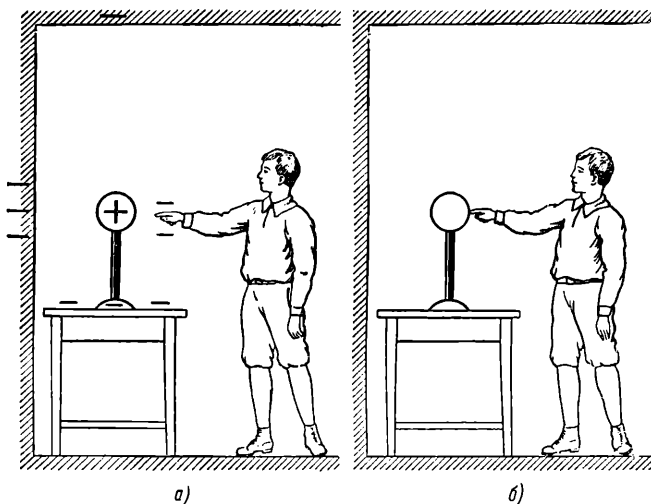


Рис. 305. а) На окружающих заряженный шар тела имеются заряды противоположного знака; б) при прикосновении руки к шару одновременно исчезают заряды на шаре и на окружающих его телах.

положительно. В этом случае зарядение тел *A* и *B* осуществляется перемещением положительного заряда. б) С тела *B* снимается

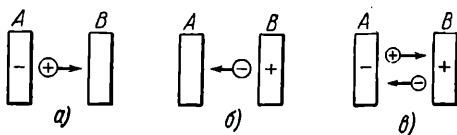


Рис. 306. Различные способы зарядить тело *A* отрицательно, а тело *B* — положительно.

отрицательный заряд (отчего тело *B* заряжается положительно) и переносится на тело *A*, которое при этом заряжается отрицательно. в) Зарядение тел *A* и *B* производится одновременным движением и положительных, и отрицательных зарядов навстречу друг другу.

Исчезновение зарядов тоже может осуществляться или движением положительного заряда, или движением отрицательного заряда, или одновременным движением и того и другого навстречу друг другу.

На основании сказанного в § 215 мы считаем, что в металлах движутся только носители отрицательных зарядов — электроны, а носители положительных зарядов — ионы — остаются на местах, т. е. в узлах решеток кристаллов, из которых состоит металл. В растворах кислот и щелочей, а также в газах движутся навстречу друг другу носители зарядов обоих знаков — положительные и отрицательные ионы.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

§ 226. Поле электрических зарядов. Мы познакомились с понятием электрического заряда. Мы узнали, что наличие и величина заряда обнаруживаются наличием и величиной сил, действующих на другой заряд, помещенный на некотором расстоянии от первого заряда. Эти силы называются электрическими. Условимся считать положительным то направление электрической силы, в котором она действует на положительный заряд.

Очевидно, пространство, в котором действуют электрические силы, чем-то отличается от пространства, где эти силы отсутствуют. Мы говорим поэтому, что в пространстве, где обнаруживается наличие электрических сил, существует электрическое поле. Так как сил, не связанных с материей, не существует, то мы должны сделать вывод, что электрическое поле есть особый вид материи. Итак, электрическое поле есть вид материи, наличие которого обнаруживается по наличию электрических сил, т. е. сил, действующих на заряженные тела. Как мы увидим впоследствии, электрическому полю, как и всем иным видам материи, присущи и масса, и энергия.

Когда мы натраем эбонитовую палку шерстяной тканью, а затем отдаляем их друг от друга, в пространстве между ними возникает электрическое поле. Когда положительные и отрицательные заряды на двух телах соединяются, то электрическое поле исчезает. Значит ли это, что материя в виде электрического поля может создаваться и уничтожаться? Нет. Мы не можем здесь рассматривать суть дела подробно и возвратимся к этому вопросу в последней главе.

Пока укажем только, что изменение электрического поля всегда связано с превращением энергии из одного вида в другой. А превращение энергии всегда связано с превращением материи. Например, при сближении положительно и отрицательно заряженных частиц электрическое поле постепенно исчезает, но зато увеличивается скорость, а следовательно, и кинетическая энергия частиц. Увеличение энергии частиц связано же, как мы узнаем впоследствии, с увеличением массы их. Таким образом, при появлении и при исчезновении электрического поля происходит превращение материи из одного вида в другой, и общее количество материи в рассматриваемой системе остается неизменным.

§ 227. **Электрические силовые линии.** Чтобы охарактеризовать электрическое поле, надо указать направление и величину силы, действующей на положительный заряд, если поместить его в ту или иную точку поля. Очень удобно сделать это при помощи понятия силовых линий.

Силовыми линиями электрического поля называются воображаемые линии, направление которых в любой точке поля совпадает с направлением электрической силы в этой точке. Напомним, что в случае кривых линий направление линий в какой-либо точке дается направлением касательной к ней (рис. 307).



Рис. 307. Направление электрической силы F совпадает с направлением касательной к силовой линии поля.

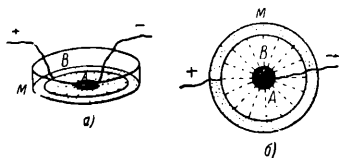


Рис. 308. Расположение крупинки в ванночке M показывает вид электрических силовых линий между разноименно заряженным диском A и окружающей его проволокой B . а) Вид сбоку; б) вид сверху.

Расположение силовых линий электрического поля можно установить, например, посредством такого опыта: в ванночку наливают густое масло, скажем, касторовое, в котором взвешены мелкие частички (например, манная крупа). Если в масле создать электри-

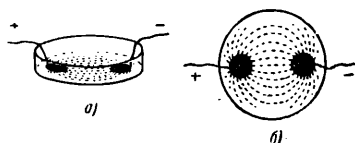


Рис. 309. Расположение крупинки показывает вид силовых линий между разноименно заряженными дисками. а) Вид сбоку; б) вид сверху.

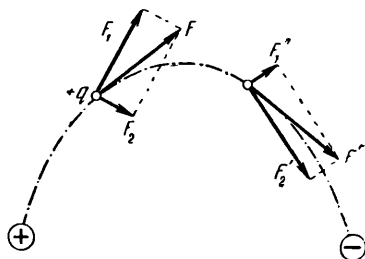


Рис. 310. Силы F_1 и F_2 , действующие на заряд q в двух положениях, и их равнодействующая F ; направление F касательно к силовой линии, показанной штрих-пунктиром.

ческое поле, то крупинки наэлектризуются, притянутся друг к другу и образуют цепочки, совпадающие с направлением силовых линий. На рис. 308 показан вид силовых линий в случае небольшого заряженного диска или шарика, окруженного проволочкой, имеющей заряд противоположного знака. В этом случае силовые линии направлены по радиусам. Густота расположения силовых линий свя-

зана с величиной электрической силы. Вблизи шарика электрические силы больше и густота расположения линий тоже больше.

На рис. 309 показано поле в случае двух разноименно заряженных дисков или шариков. На рис. 310 показано, что результирующая сила, действующая на заряд, складывается из сил притяжения к одному заряду и отталкивания от другого заряда.

Наиболее интересным для нас является поле между двумя плоскими пластинками, параллельно расположенными и заряженными положительно и отрицательно (такая система называется плоским конденсатором, см. § 236). В этом случае силовые линии являются прямыми, перпендикулярными к пластинкам (рис. 311).

Если силовые линии расположены в поле всюду с одинаковой густотой, то на заряд, помещенный в любой точке поля, действует одна и та же сила. Такое поле называется однородным. На рис. 311 видно, что поле плоского конденсатора однородно (за исключением его краев).

Обратим внимание, что электрические силовые линии тянутся от одного заряженного тела к другому. Так как за направление поля принимается направление силы, действующей на положительный заряд, то началом силовых линий является положительный заряд, а концом — отрицательный.

§ 228. Напряженность электрического поля. Расположение силовых линий дает общее представление о распределении электрического поля в пространстве. Однако это представление не является полным. Нас интересует не только направление электрических сил, но и величина их. Величина силы, действующей на один и тот же заряд, может быть разной в зависимости от того, в каком месте поля находится этот заряд. Это требует для более полного описания поля ввести понятие *напряженности поля*. *Напряженностью электрического поля в какой-либо точке называется отношение силы, действующей на заряд, помещенный на эту точку, к величине заряда*. Обозначив величину заряда через q , действующую на него силу через F , напряженность поля через E , можно написать:

$$E = \frac{F}{q}; \quad F = Eq.$$

Согласно этой формуле за единицу напряженности в системе СИ принимают напряженность поля, действующего на заряд в 1 кс силой в 1 н (1 н/кс). Ниже (§ 235) мы познакомимся с более употребительным наименованием этой единицы 1 вольт/метр (1 в/м).

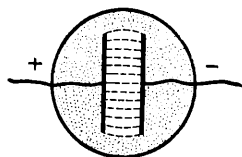


Рис. 311. Однородное поле между двумя разноименно заряженными пластинками. Вне пластинок поле отсутствует.

В системе СГСЭ за единицу напряженности можно принять напряженность поля, действующего на заряд, равный 1 ед. СГСЭ с силой в 1 *дин*. Очевидно, что $1 \text{ н/к} = \frac{10^5}{3 \cdot 10^9} = \frac{1}{3 \cdot 10^4}$ ед. СГСЭ.

Так же как и сила, напряженность электрического поля есть векторная величина. В любой точке поля вектор напряженности имеет определенное направление. В дальнейшем, говоря об электрическом поле, мы будем вместо точного выражения «направление вектора напряженности электрического поля» употреблять неточное*), но зато краткое выражение «направление электрического поля».

Рассмотрим поле точечного заряда. Пусть на расстоянии R от заряда q находится заряд q_1 . На основании закона Кулона (§ 217) на заряд q_1 действует сила

$$F = \frac{qq_1}{4\pi\epsilon R^2}.$$

Отсюда напряженность поля заряда q в точке, где находится заряд q_1 , равна

$$E = \frac{F}{q_1} = \frac{q}{4\pi\epsilon R^2}.$$

Та же формула относится к полю вне равномерно заряженного шара (R — расстояние до центра шара).

У п р а ж н е н и я

312. Металлический шар радиуса 20 см заряжен $6,6 \cdot 10^{-8}$ к. Найдите напряженность поля в воздухе в точках, отстоящих от центра шара на: а) 50 см; б) 25 см.

313. Два шарика расположены в воздухе на расстоянии 20 см. Шарик заряжен +50 ед. СГСЭ, и —50 ед. СГСЭ. Найдите напряженность поля в следующих точках: а) удаленной на 10 см от каждого из шариков; б) удаленной на 20 см от каждого из шариков.

314. Решите упражнение 306, приняв, что заряды шариков равны +50 ед. СГСЭ и +50 ед. СГСЭ.

315. В однородном поле напряженностью $E = 600$ н/к находится частица, заряд которой равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ к, а масса $9,1 \cdot 10^{-28}$ г (эти данные относятся к электрону). а) С каким ускорением движется электрон? б) Сколько времени потребуется электрону, чтобы пройти расстояние 10 см, если его начальная скорость равна нулю?

§ 229. Напряженность электрического поля внутри проводника. Мы видели (§§ 221, 225), что при зарядении проводника заряды размещаются на его наружной поверхности, и на окружающих этот проводник телах всегда находятся заряды, равные дан-

*) Термин «электрическое поле» означает вид материи, но не величину, ее характеризующую.

ному по величине и противоположные по знаку. Электрическое поле всегда находится между зарядами разных знаков. Отсюда ясно, что вне заряженного проводника имеется электрическое поле, напряженность которого зависит от величины и расположения зарядов, а внутри проводника электрическое поле отсутствует, так как там нет зарядов противоположного знака. Это относится и к сплошному проводнику, и к полуму, если в его полости отсутствуют заряженные тела.

Что произойдет, если сплошной или полый проводник поместить в электрическое поле, образованное разноименными зарядами на

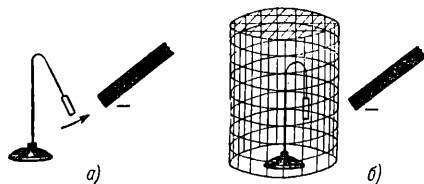


Рис. 312. а) Подвешенная на нитке папиросная гильза притягивается к заряженной палочке; б) та же гильза, закрытая металлической сеткой, не притягивается к заряженной палочке.

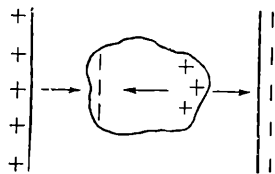


Рис. 313. Проводник в электрическом поле.

Наведенные заряды создают внутри проводника поле, направленное справа налево, тогда как основное поле направлено слева направо.

других телах? Рассмотрим такой опыт. Если к незаряженной папиросной гильзе, висящей на нитке, поднести заряженное тело, то гильза притянется к телу (рис. 312, а) по причинам, которые были рассмотрены в § 223. Если же окружить гильзу металлической сеткой и вновь поднести заряженное тело, то гильза останется в покое (рис. 312, б). В металлической сетке вследствие электрического влияния возникают заряды разных знаков. Эти заряды образуют поле, которое внутри проводника направлено противоположно внешнему полю и уничтожает его (рис. 313). Уничтожение внешнего поля внутри полого проводника называется *электростатической защитой* и часто применяется в технике.

Итак, при отсутствии внутри полого проводника заряженных тел напряженность электрического поля внутри него всегда равна нулю, какова бы ни была напряженность поля вне его.

§ 230. Диэлектрик в электрическом поле. Мы установили, что в проводнике, находящемся в электрическом поле, вследствие перемещения электрических зарядов поле уничтожается. Мы видели также (§ 217), что заряды, окруженные диэлектриком, например керосином, взаимодействуют с меньшей силой, чем при отсутствии диэлектрика. Это значит, что внутри диэлектрика

поле каждого из этих зарядов ослаблено. Следовательно, и в диэлектриках электрическое поле вызывает перемещения зарядов.

В диэлектрике невозможно движение зарядов по всему телу, как в металле. Однако в нем возможно перемещение зарядов внутри молекул, что достигается поворотом молекулы (или изменением ее строения). Такое перемещение зарядов внутри диэлектрика называется **поляризацией диэлектрика**. Молекулы со смещенными положительными и отрицательными зарядами называются **диполями**. На рис. 314 схематически показано строение

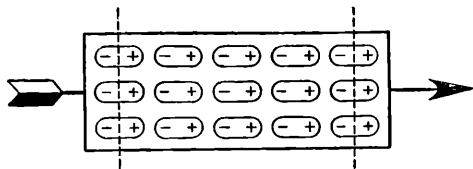


Рис. 314. Диэлектрик в электрическом поле.

Молекулы повернулись так, что на левом конце диэлектрика образовался отрицательный, а на правом — положительный заряд.

диэлектрика, находящегося в электрическом поле, направление которого показано стрелкой. Обратим внимание, что внутри области, ограниченной на рис. 314 пунктирными линиями, имеется одинаковое количество положительных и отрицательных зарядов. Снаружи от пунктирных линий находятся положительные и отрицательные заряды, создающие поле, направленное справа налево, т. е. противоположно внешнему полю. Это внутреннее поле и ослабляет внешнее поле. Электрическая проницаемость, а потому и внутреннее поле разных веществ неодинаковы. Это связано с различием в строении молекул. Вещества, у которых внутри молекул положительные заряды сильно смещены в одну сторону, а отрицательные — в другую, особенно сильно ослабляют внешнее поле. Таково, например, строение молекул воды, которая, как мы уже знаем, имеет очень большую электрическую проницаемость.

§ 231. Работа при перемещении заряда в электрическом поле.

Рассмотрим работу, совершаемую при перемещении точечного электрического заряда в однородном поле. Пусть заряд переносится из точки *A* на положительной пластине плоского конденсатора в точку *B* на отрицательной пластине (рис. 315). Способ расчета работы при перенесении электрического заряда вполне схож с расчетом работы силы тяжести при падении груза с некоторой высоты (§ 82). Мы видели, что работа силы тяжести не зависит от формы траектории груза и равна произведению силы тяжести *P* на высоту

h ($A = P \cdot h$). Точно таким же способом можно показать, что работа электрической силы при перемещении заряда не зависит от формы траектории. По какой бы траектории ни перемещался заряд из точки A в точку B , работа электрических сил будет всегда одна и та же.

Можно показать, что работа перемещения заряда не зависит от формы траектории не только в однородном электрическом поле, но и в любом сколь угодно сложном поле. Это положение имеет важное следствие: работа электрических сил при перемещении заряда по замкнутой кривой в исходную точку всегда равна нулю. Действительно, если при перемещении заряда из A в B по кривой AMB (рис. 315) совершается положительная работа, то при перемещении его в обратном направлении по кривой BLA совершается такая же отрицательная работа. Общая работа равна нулю.

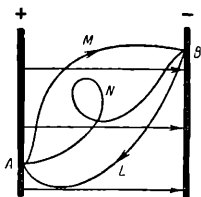


Рис. 315. При перенесении заряда между точками A и B по различным путям (AMB , ANB , ALB , ...) производится одна и та же работа.

§ 232. Напряжение. Потенциал. Мы указали, что работа электрических сил при перемещении заряда из одной точки электрического поля в другую не зависит от формы траектории заряда. Это дает возможность ввести важную для расчетов электрических явлений величину — **н а п р я ж е н и е**. *Напряжением между двумя точками электрического поля называется отношение работы электрических сил при перемещении заряда к величине этого заряда.* Обозначая напряжение между двумя точками поля через U и работу перенесения заряда q через A , получим формулу

$$U = \frac{A}{q}.$$

Очевидно, напряжение между двумя точками поля равно работе перемещения единицы заряда из одной точки в другую.

Подчеркнем, что понятие напряжения относится к двум разным точкам поля. Поэтому удобно рассматривать напряжение как разность некоторых величин, характеризующих свойства поля в этих точках. Для этого надо ввести понятие **п о т е н ц и а л а**. *Потенциалом какой-либо точки электрического поля условно называется отношение работы электрических сил при перемещении заряда из этой точки на землю к величине этого заряда.* Иными словами, потенциал точки электрического поля есть работа электрических сил при перемещении единицы заряда из этой точки на землю.

Из этого определения следует, что потенциал всех тел, соединенных проводниками с землей, принимается равным нулю.

Необходимо иметь в виду, что это условно. Вполне возможно принять за нуль потенциал любой другой точки поля.

Потенциал точки поля считается положительным, если работа электрических сил при перенесении положительного заряда из этой точки на землю является положительной величиной.

Так как работа перемещения заряда не зависит от формы траектории, то *напряжение между двумя точками есть разность потенциалов этих точек.*

Для уяснения понятия потенциала полезно сопоставить его с понятием уровня, которым мы пользовались, говоря о поле тяготения. Так же как и нулевой уровень, нулевой потенциал устанавливается условно и совершенно произвольно. Подобно тому как разные уровни в поле тяготения могут быть и выше, и ниже выбранного нами нулевого уровня (положительные и отрицательные уровни), так и потенциалы в разных точках могут быть и выше, и ниже выбранного нами нулевого потенциала (положительные и отрицательные потенциалы). Разность двух уровней никак не зависит от того, какой уровень мы выбрали за нулевой. Подобно этому и разность потенциалов (напряжение) никак не зависит от выбора нулевого потенциала.

Из сказанного следует, что напряжение, или разность потенциалов между двумя точками поля, есть величина, вполне определяемая свойствами поля. В отличие от напряжения, потенциал каждой отдельной точки поля есть *условная* величина, зависящая не только от свойств поля, но и от выбора той точки поля, потенциал которой мы принимаем равным нулю.

Очевидно, потенциалы различных точек на какой-либо силовой линии электрического поля различны. При равновесии зарядов на проводнике поле внутри проводника, как мы видели в § 229 отсутствует, поэтому отсутствует и работа перенесения заряда. Следовательно, *при покоящихся зарядах потенциалы различных точек проводника одинаковы.* Как мы увидим далее, при движении зарядов по проводнику это не имеет места, и потенциалы точек проводника, по которому идет ток, вообще говоря, различны.

§ 233. Единицы напряжения. За единицу напряжения можно принять напряжение между двумя точками, при котором работа перемещения заряда в 1 ед. СГСЭ равна 1 эргу (электростатическая единица напряжения). Более употребительна единица, принадлежащая к системе единиц СИ, — в о л ь т. *Вольт (сокращенно в) есть напряжение между точками, при котором работа перемещения 1 к равна 1 дж.* Те же единицы служат и для потенциала.

Измерять напряжение можно разными способами. Если, например, снабдить электроскоп шкалой, деления которой указывают напряжения между телами, к которым присоединены стержень и коробка электроскопа, то для измерения напряжения используется

наблюдение взаимодействия заряженных тел. Такие приборы называются электростатическими вольтметрами. Однако более удобно измерять напряжения, особенно небольшие, при помощи приборов, действие которых основано на проявлении магнитного поля тока. Устройство и действие некоторых типов этих приборов мы рассмотрим при изучении магнитного поля тока. Пока укажем, что такие вольтметры присоединяются проводами к точкам, напряжение между которыми надо измерить.

В природе и технике мы встречаемся с очень различными напряжениями. Напряжение между клеммами гальванического элемента равно 1—2 в; батарейка карманного фонаря дает 3,5—4,5 в. Напряжение между проводами осветительной сети равно 127 в или 220 в. Напряжение между проводами, изображенными на рис. 293, составляет несколько десятков киловольт; а между грозовым облаком и Землей — десятки миллионов вольт.

У п р а ж н е н и е

316. Покажите, что электростатическая единица разности потенциалов равна 300 в.

§ 234. Расчет работы перемещения заряда. Из формулы, приведенной в § 232:

$$U = \frac{A}{q},$$

следует:

$$A = Uq.$$

Это и есть формула для работы электрических сил.

Пусть, например, электролампочка работает при напряжении в 120 в и через нее прошло 500 к электричества. При этом произведена работа

$$A = 120 \cdot 500 \text{ дж} = 60\,000 \text{ дж}.$$

У п р а ж н е н и я

317. Какая работа производится при перемещении заряда 5 микрокулонов с провода, потенциал которого относительно земли равен 2000 в, на провод, потенциал которого относительно земли равен —2000 в?

318. Какую работу совершили электрические силы, если по обмотке электропечи, работающей под напряжением 20 в, прошло 7000 к?

§ 235. Связь между напряженностью и разностью потенциалов. Рассмотрим поле плоского конденсатора (однородное). Работа переноса заряда вдоль силовой линии равна произведению силы на перемещение:

$$A = Fs;$$

но, как указано в § 228,

$$F = Eq.$$

Отсюда

$$A = Eqs.$$

Сравнивая это с формулой, указанной в § 234,

$$A = Uq,$$

получим

$$Eqs = Uq,$$

откуда

$$E = \frac{U}{s}.$$

Итак, в однородном поле напряженность поля равна отношению разности потенциалов в двух точках силовой линии к расстоянию между ними. Поэтому в системе СИ за единицу напряженности поля принимают напряженность такого однородного поля, в котором на отрезке силовой линии длиной 1 м разность потенциалов равна 1 в ($1 \frac{в}{м}$).

У п р а ж н е н и я

319. Какова напряженность поля в плоском конденсаторе с толщиной изолирующего слоя 2 мм, если разность потенциалов равна 300 в?

320. Стекло выдерживает, не разрушаясь, напряженность электрического поля до $100 \frac{кв}{см}$. Какое наибольшее напряжение можно подать на стек-

лянный конденсатор с толщиной изолирующего слоя 1,5 мм?

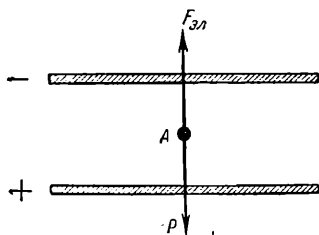


Рис. 316.

321. В горизонтально расположенном плоском конденсаторе в вакууме находится пылинка A (рис. 316), которая под действием света лишилась одного электрона. Масса пылинки $5 \cdot 10^{-13}$ г. При какой разности потенциалов между пластинами конденсатора вес пылинки (P) уравновешивается электрической силой ($F_{эл}$)? Расстояние между обкладками конденсатора равно 5 мм. Заряд электрона $4,8 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ.

§ 236. **Емкость конденсатора.** При переносе заряда с одного проводника на другой всегда происходит изменение заряда обоих проводников. Если, например, проводники A и B до переноса заряда были незаряжены, то после переноса положительного заряда с A на B первый окажется заряженным отрицательно, а проводник B — заряженным положительно (рис. 317). Общий заряд системы проводников A и B останется, конечно, равным нулю. Система двух проводников (чаще всего металлических пластин — «обкладок»), разделенных каким-либо диэлектриком, называется **к о н д е н с а т о р о м**. Процесс переноса заряда с одной

пластины конденсатора на другую называется его зарядкой, величина перенесенного заряда (имеется в виду перенесение положительного заряда) называется зарядом конденсатора. При зарядке конденсатора в слое диэлектрика между пластинами образуется электрическое поле и между пластинами появляется напряжение. Возьмем конденсатор в виде двух металлических дисков, помещенных на изолирующие подставки и разделенных слоем воздуха (рис. 317). Поставим коробку электроскопа на изолирующую подставку и соединим диски проволочками: один — с коробкой,

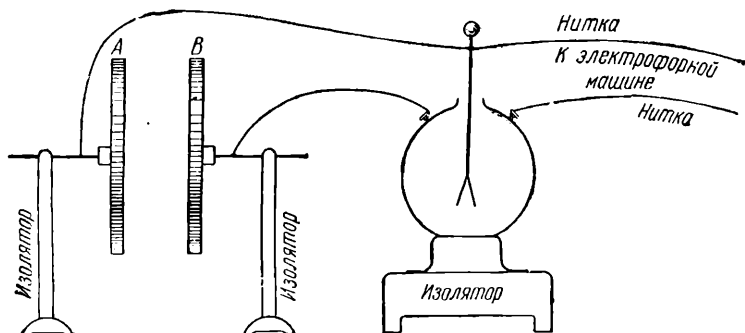


Рис. 317. При работе электрофорной машины заряд конденсатора AB постепенно увеличивается. Электроскоп показывает, что одновременно повышается напряжение на конденсаторе.

а другой — со стержнем электроскопа. Это даст возможность судить о напряжении между дисками (чем больше разойдется листочки электроскопа, тем выше напряжение). Соединим диски длинными сухими нитками с полюсами электрофорной машины (§ 212) и начнем вращать ее. Электроны будут переходить с одного диска на другой, и заряд конденсатора будет медленно (нити проводят ток плохо) увеличиваться. Одновременно будет увеличиваться и напряжение на конденсаторе, о чем можно судить по углу расхождения листочков электроскопа. Опыт показывает, что большему заряду конденсатора соответствует большее напряжение. Точные измерения указывают, что для данного конденсатора величина заряда конденсатора и напряжение на нем пропорциональны друг другу. Иными словами, *отношение заряда конденсатора к напряжению на нем есть для данного конденсатора величина постоянная*. Для разных же конденсаторов это отношение различно. В этом можно убедиться так: оставим заряд конденсатора неизменным, удалив нити, соединяющие его с электрофорной машиной, и будем менять расстояние между дисками или вдвинем между дисками стеклянную или иную изолирующую пластинку, меняя этим материал диэлектрика. Мы увидим, что при этом будет меняться и угол между листочками

электроскопа, а следовательно, и напряжение. Значит, меняется и отношение заряда к напряжению.

Отношение заряда конденсатора к имеющемуся на нем напряжению называется *емкостью* (или просто емкостью) конденсатора. Очевидно, *емкость конденсатора показывает, какой требуется заряд, чтобы зарядить конденсатор до напряжения 1 в.*

Обозначив заряд q , разность потенциалов U и емкость C , можно написать:

$$C = \frac{q}{U},$$

откуда

$$q = CU.$$

Единицами емкости в системах единиц СИ и СГСЭ служат соответственно фарада (ϕ) и сантиметр ($см$) *).

Фарада — емкость такого конденсатора, который при напряжении в 1 вольт имеет заряд в 1 кулон.

Сантиметр есть емкость такого конденсатора, который при 1 электростатической единице напряжения имеет 1 электростатическую единицу заряда.

Кроме этих единиц, в технике часто употребляют производные единицы: микрофараду ($10^{-6} \phi$, обозначается $мкф$) и пикофараду ($10^{-12} \phi$, обозначается $пф$). Пикофарада и сантиметр близки друг другу ($1 пф = 0,9 см$). $1 \phi = 9 \cdot 10^{11} см$.

У п р а ж н е н и я

322. Какова емкость конденсатора, если при напряжении в 100 вольт заряд его равен 5 микрокулонам?

323. Какой заряд имеет конденсатор емкостью в 18 000 см при напряжении 20 000 в?

324. Насколько понизится напряжение на конденсаторе емкостью 2 микрофарады, если заряд конденсатора уменьшится на 7 микрокулонов?

§ 237. Емкость плоского конденсатора. От чего зависит емкость плоского конденсатора? Это можно исследовать при помощи установки, изображенной на рис. 317. Мы можем рассматривать эту установку как два конденсатора: один — плоский, из двух пластинок, другой — из стержня электроскопа и коробки.

Меняя расстояние между дисками, мы увидим, что при уменьшении этого расстояния листочки электроскопа сходятся, а при увеличении — расходятся. Если листочки электроскопа сходятся, значит, заряд с них перетекает на конденсатор. Отсюда следует, что при уменьшении расстояния между пластинами емкость конден-

*) Таким образом, слово «сантиметр», кроме единицы длины, обозначает еще единицу электрической емкости.

сатора возрастает. Теперь будем сдвигать один из дисков в сторону так, чтобы расстояние между ними не менялось, а уменьшалась бы часть площади пластин, находящейся друг против друга (р а б о ч а я п л о щ а д ь конденсатора, рис. 318). Листочки электроскопа расходятся, что указывает на уменьшение емкости конденсатора.

Значит, *емкость конденсатора тем больше, чем больше поверхность обкладок и чем тоньше изолирующий слой между ними.*

С некоторыми оговорками это утверждение относится и к конденсаторам любой формы. В частности, любое заряженное тело (например, шар на рис. 305) можно рассматривать как одну из обкладок конденсатора; другой обкладкой являются стены, потолок и т. д. Чем больше диаметр шара, тем больше его поверхность и тем меньше расстояние его от стен и потолка. Поэтому емкость конденсатора, составленного шаром и стенами помещения, тем больше, чем больше радиус шара.

От материала и толщины обкладок емкость конденсатора не зависит. Это понятно: внутри материала, из которого сделаны обкладки, при зарядке конденсатора не создается никакого электрического поля. Зато емкость конденсатора зависит от материала изолирующего слоя, в котором существует электрическое поле.

Опыт показывает, что емкости конденсаторов одинаковых размеров, но с разными диэлектриками между обкладками относятся друг к другу, как электрические проницаемости диэлектриков. Если, например, в одном из конденсаторов между обкладками находится слюда (электрическая проницаемость 7), а в другом — керосин (электрическая проницаемость 2), то емкость первого в $7 : 2 = 3,5$ раза больше емкости второго.

Это нетрудно понять. Мы уже знаем, что в диэлектрике, помещенном в электрическое поле, происходят изменения, ведущие к уменьшению напряженности поля в нем. Это уменьшение связано со снижением разности потенциалов (см. § 235). А последнее и показывает, что емкость увеличилась.

Все сказанное приводит к выводу, что сущность явлений, происходящих в конденсаторе при его зарядке, заключается в создании электрического поля в его изолирующем слое.

У п р а ж н е н и я

325. Емкость плоского воздушного конденсатора равна 100 см. Какова емкость воздушного конденсатора такой же формы, все размеры которого в полтора раза больше?

326. Как изменится емкость плоского конденсатора, если уменьшить расстояние между его обкладками в два раза и заменить находящийся между ними слой воздуха керосином?

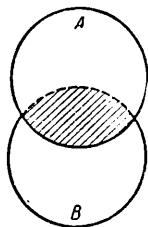


Рис. 318. Рабочая площадь конденсатора, состоящего из двух дисков А и В (заштрихована).

§ 238. Конструкции конденсаторов. На рис. 319 показан наиболее старый тип конденсатора — стеклянная лейденская банка. На рис. 320 изображен конденсатор, употребляемый в телефонии, с изолятором из парафинированной бумаги. На рис. 321 представлен воздушный конденсатор переменной емкости, употребляемый в радиотехнике. Изменение его емкости достигается вдвиганием или выдвиганием пластинок.

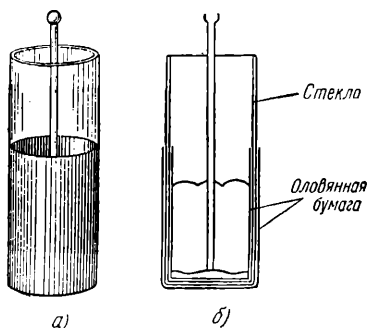


Рис. 319. Внешний вид (а) и разрез (б) лейденской банки.

с диэлектриком в виде тонкого окисного слоя на поверхности алюминиевой фольги, погруженной в специальный раствор («электролитические конденсаторы»).

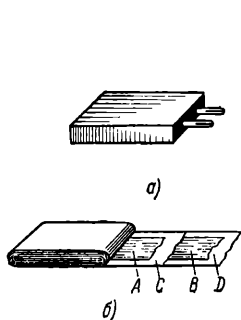


Рис. 320. Телефонный конденсатор: а) внешний вид; б) внутреннее устройство.

А и В — ленты из металлической фольги, С и D — ленты из тонкой парафинированной бумаги.

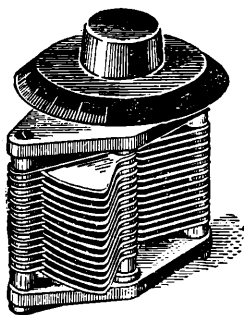


Рис. 321. Конденсатор переменной емкости.

При применении конденсаторов приходится учитывать не только их емкость, но и максимальное напряжение, которое они могут выдержать без разрушения (без пробы). Лейденские банки и другие конденсаторы со стеклянным изолирующим слоем обычно имеют небольшую емкость (примерно 10^3 см), зато могут выдерживать довольно высокое напряжение (десятки тысяч вольт). Конден-

саторы с бумажными изолирующими слоями, наоборот, обычно делаются большой емкости (примерно 10^7 см), но рассчитаны на значительно меньшие напряжения (несколько сотен вольт).

§ 239. Формула плоского конденсатора. Обозначим площадь обкладок плоского конденсатора S , расстояние между ними d , диэлектрическую проницаемость изолирующего слоя ϵ . Расчет, которого мы не будем приводить, показывает, что емкость конденсатора можно найти по формуле $C = \frac{\epsilon S}{d}$ *) (система СИ).

Из этой формулы можно найти

$$\epsilon = \frac{Cd}{S} \frac{\phi \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = \frac{Cd}{S} \frac{\phi}{\text{м}}.$$

В таких единицах обычно и даются значения ϵ в справочниках. Легко доказать, что указанная в § 219 размерность диэлектрической постоянной среды (ϵ и ϵ_0) совпадает с только что выведенной

$$\frac{\kappa^2}{\text{н.м}^2} = \frac{\kappa^2}{\text{н.м} \cdot \text{м}} = \frac{\kappa^2}{\text{дж} \cdot \text{м}} = \frac{\kappa}{\text{в} \cdot \text{м}} = \frac{\phi}{\text{м}},$$

так как $\text{дж}/\kappa = \text{в}$.

Диэлектрические проницаемости веществ

Вещество	$\epsilon_{\text{отн}}$	$\epsilon \frac{\phi}{\text{м}}$	Вещество	$\epsilon_{\text{отн}}$	$\epsilon \frac{\phi}{\text{м}}$
Вода	81	$71 \cdot 10^{-11}$	Парафин	2	$1,9 \cdot 10^{-11}$
Воздух	1,0006	$0,855 \cdot 10^{-11}$	Слюда	6,0	$5,3 \cdot 10^{-11}$
Керосин	2	$1,9 \cdot 10^{-11}$	Стекло	7,0	$6,2 \cdot 10^{-11}$

Пример. Вычислить электрическую емкость конденсатора, состоящего из двух станиолевых листочков площадью 10 см^2 , проложенных слюдой толщиной $0,1 \text{ см}$.

Выразим данные условия в единицах системы СИ:

$$10 \text{ см} = 0,001 \text{ м}$$

$$0,1 \text{ см} = 0,001 \text{ м}$$

$$\epsilon = 5,3 \cdot 10^{-11} \frac{\phi}{\text{м}}.$$

Решаем по формуле

$$C = \frac{5,3 \cdot 10 \cdot 0,001}{0,001} = 5,3 \cdot 10 \phi = 53 \text{ н}\phi.$$

*) В нерационализированной форме емкость плоского конденсатора вычислялась бы по более сложной формуле: $C = \frac{\epsilon \cdot S}{4\pi d}$. Польза рационализации здесь очевидна.

Кроме плоского конденсатора возможны конденсаторы шаровые, цилиндрические и др. Иногда говорят об емкости одного проводника, например уединенного шара, хотя это выражение всегда обозначает емкость конденсатора, у которого роль внешней (второй) обкладки играют удаленные предметы: стены комнаты и т. п. Емкость уединенного шара равна его радиусу. Отсюда становится понятной и приобретает наглядность единица емкости в системе СГСЭ — сантиметр. Это емкость шара радиусом 1 см. Единица электрической емкости фарада равна $9 \cdot 10^{11}$ см. Такой емкостью обладал бы шар радиусом $9 \cdot 10^{11}$ см, или 9 000 000 км! Радиус земного шара 6300 км. Емкость земного шара около 700 мкф.

У п р а ж н е н и я

327. Определите емкость конденсатора, состоящего из стеклянного листа толщиной 2 мм, на который наклеены металлические обкладки площадью по 630 см² каждая. Электрическая проницаемость стекла равна 6.

328. Определите электрическую проницаемость слюды, если конденсатор, состоящий из двух пластин площадью 5 см², разделенных слюдяной пластиной толщиной 0,01 мм, имеет емкость 3100 пф.

§ 240. Батареи конденсаторов. Для практических целей конденсаторы часто соединяют в батареи. На рис. 322 изображено

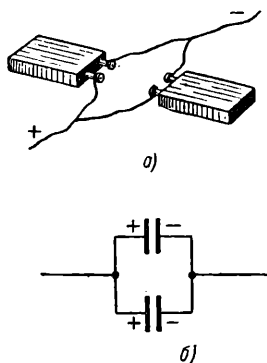


Рис. 322. а) Параллельное соединение телефонных конденсаторов; б) схематическое обозначение соединения.

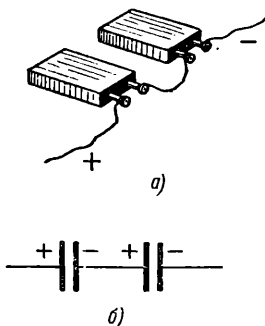


Рис. 323. а) Последовательное соединение телефонных конденсаторов; б) схематическое обозначение соединения.

так называемое параллельное соединение конденсаторов. Рассмотрим случай такого соединения одинаковых конденсаторов. Присоединение к одному конденсатору второго равносильно увеличению вдвое рабочей площади, а следовательно, и емкости. Вообще, емкость батареи параллельно соединенных оди-

наковых конденсаторов равна емкости отдельного конденсатора, умноженной на их число. На рис. 323 изображено последовательное соединение конденсаторов. Очевидно, что на батарею двух последовательно соединенных конденсаторов приходится вдвое большее напряжение, чем на каждый из них в отдельности. А это значит, что емкость такой батареи вдвое меньше емкости каждого из конденсаторов. Вообще, емкость батареи последовательно включенных одинаковых конденсаторов равна емкости отдельного конденсатора, деленной на их число. Для конденсаторов различных емкостей

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

Упражнения

329. Имеются 4 конденсатора по 2 пф каждый. Определите емкости батарей, составленных из этих конденсаторов по схемам на рис. 324, а — г.

330. Составьте наименьшим числом конденсаторов по 1 мкф каждой батарею с емкостями: а) 1,1 мкф; б) 2,7 мкф.

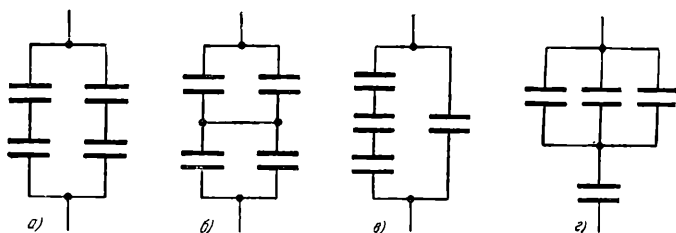


Рис. 324.

331. Сколько пластинок фольги размером $2 \times 3 \text{ см}^2$ надо взять для изготовления конденсатора емкостью 900 пф, применяя в качестве диэлектрика парафинированную бумагу толщиной 0,05 мм? Поясните решение схемой соединения положительных и отрицательных пластинок и расположения слоев бумаги. Электрическую проницаемость парафинированной бумаги примите равной 2.

§ 241. Энергия заряженного конденсатора. Соединим обкладки заряженного конденсатора, например, лейденской банки, проводником. Раньше чем проволока коснется второй обкладки, происходит разряд конденсатора (появляется искра). Значит, заряженная банка обладает потенциальной энергией. От чего зависит величина этой энергии? Мы уже знаем, что при движении электрических зарядов совершается работа, пропорциональная величине переносимых зарядов и разности потенциалов. Так как при разряде конденсатора разность потенциалов меняется от первоначальной

величины U до нуля, то средняя величина разности потенциалов равна $\frac{U}{2}$. Поэтому энергия заряженного конденсатора равна

$$E = \frac{Uq}{2}.$$

Так как $q = CU$ (§ 236), то

$$E = \frac{CU^2}{2}.$$

Если U выражено в вольтах, q — в кулонах, C — в фарадах, то E выразится в джоулях.

У п р а ж н е н и я

332. Какова работа электрических сил при разряде конденсатора 2 мкф, заряженного до 220 в?

333. Головку заряженного конденсатора переменной емкости (рис. 316) поворачивают настолько, что его емкость уменьшается с 700 до 350 пф. Если конденсатор отсоединен от источника напряжения, то заряд на нем не меняется. Начальное напряжение 300 в. Определите работу электрических сил при поворачивании головки конденсатора.

ГЛАВА XIX

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

§ 242. **Направление электрического тока.** Мы видели (§ 225), что электрический ток может осуществляться перемещением положительно заряженных частиц к отрицательному полюсу источника и отрицательно заряженных частиц к положительному полюсу. Мы указывали также, что в металлах электрический ток осуществляется перемещением электронов, т. е. отрицательно заряженных частиц, а в растворах кислот и солей — движением положительных и отрицательных ионов в противоположных направлениях. *Какова бы ни была природа тока, за его направление всегда принимается направление движения положительных зарядов.*

§ 243. **Роль источника электрической энергии.** Рассмотрим такой пример: имеются источник тока (например, батарея аккумуляторов) и две медные пластинки, укрепленные на изолирующей планке (рис. 325, а). Пластинки можно опустить в сосуд с раствором медного купороса (рис. 325, б). Если коснуться пластинками полюсов батареи (рис. 325, в), то пластинки зарядятся и между ними возникнет электрическое поле. Опустим пластинки в раствор. По раствору пройдет электрический ток, положительные и отрицательные заряды на пластинках исчезнут, а вместе с ними исчезнет и поле. Электрический ток в этом случае будет чрезвычайно кратковременным. Однако можно сделать его более длительным. Для этого надо надолго соединить опущенные в раствор пластинки с полюсами батареи. Батарея будет поддерживать электрическое поле между пластинками, доставляя все новые заряды.

Итак, роль источника электрической энергии состоит в том, что он поддерживает существование электрического поля внутри проводника, по которому идет ток, — в сосуде с раствором медного купороса, в волоске лампочки, в проводах и т. д.

Обратим внимание на различие в движении зарядов вне источника электрической энергии (во внешней цепи) и внутри него. Вне источника ток идет от «плюса» к «минусу», т. е. заряды движутся в том направлении, в котором на них действует электрическое поле: положительные — в направлении поля, отрицательные — в

обратном направлении. Внутри источника электрической энергии ток идет от «минуса» к «плюсу», т. е. заряды движутся в направлении, противоположном тому, в котором на них действует электрическое поле.

Значит, внутри источника тока перемещение зарядов вызывается не электрическим полем, а какими-то иными причинами: внутри

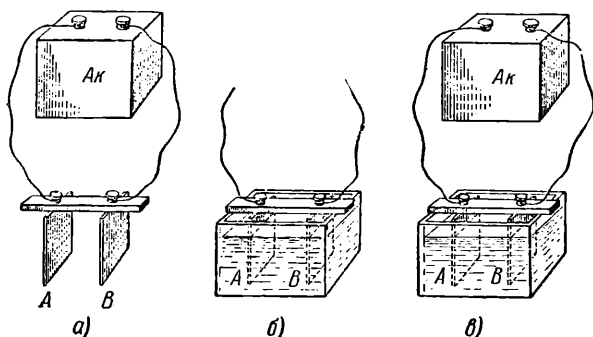


Рис. 325. а) Медные пластинки *A* и *B* присоединены к батарее аккумуляторов. Между пластинками создается электрическое поле; б) пластинки отсоединяют от батареи и опускают в раствор CuSO_4 ; проходит кратковременный ток, пластинки разряжаются, и электрическое поле между ними исчезает; в) пластинки *A* и *B*, опущенные в раствор CuSO_4 , соединены с батареей аккумуляторов; все время, пока пластинки соединены с батареей, между ними существует электрическое поле и через раствор CuSO_4 идет электрический ток.

источника электрической энергии на заряды действуют силы *постороннего происхождения*. В дальнейшем мы выясним процессы, происходящие внутри некоторых видов источников тока.

§ 244. Последовательное и параллельное соединения приборов.

Очень часто от одного источника тока работают несколько приборов (например, несколько ламп). Их можно соединять *последовательно и параллельно*.

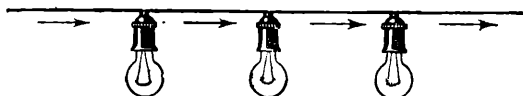


Рис. 326. Последовательное соединение ламп (цепь).

Соединение приборов называется *последовательным*, если ток из первого прибора переходит во второй, из второго — в третий и т. д. (рис. 326). Соединение приборов называется *параллельным*,

если ток разветвляется на несколько отдельных токов, проходящих по приборам, после чего снова сливается в один (рис. 327).

Группа последовательно соединенных приборов называется *цепью*. Группа параллельно соединенных приборов называется *сетью* (осветительная сеть, телефонная сеть и т. п.).

§ 245. Соединение «на землю». Иногда в электрических установках в целях экономии не делают на линии обратных проводов. Вместо этого концы проводов соединяют с «землей», т. е. присоединяют к металлическим пластинам, зарытым в землю, или к трубам водопровода. При таком соединении положительный заряд в одном месте (рис. 328, справа) стекает в землю; в другом месте (слева) положительный заряд из земли поступает в цепь.

Если электрические установки располагаются на металлических опорах, например на автомобильных моторах, все обратные

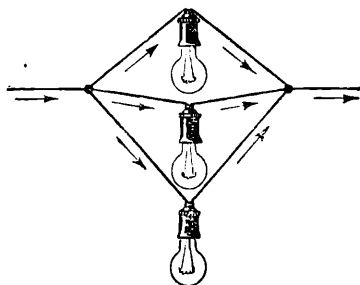


Рис. 327. Параллельное соединение ламп (сеть).

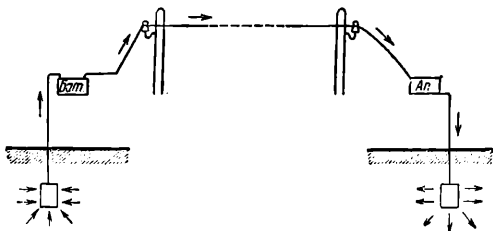


Рис. 328. Электрическая цепь, в которой один из проводов заменен соединением «на землю».

провода присоединяют к корпусу мотора или к любой другой части, не изолированной от корпуса. Это называется соединением «на массу».

У п р а ж н е н и е

334. Почему при соединении «на землю» нужно пластины закапывать во влажный слой почвы (зарывание их в сухой песок является недостаточным)?

§ 246. Условные обозначения. Современные электрические установки часто состоят из такого большого количества частей, что словесное описание соединений в них заняло бы слишком много

времени. Во избежание этого чертят с х е м ы, наглядно показывающие, как соединены части установки, пользуясь условными обозначениями. Некоторые из последних показаны на рис. 329.

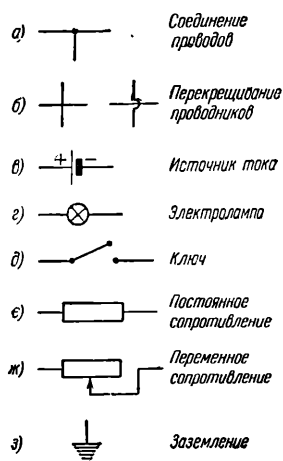


Рис. 329. Условные обозначения на электрических схемах.

§ 247. Величина тока. Мы уже знаем, что судить о количестве электричества, протекающего по цепи, можно, определяя количество серебра или другого вещества, выделившегося при электролизе. Напомним, что за единицу количества электричества принимается кулон (§ 218). Однако обычно интересуются не общим количеством электричества, прошедшего через прибор, а величиной тока. Током в проводе называется отношение количества электричества, прошедшего через поперечное сечение провода, к отрезку времени, в течение которого оно прошло. Как указывалось в § 218, единицей тока является ампер. Ампер есть ток, при котором за 1 сек переносится 1 к.

Напомним, что в системе единиц СИ ампер есть четвертая основная единица и что его определение основано на взаимодействии токов. Кроме того, зная, что при прохождении 1 к по раствору азотнокислого серебра выделяется 1,118 мг серебра, мы можем определить ампер еще так: ампер есть ток, при котором из раствора азотнокислого серебра выделяется в течение 1 сек 1,118 мг серебра.

Единица тока в системе СГСЭ малоупотребительна, и мы ее не будем рассматривать.

Обозначив ток через I , количество протекшего электричества через q и время через t , получим формулу

$$I = \frac{q}{t}.$$

Отсюда

$$q = It.$$

§ 248. Токи при последовательном и при параллельном соединениях приборов. Измерить ток, определяя количество электричества, как это было указано в § 218, т. е. взвешивая пластинку, на которой выделяется серебро, кропотливо и не всегда возможно. Поэтому для измерения тока обычно пользуются стрелочным прибором, называемым амперметром. Устройство амперметра основано на магнитном действии тока.

На рис. 330 показано, как надо включить амперметр, чтобы измерить ток в каком-либо приборе, например в лампочке. Видно, что амперметр включается последовательно с лампочкой.

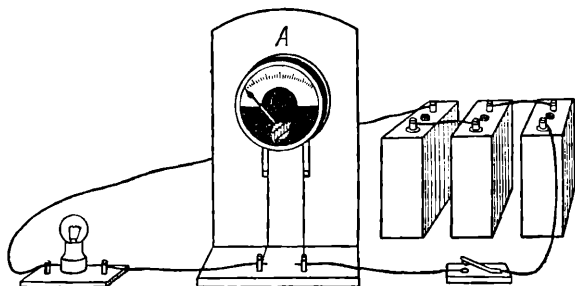


Рис. 330. Включение амперметра для измерения тока в цепи.

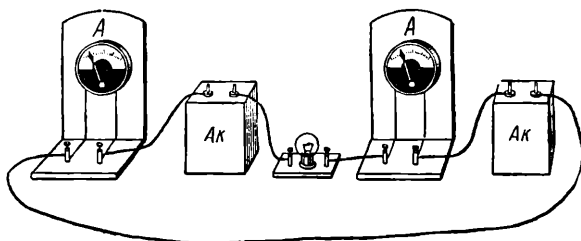


Рис. 331. Амперметры, включенные в разных местах цепи, показывают один и тот же ток.

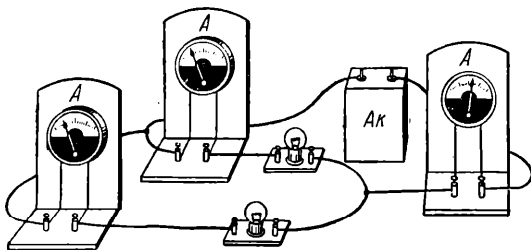


Рис. 332. Амперметр, включенный до разветвления (справа), показывает ток, равный сумме токов в каждой из лампочек, показываемых двумя другими амперметрами.

Соединим несколько приборов последовательно и включим между ними, как показано на рис. 331, несколько амперметров. Все амперметры дадут одинаковые показания. Это и понятно. Раз нет

разветвлений в цепи, количество электричества, выходящего из прибора или провода, должно равняться количеству входящего в них электричества. Итак, в *последовательно соединенных приборах идет ток одной и той же величины.*

Как обстоит дело при параллельно соединенных приборах? Соединим две разные лампочки параллельно и будем измерять токи порознь в каждой из них и в цепи до или после разветвления (рис. 332). Оказывается, что *сумма токов в сети приборов равна току в цепи до и после ее разветвления.*

Если, например, в двух параллельно соединенных лампочках идут токи $2a$ и $0,5a$, то в проводах до и после разветвления ток составит $2a + 0,5a = 2,5a$.

§ 249. Закон Ома. Легко убедиться, что ток в проводах или в приборах зависит от напряжения, под которым они находятся. Если, например, батарейка карманного фонаря отработана и напряжение, под которым находится лампочка, низко, то лампочка

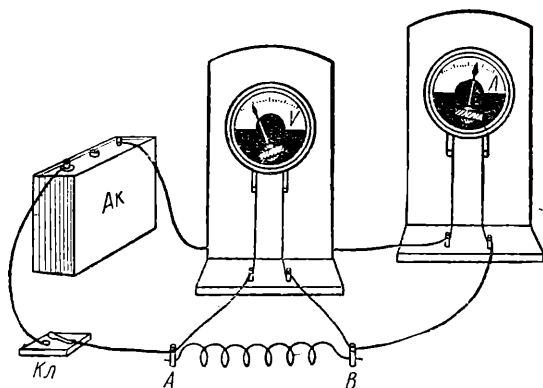


Рис. 333. Измерение тока в проводе AB и напряжения между точками A и B .

светит плохо или не светит вовсе: через нее идет слишком слабый ток. Поставив новую батарейку, дающую достаточное напряжение, мы получим более сильный ток, и лампочка будет светить ярко.

Чтобы исследовать точнее зависимость между током и напряжением, произведем измерения. Соединим железный или никелиновый провод последовательно с амперметром, а параллельно проводу присоединим вольтметр (рис. 333). Включим в цепь сперва один аккумулятор, затем два, три и т. д., изменяя таким образом напряжение. Если температура провода при пропускании тока заметно не изменяется, то увеличению напряжения в несколько раз

(например, вдвое) соответствует увеличению тока во столько же раз (вдвое).

Итак, ток в проводе пропорционален напряжению между концами провода (з а к о н О м а).

На рис. 334 показан типичный график зависимости тока в проводнике от напряжения между его концами.

Отметим, что закон Ома очень точно оправдывается для металлических проводников и растворов кислот и солей, но плохо — в полупроводниках и изоляторах. В газах закон Ома, вообще говоря, не имеет места.

У п р а ж н е н и е

335. Если напряжение между концами провода равно 2 в, то по проводу идет ток 5 а. Какое требуется напряжение, чтобы по тому же проводу шел ток 7 а?

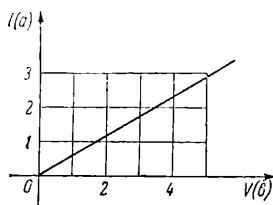


Рис. 334. График закона Ома.

§ 250. Сопротивление проводников.

Из закона Ома следует, что, если только не меняется температура, отношение напряжения между концами провода к идущему по нему току есть величина постоянная для данного провода (не меняющаяся при изменении тока в нем). Но для разных проводов это отношение оказывается различным. Действительно, по длинному и тонкому никелиновому проводу при определенном напряжении пойдет значительно более слабый ток, чем при таком же напряжении — по короткому и толстому медному проводу. Отсюда ясно, что отношение напряжения к току в проводе есть величина, характеризующая электрические свойства провода (или прибора, внутри которого идет ток). Эта величина называется с о п р о т и в л е н и е м провода или прибора.

Единица сопротивления называется о м о м (обозначается *ом*). 1 *ом* есть сопротивление такого провода, в котором при напряжении 1 в идет ток 1 а. Международным соглашением указан способ осуществления этой единицы: 1 *ом* равен сопротивлению ртутного столба длиной 106,3 см с площадью поперечного сечения 1 мм² при температуре 0° С; 10³ *ом* называется килоомом, 10⁶ *ом* — мегаомом.

Обозначив сопротивление R , силу тока I и напряжение U , можем написать:

$$R = \frac{U}{I}.$$

Значит, чтобы найти сопротивление какого-нибудь провода или прибора, надо знать идущий по нему ток и напряжение между его концами. Для измерения этих величин можно воспользоваться, например, установкой, показанной на рис. 333.

Если, скажем, при токе 2 а между концами провода имеется напряжение 10 в , то сопротивление провода равно

$$R = \frac{10 \text{ в}}{2 \text{ а}} = 5 \text{ ом}.$$

Из формулы $R = \frac{U}{I}$ следует:

$$I = \frac{U}{R},$$

т. е. ток в проводнике равен напряжению между концами проводника, деленному на его сопротивление.

У п р а ж н е н и я

336. Рассчитайте ток, если сопротивление провода равно 600 ом , а напряжение 3 в .

337. Какое сопротивление должны иметь провода, подводящие ток от станции к месту потребления энергии, если станция дает 220 в , допустимая потеря напряжения в проводах равна 10% от всего напряжения, а наибольшая нагрузка 10 а ?

338. Какое напряжение нужно приложить, чтобы получить ток $0,003 \text{ а}$ в проводе сопротивлением 2000 ом ?

339. Станция дает 240 в . К потребителю ток подводится по проводам сопротивлением 8 ом . Нагрузка проводов 3 а . Каково напряжение у потребителя?

340. Напряжение на станции 130 в . Сопротивление проводки от станции к потребителю равно $1,8 \text{ ом}$. Потребитель берет ток для питания ламп 5 а . Каково напряжение у него? Насколько упадет напряжение у потребителя, если он включит, кроме ламп, еще мотор, потребляющий ток 10 а ?

341. Для питания электрической дуги киноаппарата нужен ток 8 а при напряжении на углях дуги 50 в . Реостат с каким сопротивлением надо соединить последовательно с дугой, чтобы ее можно было включить в сеть напряжением 220 в ? Начертите схему включения.

§ 251. Расчет сопротивления проводов. Удельное сопротивление. Измеряя сопротивления различных проводов, легко обнаружить, что оно зависит от материала, из которого сделан провод, пропорционально его длине и обратно пропорционально площади поперечного сечения провода. Интересно отметить, что форма сечения не имеет значения: провод круглого сечения и провод в виде ленты прямоугольного сечения такой же площади имеют при одинаковых материале и длине равные сопротивления.

Обозначив длину провода через l , а площадь поперечного сечения через S , можем написать:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ («ро») обозначает величину, характеризующую электрические свойства материала и называемую его удельным сопротивлением. Удельное сопротивление материала есть сопро-

тивление провода, сделанного из этого материала и имеющего единичные длину и площадь сечения.

В системе единиц СИ единицей длины служит m , а единицей площади — m^2 . Удельное сопротивление в этой системе единиц выражается в о \cdot м \cdot м (обозначается $ом \cdot м$).

Иногда удельные сопротивления веществ выражают в о \cdot м \cdot сантиметрах (обозначается $ом \cdot см$); в таком случае при вычислении сопротивления провода нужно длину его выражать в $см$, а площадь сечения — в $см^2$; $1 \text{ } ом \cdot м = 100 \text{ } ом \cdot см$.

Удельные сопротивления разных веществ весьма различны: у металлов ρ составляют стотысячные доли $ом \cdot м$, у изоляторов — миллионы $ом \cdot м$; промежуточное положение между ними занимают электролиты и полупроводники.

Отметим, что удельные сопротивления веществ сильно зависят от примесей. Примеси увеличивают удельные сопротивления у металлов и уменьшают их у полупроводников и изоляторов. Приведем данные об удельных сопротивлениях некоторых металлов технической чистоты (в $10^{-8} \text{ } ом \cdot м$):

Медь	1,8	Свинец	20
Вольфрам	5	Латунь	8
Алюминий	3	Никелин	40
Железо	12	Константан	50

Приведем пример расчета сопротивления провода. Требуется вычислить сопротивление медного провода длиной 5 км и площадью сечения 30 мм². Имеем:

$$\rho = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ } ом \cdot м,$$

$$l = 5 \text{ км} = 5 \cdot 10^3 \text{ м},$$

$$S = 30 \text{ мм}^2 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Произведем расчет, выразив все данные в системе единиц СИ:

$$R = \frac{1,8 \cdot 10^{-8} \cdot 5 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^{-6}} \text{ } ом = 3 \text{ } ом.$$

Тот же результат получится и при выражении ρ в $ом \cdot см$, l — в $см$ и S — в $см^2$.

Чем меньше сопротивление проводника, тем лучше он проводит электрический ток. Поэтому величина, обратная сопротивлению, т. е. $\frac{1}{R}$, называется п р о в о д и м о с т ь ю проводника. Единица измерения проводимости — сименс ($сим$) = $1/ом$. Величина, обратная удельному сопротивлению, называется удельной проводимостью γ .

У п р а ж н е н и я

342. Определите удельное сопротивление материала, зная, что провод длиной 250 см и площадью поперечного сечения $0,02 \text{ см}^2$ имеет сопротивление $0,35 \text{ ом}$.

343. Проводка имеет длину 300 м. Каково ее сопротивление, если она выполнена из медного провода сечением 10 мм^2 ? Какое сечение должен иметь железный провод, чтобы получить то же сопротивление проводки?

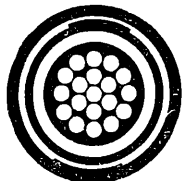


Рис. 335. Кабель.

Медные провода (сердцевина) кабеля окружены: 1) изоляцией (показана черным); 2) для предохранения от сырости — свинцовой оболочкой (показана белым); 3) еще раз изоляцией; 4) для предохранения от механических повреждений — двойной стальной оболочкой (показана белым); 5) еще раз изоляцией.

344. Какова площадь сечения медного провода длиной 200 м, если его сопротивление равно $0,09 \text{ ом}$.

345. Какой длины никелиновую проволоку диаметром $0,3 \text{ мм}$ надо взять для реостата на 20 ом ?

346. В радиотехнике иногда пользуются керамическими сопротивлениями порядка миллиона ом (Мом). Какой длины медную проволоку сечением 1 мм^2 надо взять для сопротивления 10 Мом ?

347. Рассчитайте сопротивление кабеля (кабель — провод, предназначенный для прокладки под землей или водой, рис. 335), если его длина 6 км и он свит из 19 медных проволок сечением 5 мм^2 каждая.

348. Протягиванием сквозь волочильный станок увеличили длину проволоки, имеющей сопротивление 1 ом , вдвое. Предполагая, что удельное сопротивление металла при протягивании не изменилось, определите новое сопротивление проволоки.

349. Сколько весит медная проволока, имеющая длину 2 км и сопротивление $0,6 \text{ ом}$?

§ 252. Причины различия сопротивлений веществ. Почему различные вещества по-разному

проводят электрический ток? Чем отличается внутреннее строение веществ, хорошо проводящих ток, от строения изоляторов?

Способность веществ проводить ток связана с двумя обстоятельствами. Во-первых, она зависит от того, сколько в 1 см^3 вещества имеется частиц, переносящих заряды, — электронов или ионов. Эта величина называется **концентрацией носителей зарядов**. Во-вторых, она зависит от подвижности носителей зарядов, т. е. от того, с какой скоростью носители перемещаются при напряженности поля, равной $1 \frac{\text{в}}{\text{м}}$.

Чем больше концентрация носителей и чем они подвижнее, тем меньше сопротивление вещества. В металлах концентрация носителей (свободных электронов) очень велика: примерно на один атом металла приходится один свободный электрон. В электролитах концентрация носителей — положительных и отрицательных ионов — во много раз меньше концентрации электронов — носителей в металлах. Кроме того, подвижность электронов в металлах (в особенности, в чистых металлах, кристаллическая решетка которых не искажена атомами примесей) во много раз больше подвижности ионов в электролитах. Поэтому удельное сопротивление металлов

значительно меньше, чем электролитов. В изоляторах носители зарядов либо отсутствуют (нет ни свободных электронов, ни ионов), либо подвижность носителей (ионов) близка к нулю.

Если наличие тока в веществе не вызывает изменений ни в концентрации носителей, ни в их подвижности, то удельное сопротивление вещества, а следовательно, и сопротивление проводника, не зависит от тока. В этом случае закон Ома хорошо оправдывается. Примерами таких веществ являются, как мы видели, металлы и электролиты. Газы являются примером веществ, в которых наличие тока может вызывать изменение концентрации носителей зарядов, поэтому закон Ома к ним часто неприменим.

§ 253. Зависимость сопротивления от температуры. Если нагревать металлическую проволоку, по которой идет ток, то он уменьшится. Значит, *сопротивление металлов при нагревании увеличивается*. Это обстоятельство приходится принимать во внимание при расчете обмоток электрических печей, утюгов, волосков ламп и т. п. Например, сопротивление волоска электролампы в накаливаемом состоянии в 12—16 раз больше сопротивления его в холодном состоянии. Сопротивление угля, растворов солей и кислот, наоборот, при повышении температуры уменьшается. Уменьшается при нагревании сопротивление стекла, фарфора и других изоляторов, в том числе газов.

Измеряя сопротивление проводников при различных температурах, можно обнаружить, что относительное изменение сопротивления проводника приблизительно пропорционально изменению его температуры. Обозначим сопротивления проводника при 0°C и при температуре t через R_0 и R_t ; тогда абсолютное изменение сопротивления равно $R_t - R_0$, а относительное равно

$$\frac{R_t - R_0}{R_0}.$$

На основании сказанного можно написать:

$$\frac{R_t - R_0}{R_0} = \alpha t,$$

где α есть коэффициент пропорциональности, различный для разных веществ. Он называется температурным коэффициентом сопротивления и выражается, как и все температурные коэффициенты, в град^{-1} .

У металлов при повышении температуры сопротивление увеличивается; поэтому для них температурный коэффициент сопротивления положителен. Для угля, для растворов кислот и солей, а также для полупроводников коэффициент α отрицателен. Можно записать формулу для расчета сопротивления проводника, следующую из вышенаписанной:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t),$$

где R_0 — сопротивление при 0°C . Необходимо иметь в виду, что эта формула является приближенной, и при очень больших разностях температур $t - t_0$ ею пользоваться нельзя.

Приведем значения температурных коэффициентов сопротивления некоторых веществ (в град^{-1}):

Медь	0,0043	Константан	0,00004
Железо	0,0062	Уголь	-0,0008
Вольфрам	0,0051		

Зная, насколько изменилось при нагревании сопротивление проводника, можно судить о его температуре. На этом основан один из способов электрического измерения температур (термометры сопротивления).

Увеличение сопротивления металлов при нагревании объясняется тем, что тепловое движение ионов вызывает нарушение правильности их расположения в кристаллической решетке (§ 252), а это затрудняет направленное движение (ток) электронов в куске металла. В случаях других веществ повышение температуры ведет к увеличению концентрации носителей (например, ионов) или к уменьшению вязкости среды, в которой движутся носители, что увеличивает подвижность носителей. У некоторых металлов (ртуть, свинец и др.) при температурах, близких к абсолютному нулю, сопротивление падает до неизмеримо малого значения. Это явление называется **сверхпроводимостью**.

В настоящее время ведутся усиленные поиски веществ, которые согласно последним теоретическим гипотезам могут обладать свойством сверхпроводимости при комнатной температуре.

У п р а ж н е н и я

350. В первый момент включения электролампы в ней идет ток, значительно более сильный, чем потом. Почему?

351. Сопротивление одной из медных обмоток трансформатора при температуре 20°C перед включением трансформатора было $0,82 \text{ ом}$, а после

работы $0,98 \text{ ом}$. Какова температура трансформатора после работы?

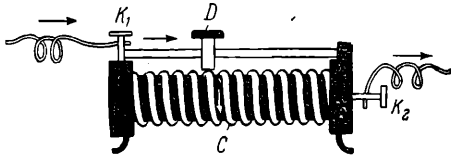


Рис. 336. Лабораторный реостат.

Ток идет от клеммы K_1 до движка D по толстому медному стержню сверху; от движка до клеммы K_2 — по виткам тонкой проволоки с большим сопротивлением, навитой на изолирующий цилиндр C . Перемещая движок, заставляют ток проходить через большее или меньшее число витков проволоки.

§ 254. Реостаты. Для регулирования величины тока в цепь включают приборы, сопротивление которых можно менять, — **реостаты**. На рис. 336 изображен реостат лабораторного типа. Изменение его сопротивления достигается

изменением числа витков проволоки, через которые проходит ток.

На рис. 337 представлен рычажный реостат, а на рис. 338 — жидкостный реостат.

Чтобы проволочные реостаты не были громоздкими и меньше изменяли сопротивление при нагревании, их изготавливают из

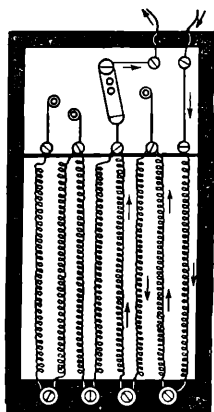


Рис. 337. Рычажный реостат.

Перевод контактной рукоятки включает разное число проволочных секций.

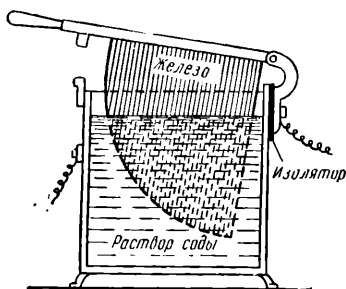


Рис. 338. Жидкостный реостат.

Сопротивление реостата зависит от площади железной пластины, погруженной в раствор соды.

специальных сплавов с большим удельным сопротивлением и малым его температурным коэффициентом. Чтобы избежать сильного нагрева реостатов во время работы, им придают форму, обеспечивающую хороший теплообмен с окружающей средой.

Упражнение

352. Увеличится или уменьшится ток в цепи, если повернуть влево ручку реостата на рис. 337?

§ 255. Распределение напряжения в цепи. Согласно закону Ома напряжение распределяется по разным участкам цепи неодинаково. Чем больше сопротивление участка цепи, тем большая часть полного напряжения приходится на него.

Это видно из следующего опыта. Ток идет по трем последовательно соединенным проволокам одинаковой длины: толстой железной, такой же толщины никелиновой и тонкой никелиновой (рис. 339). Три вольтметра измеряют напряжения, приходящиеся на отдельные проволоки. Видно, что, вообще, напряжение распределяется на проволоках *не поровну*. Железо проводит электричество

значительно лучше никелина. Поэтому на железную проволоку приходится меньшее напряжение, чем на никелиновую проволоку

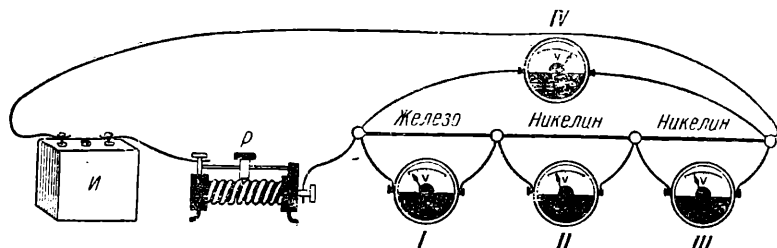


Рис. 339. Вольтметры I, II, III, присоединенные к разным проволокам, по которым идет один и тот же ток, показывают разное напряжение. Вольтметр IV показывает общее напряжение на всех трех проволоках.

той же толщины; наибольшее напряжение приходится на тонкую никелиновую проволоку, имеющую наибольшее сопротивление.

У п р а ж н е н и е

353. В осветительную сеть (220 в) включены последовательно две лампы. Какое напряжение приходится на каждую лампу, если а) сопротивление их одинаково; б) сопротивление первой в 2 раза больше, чем второй? Какая лампа будет гореть ярче?

§ 256. **Сопротивление цепи.** Чему равно сопротивление цепи последовательно соединенных приборов? Обратим внимание на вольтметр IV в опыте, изображенном на рис. 339. Он показывает сумму напряжений на отдельных участках цепи $U = U_1 + U_2 + U_3$. Значит, сопротивление всей цепи равно

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \frac{U_3}{I} = R_1 + R_2 + R_3.$$

Итак, *сопротивление цепи последовательно соединенных приборов равно сумме их сопротивлений.*

В частном случае, когда имеются n последовательно соединенных одинаковых сопротивлений R_0 , сопротивление цепи равно

$$R = nR_0.$$

§ 257. **Сопротивление сети.** Мы видели (§ 248), что при параллельном соединении приборов полный ток I равен сумме токов в отдельных приборах:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

Все приборы находятся под одним и тем же напряжением U . Обозначая сопротивление сети параллельно соединенных приборов через R , мы можем на основании закона Ома написать:

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} + \dots,$$

откуда

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

Как видно, *обратная величина сопротивления сети равна сумме обратных величин сопротивлений отдельных приборов*. Отсюда следует, что сопротивление сети меньше сопротивления любого из входящих в нее приборов.

В частном случае, когда имеются n одинаковых параллельно соединенных сопротивлений R_0 , сопротивление сети равно

$$R = \frac{R_0}{n}.$$

Пользуясь понятием проводимости (§ 251), мы можем только что полученный результат выразить так: *проводимость сети равна сумме проводимостей всех проводников в ней*.

У п р а ж н е н и я

354. Каково сопротивление сети из 20 одинаковых ламп, если сопротивление одной лампы равно 300 ом?

355. На рис. 340 изображен ламповый реостат, в котором регулирование тока достигается включением и выключением ламп. В реостате включены 2 лампы. Как изменится сопротивление, если включить еще 3 лампы?

356. Какое сопротивление надо включить параллельно прибору сопротивлением 6 ом, чтобы получить сопротивление 2 ом?

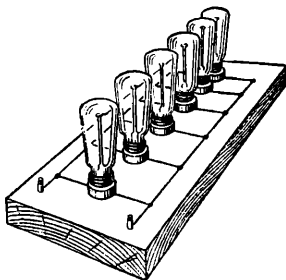
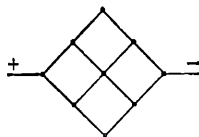
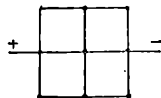


Рис. 340.



а)



б)

Рис. 341.

357. На рис. 341, а, б показаны два способа включения проволочной сетки в цепь. При каком способе включения сопротивление сетки больше? Во сколько раз?

§ 258. Определение сопротивления при помощи мостика Уитстона. Рассмотренные выше закономерности распределения напряжений и токов в цепях и сетях положены в основу наиболее

точного способа измерения сопротивления при помощи схемы, называемой «мостиком Уитстона».

Принципиальная схема опыта изображена на рис. 342. В разветвленной цепи (рис. 342, а) при прохождении тока по ветвям ACB и ADB происходит падение потенциала пропорционально сопротивлениям соответствующих участков. Ясно, что при одинаковом падении потенциала от A до B на той и другой ветви должны находиться точки, имеющие одинаковый потенциал. Так, например, для точки D на ветви ADB должна находиться где-то точка с таким же потенциалом и на ветви ACB . Пусть это будет точка C . Если теперь соединить (рис. 342, б) точки C и D «мостиком» с гальванометром Γ , мы увидим, что стрелка гальванометра будет стоять на нуле. Точки C и D имеют равные потенциалы, а если нет разности потенциалов, то нет и тока.

Равенство потенциалов в точках C и D будет при соблюдении следующей пропорции:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4}.$$

Если одно из четырех сопротивлений неизвестно, то его легко определить решением этой пропорции. Например, при $r_1 = x$

$$x = \frac{r_2 \cdot r_3}{r_4}.$$

Отношение $r_3 : r_4$ можно заменить отношением длин участков $l_1 : l_2$, если ветвь AB представляет собой проволоку с постоянным по всей длине поперечным сечением. Тогда

$$x = \frac{r_2 l_1}{l_2}.$$

§ 259. Лабораторная работа № 13. Определение сопротивления проводника мостиком Уитстона.

Цель работы. Ознакомление с методом определения сопротивлений.

Принадлежности. Реохорд с движком, гальванометр стрелочный, магазин сопротивлений, ключ, батарея аккумуляторов или элементов (4 в).

Выполнение работы. Монтажная схема опыта показана на рис. 343. В качестве неизвестного сопротивления удобно взять катушку разборного трансформатора на 120 в. Найденное в данной работе сопротивление катушки можно тогда будет использовать в одной из дальнейших работ по переменному току.

Выбрав сопротивление магазина приблизительно равным неизвестному сопротивлению (при среднем положении движка стрелка гальванометра не намного отклоняется от нуля), включаем ток.

Передвигаем движок вправо или влево до тех пор, пока стрелка гальванометра не будет стоять на нуле. Результаты записываем в таблицу.

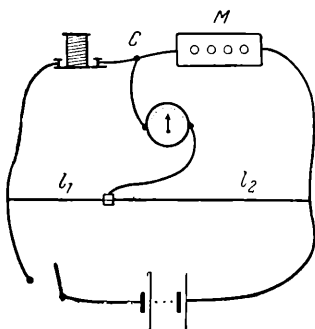


Рис. 343. Монтажная схема мостика Уитстона.

№ опыта	$R_{\text{магазина}}$	l_1	l_2	R_x
1				
2				
3				

Хорошим вариантом работы может быть определение термического коэффициента сопротивления металла при помощи прибора, выпускаемого промышленностью. Работа описана в книге «Практикум по физике» под ред. А. А. Покровского (Учпедгиз, 1963).

§ 260. Сопротивление амперметра и вольтметра. Мы видели (§ 248), что амперметр включается в цепь последовательно. Чтобы включение амперметра как можно меньше ослабляло ток, его сопротивление должно быть минимальным (доли ома). Чем больше цена деления амперметра, тем меньше должно быть его сопротивление.

Наоборот, вольтметр включают в цепь параллельно. Чтобы включение вольтметра как можно меньше изменяло напряжение, ток через него должен быть очень слабым. Поэтому сопротивление вольтметра делают очень большим (сотни или тысячи омов). Чем больше цена деления вольтметра, тем больше должно быть его сопротивление.

У п р а ж н е н и я

358. Почему нельзя включать амперметр параллельно цепи?

359. Что показывают измерительные приборы на схемах рис. 275, а и б?

360. Что покажут приборы, изображенные на рис. 344, а и б, если их поменять местами?

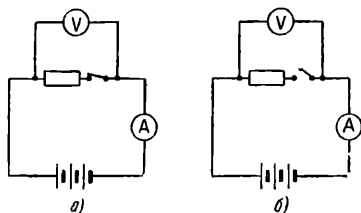


Рис. 344.

§ 261. Электродвижущая сила. Мы знаем уже (§ 243), что внутри источника тока заряды движутся в направлении, противоположном тому, в котором действует на них электрическое поле. Мы можем представить себе, что это движение вызы-

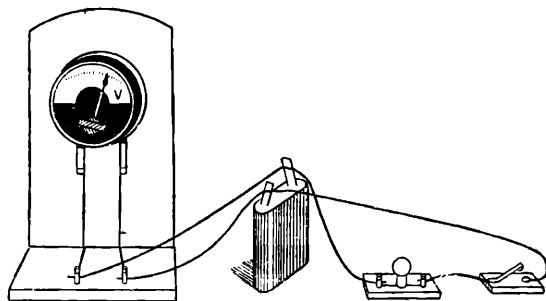
вается какими-то силами неэлектрического происхождения (с т о р о н н и м и с и л а м и). Сторонние силы производят при движении зарядов работу. Отношение работы сторонних сил внутри источника тока к величине прошедшего по нему заряда называется э л е к т р о д в и ж у щ е й с и л о й источника тока (сокращенно эдс). Очевидно, что эдс источника тока указывает работу сторонних сил при прохождении 1 кулона.

Напомним, что отношение работы электрических сил, действующих на участке цепи, к величине заряда, прошедшего по цепи, есть напряжение на этом участке. Так как и напряжение, и эдс есть отношение работы к заряду, то единицами эдс могут служить единицы напряжения. Обычно эдс источника тока выражается в вольтах. Например, говоря, что эдс аккумулятора равна 2 вольта, мы утверждаем, что работа сторонних сил внутри аккумулятора при прохождении по цепи 1 кулона равна 2 джоулям.

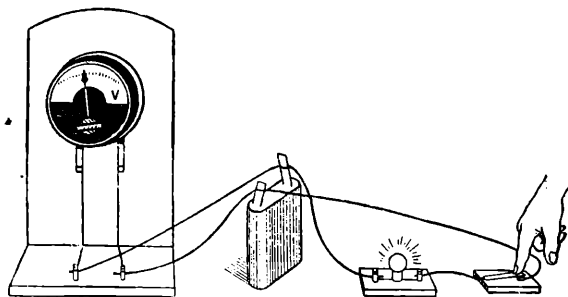
Результатом работы сторонних сил внутри источника тока является, во-первых, создание электрического поля во всех проводниках, составляющих внешнюю часть цепи; это — полезная часть работы сторонних сил, так как именно наличие электрического поля в проводниках и есть условие существования тока. Во-вторых, внутренняя энергия источника тока несколько увеличивается: он нагревается по той же причине, по которой греется любой проводник, когда по нему идет ток; это — бесполезная часть работы сторонних сил, и ее желательно по возможности уменьшить. Далее мы увидим, что для уменьшения нагревания источника тока нужно по возможности уменьшать его внутреннее сопротивление.

§ 262. Измерение эдс источника тока. Присоединим вольтметр к полюсам батарейки для карманного фонаря (рис. 345). Пока лампочка не включена, вольтметр показывает около 4 в (рис. 345, а).

Теперь включим лампочку от карманного фонаря, замкнув ключ (рис. 345, б). Вольтметр покажет меньше, около 3 в. Выключим лампочку; стрелка вольтметра вернется в прежнее положение. Если вместо одной включить параллельно две лампочки, то вольтметр покажет еще меньшее напряжение, а лампочки будут гореть значительно тусклее, чем одна.



а)



б)

Рис. 345. а) Лампочка выключена, вольтметр показывает 4 в; б) лампочка включена, вольтметр показывает 3 в.

Таким образом, не дающий тока — не нагруженный — источник тока создает *большее* напряжение, чем нагруженный. Это и понятно. Если в цепи нет тока, работа сторонних сил внутри источника тока связана только с созданием напряжения между полюсами источника. Поэтому *при отсутствии тока напряжение между полюсами источника тока равно его эдс*. Если же по цепи идет ток, то работа сторонних сил внутри источника делится на две части: во-первых, производится работа по преодолению сопротивления при движении заряженных частиц внутри источника; во-вторых, совершается

работа по созданию напряжения во внешней цепи. Иными словами, при нагруженном источнике напряжение во внешней цепи создается за счет не всей работы сторонних сил, а только части ее. Поэтому при нагруженном источнике тока напряжение во внешней цепи меньше эдс источника.

В рассмотренном опыте эдс батарейки равна напряжению в цепи при отсутствии тока в лампочке. Отметим, что это не совсем точно, так как некоторый ток идет и по вольтметру. Но вольтметр обычно обладает столь большим сопротивлением, что проходящим по нему током можно пренебречь.

Итак, чтобы определить эдс источника тока, надо измерить напряжение, которое он дает при отсутствии нагрузки (рис. 345, а).

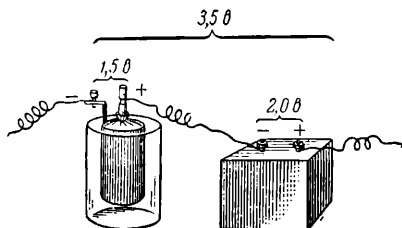


Рис. 346. Согласно включение источников тока.

§ 263. Последовательное соединение источников тока.

Часто гальванические эле-

менты и аккумуляторы, а также и другие источники тока соединяют в батареи. На рис. 346 показано последовательное соединение гальванического элемента, эдс которого равна 1,5 в, и элемента, эдс которого равна 2 в, причем положительный полюс первого соединен с отрицательным полюсом второго. Такое соединение называется с о г л а с н ы м, так как при работе батареи в обоих элементах положительный заряд движется от «минуса» к «плюсу». Измерив эдс такой батареи, найдем, что она равна 3,5 в, т. е. сумме эдс элементов. Это является следствием закона сохранения энергии. При перемещении зарядов к работе первого источника тока добавляется работа второго.

Итак, при согласно включении источников тока общая эдс равна сумме эдс отдельных источников тока.

Иное получится, если элементы соединены последовательно, но положительный полюс первого элемента соединен с положительным полюсом второго (встречное включение) (рис. 347). В этом случае эдс батареи равна 0,5 в, т. е. разности эдс элементов (в случае двух одинаковых элементов — равна нулю). Легко понять, почему это так. В элементе с меньшей эдс ток идет не от минуса

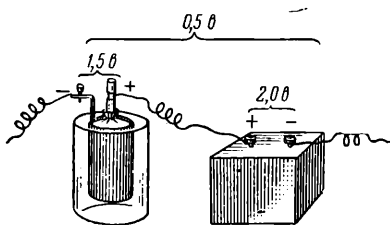


Рис. 347. Встречное включение источников тока.

к плюсу, а от плюса к минусу. Другими словами, этот элемент играет роль не источника тока, а потребителя энергии первого элемента.

Необходимо отметить, что, соединяя источники тока последовательно, мы увеличиваем внутреннее сопротивление. Например, собрав батарею из пяти гальванических элементов, эдс и внутренние сопротивления которых равны $1,5 \text{ в}$ и $0,4 \text{ ом}$, получим эдс $7,5 \text{ в}$ и внутреннее сопротивление 2 ом .

§ 264. Параллельное соединение источников тока. Если одинаковые источники тока (например, гальванические элементы) соединить параллельно (рис. 348), то легко убедиться измерением, что это не дает выигрыша: эдс такой батареи такова же, как и эдс одного элемента. Однако пользование батареей параллельно соединенных источников тока иногда выгодно. Во-первых, часто источники тока не могут в силу своего устройства дать ток больше некоторой предельной величины, так как перегрузка ведет к их порче. Соединив несколько источников параллельно, можно от такой батареи брать больший ток, чем от одного элемента. Во-вторых, имеет значение уменьшение внутреннего сопротивления батареи при параллельном соединении. Это особенно важно, если сопротивление внешней части цепи невелико и получению тока нужной величины мешает именно внутреннее сопротивление.

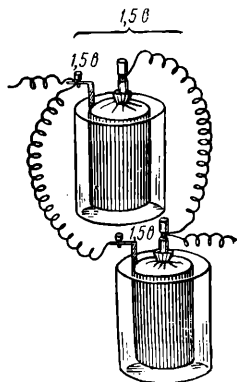


Рис. 348. Параллельное включение источников тока.

У п р а ж н е н и я

361. Для стартеров автомобилей требуется ток, величина которого превышает допустимую для установленных на автомобиле аккумуляторов величину. Как следует включать аккумуляторы на автомобиле при пуске двигателя?

362. Имеются три гальванических элемента с эдс $1,5 \text{ в}$ и внутренним сопротивлением $0,3 \text{ ом}$ каждый. Определите эдс и внутреннее сопротивление батареи в следующих случаях: а) элементы включены согласно; б) два элемента включены согласно, третий элемент — встречно; в) элементы соединены параллельно.

§ 265. Закон Ома для участка цепи, включающего источник электрической энергии. Мы уже знаем, что на участке цепи, не включающем источника, ток равен

$$I = \frac{U}{R},$$

где R — сумма сопротивлений этого участка, а U — напряжение, т. е. работа электрических сил при перенесении по нему 1 кулона. В случае наличия на участке цепи источника тока к работе электрических сил надо добавить работу сторонних сил, действующих внутри источника тока, которую мы назвали электродвижущей силой источника тока (§ 261). Таким образом, при наличии на участке цепи источника тока работа по перемещению 1 кулона состоит из двух слагаемых: напряжения (работы электрических сил) и эдс (работы сторонних сил). Обозначив эдс источника тока E , мы найдем, что при перемещении 1 кулона на участке цепи совершается работа $U + E$. Закон Ома теперь выражается следующей формулой:

$$I = \frac{U + E}{R},$$

где R — сумма всех сопротивлений, включая внутреннее сопротивление источника тока.

Ток на участке цепи, включающей источник тока, равен сумме напряжения между концами участка и эдс источника тока, деленной на общее сопротивление участка.

Так как на любом участке цепи всегда производится работа по преодолению сопротивления участка, то сумма $U + E$ всегда положительна. Но одно из слагаемых может быть и отрицательным. Это ясно из следующих примеров.

1. Пусть производится зарядка аккумулятора с эдс, равной 2 в. Как мы увидим далее, при зарядке аккумулятора он должен быть включен *встречно* по отношению к питающему его источнику тока. Иными словами, в данном случае эдс источника тока есть отрицательная величина, $E = -2$ в. Пусть вольтметр, присоединенный параллельно аккумулятору, показывает 2,2 в, т. е. напряжение на участке положительно, $U = +2,2$ в. Каков ток, если внутреннее сопротивление аккумулятора равно 0,1 ом?

Пользуясь законом Ома, находим:

$$I = \frac{U + E}{R} = \frac{2,2 - 2}{0,1} \text{ а} = 2 \text{ а}.$$

2. Пусть тот же аккумулятор ($E = 2$ в, $R = 0,1$ ом) дает ток во внешнюю цепь (например, питает лампочку) и лампочка находится под напряжением 1,9 в. Это означает, что аккумулятор, внутри которого, в отличие от лампочки, ток идет от отрицательного полюса к положительному, находится под напряжением $U = -1,9$ в. Каков ток в аккумуляторе (или, что все равно, в цепи)? Пользуясь законом Ома, получаем:

$$I = \frac{U + E}{R} = \frac{-1,9 + 2}{0,1} \text{ а} = 1 \text{ а}.$$

У п р а ж н е н и я

363. По участку с сопротивлением 2 ом при напряжении 4 в идет ток $2,7 \text{ а}$. Имеется ли на этом участке источник тока, какова его эдс и как он включен (согласно или встречно по отношению к направлению тока)? Каким будет напряжение на этом участке, если ток увеличится в два раза?

364. Генератор заряжает батарею аккумуляторов с эдс 6 в и внутренним сопротивлением $0,06 \text{ ом}$. Зарядный ток равен 10 а . Что покажет вольтметр, присоединенный к клеммам батареи, во время зарядки?

§ 266. Напряжение во внешней части цепи. Мы видели (§ 262), что напряжение во внешней части замкнутой цепи, т. е. напряжение между положительным и отрицательным полюсами работающего источника тока, всегда меньше эдс источника тока. Выясним этот вопрос с количественной стороны. Обозначим напряжение во внешней части цепи U , напряжение, под которым находится источник тока, $U_{\text{и}}$. Согласно сказанному в конце § 231 сумма напряжений во внешней части цепи и на источнике тока равна нулю:

$$U + U_{\text{и}} = 0,$$

или

$$U_{\text{и}} = -U.$$

Применим формулу (§ 265)

$$I = \frac{U + E}{R}$$

к источнику тока. В нашем случае сопротивление рассматриваемого участка цепи R сводится к сопротивлению только источника тока r . Мы получим:

$$I = \frac{U_{\text{и}} + E}{r} = \frac{-U + E}{r}.$$

Отсюда

$$U = E - Ir.$$

Эта формула показывает, что *напряжение во внешней части цепи равно разности между эдс источника тока и произведением тока на сопротивление источника тока*. Рассмотрим пример. Сопротивление гальванического элемента равно $0,5 \text{ ом}$. Эдс равна $1,5 \text{ в}$. При токе 2 а напряжение во внешней части цепи равно

$$U = 1,5 \text{ в} - 2 \cdot 0,5 \text{ в} = 0,5 \text{ в}.$$

Приведенная формула показывает, что при отсутствии тока ($I = 0$) напряжение между положительным и отрицательным полюсами источника тока равно эдс источника (ср. § 261).

Из сказанного ясно значение сопротивления источника тока. Если сопротивление источника тока велико, то напряжение во внешней цепи при увеличении нагрузки сильно падает.

У п р а ж н е н и я

365. Когда напряжение в магистрали менее зависит от нагрузки электростанции: если на станции работает один генератор или два, включенные параллельно?

366. Источник тока, имеющий эдс 20 в и сопротивление 0,6 ом, дает 5 а. Каково напряжение во внешней цепи?

§ 267. Закон Ома для полной цепи. До сих пор мы рассматривали только отдельные участки электрической цепи. Теперь рассмотрим полную цепь. В этом случае концы нашего участка цепи сходятся в одну точку, и поэтому напряжение между ними равно нулю ($U = 0$), так как общая работа электрических сил при перемещении заряда по замкнутой кривой в исходную точку равна нулю (§ 231). Поэтому закон Ома для полной цепи выражается следующей формулой:

$$I = \frac{E}{R_{\text{общ}}},$$

где $R_{\text{общ}}$ — сумма всех сопротивлений, включая внутреннее сопротивление источника тока. Итак, ток равен сумме эдс всех источников тока в цепи, деленной на сопротивление полной цепи. Иногда через R обозначают сопротивление внешней цепи, а через r — внутреннее сопротивление. При таких обозначениях закон Ома для полной цепи выразится формулой

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

Рассмотрим пример. Каков ток в цепи, состоящей из батареи с эдс 5 в и внутренним сопротивлением 0,8 ом, проводов сопротивлением 0,2 ом и лампочки 9 ом? В данном случае $R_{\text{общ}} = 0,8 \text{ ом} + 0,2 \text{ ом} + 9 \text{ ом} = 10 \text{ ом}$. Ток равен

$$I = \frac{5}{10} \text{ а} = 0,5 \text{ а}.$$

Наибольший ток, который может дать источник, очевидно, получается при отсутствии внешнего сопротивления, т. е. при коротком замыкании.

У п р а ж н е н и я

367. Эдс элемента равна 1,5 в, внутреннее сопротивление его 0,8 ом. Какой получится ток, если сопротивление внешней цепи равно 2,2 ом?

368. Каково внутреннее сопротивление элемента, если его эдс равна 1,1 в и если при внешнем сопротивлении 3 ом ток равен 0,2 а?

369. Каков наибольший ток, который можно получить от гальванического элемента с эдс 1,5 в и внутренним сопротивлением 0,5 ом?

370. Эдс карманной батарейки равна 4,5 в; внутреннее сопротивление ее 1,5 ом, батарейка замкнута внешним сопротивлением 7,5 ом. Найдите напряжение на зажимах батарейки.

371. Найдите ток короткого замыкания 6-вольтового аккумулятора, внутреннее сопротивление которого равно $0,02 \text{ ом}$, и сравните с током короткого замыкания карманной батарейки в предыдущей задаче.

372. Два гальванических элемента с эдс $1,5 \text{ в}$ и $1,2 \text{ в}$ и внутренними сопротивлениями $0,2 \text{ ом}$ и 1 ом соединены согласно. Сопротивление внешней цепи $0,6 \text{ ом}$. Под какими напряжениями находятся клеммы первого и второго элементов? а) Каков физический смысл полученного результата? б) Как изменится ток, если второй элемент отключить от цепи?

§ 268. Лабораторная работа № 14. Определение эдс и внутреннего сопротивления элемента.

Значение работы. Работа способствует уяснению основных понятий учения об электрическом токе и роли величин, входящих в формулу закона Ома.

Принадлежности: батарея из трех элементов Лекланше (можно взять сухую батарею), вольтметр постоянного тока на $6-8 \text{ в}$, амперметр до 2 а с делениями на $0,1 \text{ а}$, магазин сопротивлений до 10 ом , ключ, провода.

Выполнение работы. Начертите схему и смонтируйте цепь из батарей, ключа и амперметра. К клеммам батареи подключите параллельно вольтметр. Определите эдс батареи при разомкнутом ключе. Беря последовательно внешнее сопротивление (магазина) $2, 3$ и т. д. ом , замыкайте цепь и измеряйте силу тока и напряжения на зажимах батареи. Результаты запишите в таблицу:

Опыт	E	R	I	U	r
1					
2					
3					

По формуле Ома вычислите внутреннее сопротивление батареи. Сравните величину эдс и напряжений на зажимах в отдельных опытах. Сделайте выводы из работы.

§ 269. Лабораторная работа № 15. Последовательное и параллельное соединения проводников *)

Значение работы. Привить учащимся навыки монтажа простейших цепей (последовательное соединение) и сетей (параллельное соединение) и ознакомить с распределением напряжений и токов в отдельных звеньях цепей и сетей.

Принадлежности. Две лампы разной мощности (100 вт и 150 вт), вольтметр переменного тока на местное напряжение сети, амперметр переменного тока до 5 а , провода.

*) Работа ставится факультативно при наличии времени.

Выполнение работы. 1. Последовательное соединение. Начертите схему и смонтируйте цепь последовательно соединенных ламп, включив в нее измерительные приборы (амперметр и вольтметр). Произведите измерение напряжения и тока как для каждой лампы, так и для группы ламп. Результаты запишите в таблицу:

	U	I	R
I лампа			
II лампа			
Группа ламп			

Сравните отношение напряжений $U_1 : U_2$ с отношением сопротивлений $R_2 : R_1$. Какой вывод можно из этого сделать?

2. Параллельное соединение. Начертите схему и смонтируйте сеть параллельно соединенных ламп. Произведите измерения тока и напряжения для каждой лампы и для группы ламп. Результаты запишите в таблицу:

	I	U	R	$\frac{1}{R}$
I лампа				
II лампа				
Группа ламп				

Сравните ток в магистрали и токи в отдельных ветвях. Сформулируйте выводы из работы. Обратите внимание на некоторое отличие сопротивлений ламп в первом и втором опыте (при разных токах). Чем оно объясняется?

Г Л А В А ХХ

РАБОТА И МОЩНОСТЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 270. Расчет работы и мощности тока. Мы уже знаем (§ 234), что работа электрических сил A определяется произведением напряжения между двумя точками цепи U на количество перенесенного электричества q :

$$A = Uq.$$

Но количество электричества q равно току I , умноженному на время его прохождения:

$$q = It.$$

Отсюда

$$A = UIt.$$

Работа тока на участке цепи равна произведению напряжения между концами участка на ток в нем и на время, в течение которого совершалась работа.

Теперь выведем формулу для расчета мощности тока. Вспомним, что мощностью (P) называется отношение работы к отрезку времени, в течение которого эта работа была произведена (§ 79). Следовательно,

$$P = \frac{A}{t} = \frac{UIt}{t} = UI.$$

Итак, *мощность тока равна произведению напряжения на ток.*

Напомним, что в системе единиц СИ мы выражаем напряжение в вольтах, ток в амперах, время в секундах, работу в джоулях и мощность в ваттах. Вместо джоуля часто работу выражают в киловатт-часах (*квт-ч*). Киловатт-час есть работа, производимая при мощности в 1 *квт* в течение 1 часа. Так как 1 *квт* = 1000 $\frac{\text{дж}}{\text{сек}}$, 1 час = 3600 *сек*, то 1 *квт-ч* = 3 600 000 *дж*.

Выразив напряжение в киловольтах, силу тока в амперах, время в часах, получим при вычислении по формуле $A = UIt$ работу тока в киловатт-часах.

Рассмотрим пример. Электромотор работал при напряжении 500 *в* = 0,5 *кв* в течение 3 часов при токе 20 *а*. Работа тока равна

$$A = 0,5 \cdot 20 \cdot 3 \text{ квт-ч} = 30 \text{ квт-ч}.$$

У п р а ж н е н и я

373. Какова мощность тока, если по 12-вольтовой автомобильной лампочке идет ток 3 а?

374. Как изменится мощность, потребляемая электроплиткой, если ее спираль укоротить?

375. Как изменится мощность, потребляемая электролампой, если напряжение упадет на 5% от номинального? (При расчете пренебрегите изменением сопротивления волоска вследствие понижения температуры.)

376. Плавкие предохранители («пробки») в групповом щитке ставятся обычно на 6 а (допускается кратковременная перегрузка до 9 а). Можно ли включить в осветительную сеть напряжением 120 в кинопроектор мощностью 1000 вт?

377. Определите сопротивления лампы в следующих случаях: а) 100 вт, 127 в; б) 250 вт, 127 в; в) 100 вт, 220 в.

378. Электродвигатель работает при напряжении 200 в и пропускает ток 40 а. Полезная мощность мотора 6,5 квт. Каков кпд электродвигателя?

379. Генератор дает ток 15 а при напряжении в 220 в. Мощность вращающего его двигателя 4 квт. Каков кпд генератора?

380. Для определения мощности автомобильных двигателей их заставляют вращать генератор, причем измеряют напряжение и вырабатываемый им ток. В таком испытании генератор дал 120 а при напряжении 150 в. Рассчитайте мощность двигателя, приняв кпд динамомашин равным 80%.

381. Какова работа при питании автомобильной 12-вольтовой лампочки током 3,5 а в течение 20 сек?

382. Рассчитайте стоимость израсходованной энергии при тарифе 40 коп. за 1 квт-ч в следующих случаях: а) электрический утюг работает при напряжении 110 в и токе 2,5 а в течение 2 часов; б) электромотор работает при напряжении 120 в и токе 5 а в течение 1 месяца по 8 часов в сутки.

383. Напряжение на станции 128 в, у потребителя 120 в. Каково сопротивление проводки от станции к потребителю, если мощность установки у потребителя равна 6 квт?

384. Гальванический элемент имеет эдс 1,5 в и внутреннее сопротивление 0,5 ом. Каковы мощности, потребляемые во внешней цепи, если элемент дает ток: а) 1 а; б) 1,5 а; в) 2 а; г) 3 а?

§ 271. Мощности, потребляемые приборами, включенными последовательно и параллельно. Рассмотрим случай, когда внутри приборов не действуют никакие сторонние силы, т. е. эти приборы не являются источниками тока. При последовательном соединении по всем приборам идет один и тот же ток, а напряжения на них пропорциональны сопротивлениям. Следовательно, мощности, потребляемые последовательно включенными приборами, пропорциональны их сопротивлениям. Например, если сопротивление лампочки 50 ом, а сопротивление проводов, подводящих к ней ток, 0,2 ом, то мощность, потребляемая лампой, в $\frac{50}{0,2} = 250$ раз больше мощности, потребляемой проводами.

При параллельном соединении приборов напряжения на всех приборах одинаковы, а токи обратно пропорциональны их сопротивлениям. Поэтому мощности, потребляемые параллельно соединенными приборами, обратно пропорциональны их сопротивлениям. Например, если сопротивление одной лампы 50 ом, а другой 200 ом, то первая в $\frac{200}{50} = 4$ раза мощнее второй.

У п р а ж н е н и я

385. Электропечь имеет сопротивление 15 ом, а провода, подводящие к ней ток от сети, — 0,5 ом. Каков кпд использования энергии электропечью?

386. Имеется электрическая плитка на 400 *вт* и 110 *в*. Напряжение в сети 220 *в*. а) Можно ли включить плитку последовательно с лампой на 60 *вт* и тем же паспортным напряжением? б) Что произойдет, если вместо лампы на 60 *вт* взять лампу на 600 *вт*?

§ 272. Нагревание проводников током. Почему нагревается проводник, когда по нему идет ток? Рассмотрим это на примере металлического проводника. Пока тока нет, свободные электроны в проводнике беспорядочно движутся во всех направлениях и, взаимодействуя с ионной кристаллической решеткой металла, обмениваются с ней энергией. Очевидно, что энергия, которую передают электроны ионам в решетке, в среднем равна энергии, которую передают ионы решетки за это же время электронам. Между системой свободных электронов в металле и системой ионов, составляющих решетку, имеет место **тепловое равновесие**.

Что же будет, если по металлу пойдет ток? Рассмотрим сперва участок цепи, где на электроны действуют только электрические силы, а сторонние силы отсутствуют (например, волосок лампы накаливания). При наличии электрического поля внутри волоска к беспорядочному движению электронов прибавляется еще их направленное движение, вызываемое действием электрических сил. При этом средняя энергия движущихся электронов больше, чем при отсутствии тока, и тепловое равновесие между электронами и ионной решеткой уже не имеет места: электроны отдают ионам энергии больше, чем получают от них. В результате внутренняя энергия металла (например, волоска электролампы) при наличии тока растет.

Вначале приток энергии к волоску больше потери энергии при излучении в окружающее пространство, поэтому температура волоска повышается; затем, когда температура волоска делается достаточно высокой, приход энергии от электронов и расход энергии на излучение в окружающее пространство сравняются, и дальнейшее повышение температуры волоска прекратится. Очевидно, в этом случае работа электрических сил, ускоряющих движение электронов, эквивалентна количеству теплоты при тепловом процессе передачи энергии от накаливаемого волоска окружающим телам.

Иначе обстоит дело, если в проводнике, кроме электрических сил, действуют еще сторонние силы. Примером может являться проводник в якоре электродвигателя, когда, как мы узнаем ниже, на электроны действуют неэлектрические, т. е. сторонние, силы.

Если последние действуют на электроны в том же направлении, что и электрические силы, то скорости и средняя энергия электронов увеличиваются в большей мере, чем под действием только электрических сил. В этом случае количество теплоты эквивалентно сумме работ электрических и сторонних сил.

Если же сторонние силы действуют в направлении, противоположном направлению электрических сил (как мы увидим, это относится к явлениям электролиза, в частности, к зарядке аккумуляторов, к работе электродвигателя и др.), то количество теплоты эквивалентно разности работ электрических и

сторонних сил. Иными словами, в этом случае результат работы электрических сил только частично проявляется в нагревании проводника, другая же часть работы электрических сил внутри проводника связана с изменением какой-то иной формы энергии; с увеличением химической энергии в случае электролиза, с повышением механической энергии в случае вращающегося электродвигателя и т. п.

§ 273. Закон Ленца — Джоуля. Русский физик Ленц и английский физик Джоуль, измеряя количества теплоты, выделяемой током в различных случаях, установили в 1840 г. следующий закон: *количество теплоты, выделяемой током на участке цепи, пропорционально квадрату тока, времени его прохождения и сопротивлению участка* (з а к о н Л е н ц а — Д ж о у л я). Обозначая ток I , сопротивление участка R , время t и количество теплоты Q , имеем:

$$Q = I^2 R t.$$

В этой формуле, если I выражен в *а*, t — в *сек*, R — в *ом*, то количество теплоты Q выразится в *дж* (напомним, что 1 *дж* равен 0,24 *кал*).

Закон Ленца — Джоуля легко связать с формулой для работы тока на участке цепи, не содержащем источников тока:

$$A = I U t.$$

В этом случае вся работа тока целиком идет на выделение теплоты, и мы можем написать:

$$Q = A = I U t.$$

Но по закону Ома $U = IR$. Подставляя вместо U произведение IR , получаем закон Ленца — Джоуля. Этот вывод относится к участку цепи, не содержащему источников тока.

Можно доказать, что тот же закон имеет место и при наличии на участке источников тока. Действительно, при этом работа производится не только электрическими, но также и сторонними силами. Поэтому формула $Q = I U t$ должна быть заменена следующей формулой

$$Q = I (U + E) t.$$

Например, при зарядке аккумулятора напряжение на нем положительно (т. е. знак напряжения совпадает со знаком тока), а эдс его отрицательна, так как аккумулятор включен встречно. Поэтому $U + E < U$, и работа по перемещению носителей заряда меньше полной работы электрических сил. По закону Ома для участка цепи, содержащего источник тока:

$$I = \frac{U + E}{R},$$

откуда

$$U + E = IR.$$

Подставляя это в формулу, имеем:

$$Q = I (U + E) t = I^2 R t.$$

Итак, закон Ленца — Джоуля имеет место всегда, независимо от того, включает участок цепи источник тока или нет. Рассмотрим для уяснения этого положения примеры.

1) Аккумулятор, эдс и внутреннее сопротивление которого равны 2 в и $0,1\text{ ом}$, заряжается при напряжении $2,2\text{ в}$. Какое количество теплоты выделится в аккумуляторе за 10 сек и какова работа электрических сил?

В данном примере $U = 2,2\text{ в}$, $E = -2\text{ в}$ (включение встречное), $R = 0,1\text{ ом}$. Согласно закону Ома

$$I = \frac{U + E}{R} = \frac{2,2 - 2}{0,1} = 2\text{ а.}$$

Количество теплоты равно

$$Q = I^2 R t = 4 \cdot 0,1 \cdot 10\text{ дж} = 4\text{ дж.}$$

Работа электрических сил равна

$$A = I U t = 2,2 \cdot 2 \cdot 10\text{ дж} = 44\text{ дж.}$$

Разность этих величин $44\text{ дж} - 4\text{ дж} = 40\text{ дж}$ равна приросту химической энергии в аккумуляторе, т. е. его зарядке. Так как нашей целью являлась именно зарядка аккумулятора, а не его нагревание, то

$$\text{кпд} = \frac{40}{44} \cdot 100\% = 91\%.$$

2) Электродвигатель, внутреннее сопротивление которого равно $0,5\text{ ом}$, работает при напряжении 600 в , причем по его обмотке идет ток 100 а . Какое количество теплоты выделится за 3 сек и какова работа электрических сил?

$$Q = 10\,000 \cdot 0,5 \cdot 3\text{ дж} = 15\,000\text{ дж,}$$

$$A = 600 \cdot 100 \cdot 3\text{ дж} = 180\,000\text{ дж.}$$

Разность $180\,000\text{ дж} - 15\,000\text{ дж} = 165\,000\text{ дж}$ показывает, какая была произведена механическая работа. Так как назначение электродвигателя — производить механическую работу, а не нагревать помещение, то

$$\text{кпд} = \frac{165\,000}{180\,000} \cdot 100\% = 92\%.$$

У п р а ж н е н и я

387. Изменится ли количество теплоты, выделяемой током за 1 сек , если изменить направление тока?

388. Иногда плохо соединенные провода осветительной сети сильно греются при прохождении тока. Если же провода спаяны, то нагревания не наблюдается. Объясните явление.

389. Если на волоске электрической лампы образовался изъяз, то место изъязна накаливается сильнее остальной части волоска. Почему?

390. Какое количество теплоты выделяется в проводе сопротивлением 3 ом , если по нему идет ток 5 а в течение 40 сек ?

391. Какое количество теплоты выделяется за 10 мин. в электрическом утюге, через который при напряжении 120 в идет ток $2,5\text{ а}$?

392. Электрический кипятильник должен, работая при напряжении 100 в , давать 72 ккал за 10 мин. Какой длины надо взять никелиновую проволоку площадью сечения $0,03\text{ мм}^2$, чтобы устроить такой кипятильник?

393. Сколько времени потребуется, чтобы вскипятить 2 л воды в электрическом чайнике мощностью 600 вт ? Начальная температура воды 20° С . Кпд чайника 50% . Сколько стоит израсходованная на это электроэнергия при тарифе 40 коп. за 1 квт-ч ?

394. Две проволоки, диаметры которых различаются в два раза, нагреваются током до одной и той же температуры. По более тонкой проволоке идет ток 1 а . Какой ток идет по более толстой проволоке? Проволоки сделаны из одного металла и находятся в одинаковых условиях.

§ 274. Лабораторная работа № 16. Исследование зависимости мощности электрической лампы от напряжения на ее зажимах.

Значение работы. Работа позволяет уяснить на опыте зависимость мощности тока от напряжения.

Принадлежности. Ламповый реостат, испытываемая лампа R_x , вольтметр переменного тока на напряжение местной осветительной сети, амперметр переменного тока с делениями до $0,1 \text{ а}$ (лучше $0,01 \text{ а}$), ключ, плавкий предохранитель.

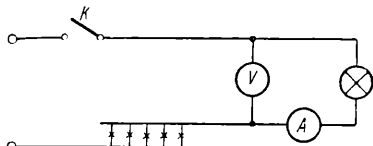


Рис. 349.

Выполнение работы. Составив цепь по схеме рис. 349, измеряйте напряжение и величину тока, начиная с максимального (когда вместо лампы в

патроны реостата поставлены плавкие предохранители и сопротивление реостата можно принять равным нулю). Вынув предохранитель, включайте в реостат пять, четыре и т. д. ламп и отмечайте показания приборов.

Результаты измерений занесите в таблицу:

Число ламп в реостате	U	I	P
0			
5			
4			
3			
2			
1			

Постройте график зависимости мощности лампы от напряжения на ее зажимах.

Лампы рекомендуется брать маскировочные, на 60 вт для реостата и в качестве испытываемой. При отсутствии таковых следует загородить реостат от глаз наблюдателя экраном. Можно проводить работу и с маловольтными лампами с аккумуляторами, в качестве источника напряжения вместо лампового реостата тогда берется проволочный — лабораторный.

ГЛАВА XXI

ЯВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ ДВУХ МЕТАЛЛОВ

§ 275. Термоэлектрические явления. В лабораторной и заводской практике для измерения температур широко употребляются так называемые термопары. Термопара состоит из двух разнородных металлических проволок (например, железной и медной), концы которых соединены друг с другом (места, где соприкасаются металлы, называются контактами, или спаями). Одна из проволок (например, медная) разрезана, и между ее концами включается прибор, регистрирующий очень слабые токи, — гальванометр. Если один из контактов поддерживать при высокой температуре, например опустив его в сосуд с кипящей водой (нагреватель), а другой — при низкой температуре, опустив его в сосуд с холодной водой (охладитель) (рис. 350), то гальванометр покажет наличие тока в цепи. Если поменять роли контактов, опустив первый контакт в охладитель, а второй — в нагреватель, то ток пойдет в обратном направлении. Если же температуры контактов сделать одинаковыми, ток не будет идти.

Наличие тока в цепи термопары указывает, что в цепи действует электродвижущая сила. Она называется термоэлектродвижущей силой (термоэдс). Очевидно, что термоэдс тем больше, чем больше разность температур контактов, и равна нулю, если температуры контактов одинаковы. Обозначив термоэдс E_t и температуры горячего и холодного контактов T_1 и T_2 , можем на основании сказанного написать:

$$E_t = \alpha (T_1 - T_2),$$

где α — коэффициент термоэдс, который зависит от природы веществ, составляющих термопару. Он соответствует

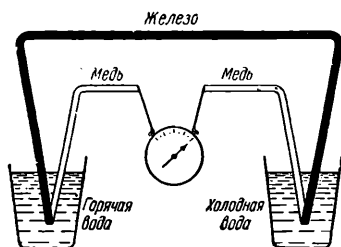


Рис. 350. При наличии разности температур контактов меди и железа гальванометр показывает ток.

термоэдс, которая возникает при разности температур контактов в 1°C . Для термопар, изготовленных из двух чистых металлов, коэффициенты α очень малы (несколько сотысячных долей $\frac{\text{в}}{\text{град}}$).

Токи в термопарах, вообще говоря, невелики; но откуда берется энергия для их поддержания? Чтобы ответить на этот вопрос, произведем следующий опыт. В установке, схема которой показана на рис. 351, в разрез медной проволоки, кроме гальванометра, включен еще источник тока, причем переключатель Π

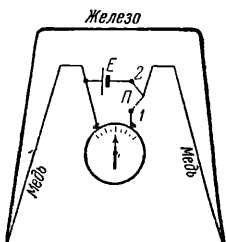


Рис. 351. Когда переключатель Π поставлен в положение 2, левый контакт нагревается, а правый охлаждается. Когда переключатель поставлен в положение 1, гальванометр показывает наличие тока.

позволяет включать в цепь или гальванометр (положение 1), или источник тока (положение 2). Нагреватель и охладитель отсутствуют, а контакты обернуты ватой, чтобы затруднить теплообмен с окружающей средой. Сперва переведем переключатель в положение 1 и убедимся, что термопара не дает тока (температуры контактов одинаковы). Затем переведем переключатель в положение 2. По термопаре пойдет ток от источника E . Спустя некоторое время быстро перебросим переключатель в положение 1. Мы увидим, что термопара дает ток, который затем исчезает.

Это означает, что при пропускании тока от постороннего источника один из контактов нагревается, а другой — охлаждается. Иногда охлаждение одного из контактов током настолько сильно, что температура контакта падает ниже 0°C . Эти явления — нали-

чие тока в термопаре при нагревании одного из контактов и охлаждении другого и нагревание током от постороннего источника одного из контактов и охлаждение другого — называются термоэлектрическими явлениями. Термоэлектрические явления для металлов были открыты в начале прошлого века.

Сопоставляя оба термоэлектрических явления (прямое и обратное), можно понять, откуда берется энергия для работы термопары. При получении тока посредством термопары горячий контакт несколько охлаждается током, а потому имеет температуру ниже температуры нагревателя. Вследствие этого происходит непрерывная передача энергии от нагревателя горячему контакту. Холодный контакт, наоборот, при получении тока нагревается и имеет температуру выше температуры охладителя. Вследствие этого происходит непрерывная передача энергии от холодного контакта охладителю.

Таким образом, термопара непрерывно передает энергию от нагревателя к охладителю, подобно тому как в паровой машине про-

исходит непрерывная передача энергии от нагревателя (горячие газы в топке котла) к охладителю (конденсатор). Но, так же как и при работе тепловых двигателей, количество теплоты, переданное нагревателем одному из контактов, больше количества теплоты, переданной вторым контактом охладителю. Разность этих количеств теплоты и соответствует работе электрического тока.

Из сказанного ясно, что термопары могут служить следующим целям: 1) непосредственному превращению энергии, выделяемой при сгорании топлива, в электрическую энергию; 2) для устройства холодильников. Однако термопары из чистых металлов оказались для этих целей целей непригодными.

Зато распространено применение металлических термопар для измерения температур в более широких, по сравнению с ртутным термометром, пределах. Термопары, соединенные проводами с гальванометром, позволяют измерять температуры на большом удалении, что представляет удобства. В технических термоэлектрических приборах гальванометры прямо проградуированы по температуре одного из контактов, а другой контакт поддерживается при определенной температуре. Для измерения средних и низких температур употребительны термопары из железа и константана (сплав меди и никеля). Для высоких температур (например, в топках и печах) термопары изготовляются из платины и ее сплавов.

Для повышения чувствительности иногда термопары соединяют в батареи (термобатареи, рис. 352). В термобатареях все четные контакты (2, 4, 6, ...) поддерживаются при высокой температуре, все нечетные (1, 3, 5, 7, ...) — при низкой (или наоборот).

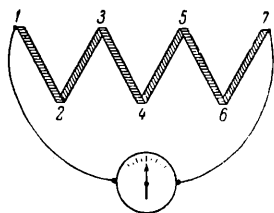


Рис. 352. Термобатарея.

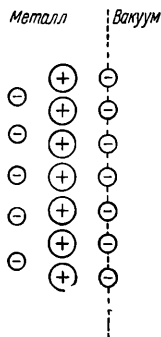
§ 276. Контактная разность потенциалов. Мы выяснили, что в термопаре при наличии разности температур между контактами действует эдс. В какой же части цепи термопары действуют сторонние силы?

Они действуют на границах между разнородными металлами — в контактах. Именно здесь и находятся источники тока. Ясно прежде всего, что источников тока в термопаре не менее двух, поскольку в любой термопаре имеется не менее двух контактов. В случае, показанном на рис. 350, оба контакта легко видны. Иногда второй контакт находится в воздухе вблизи гальванометра. Охладителем (если в одном из стаканов горячая вода) или нагревателем (если в стакан налита жидкость с низкой температурой) служит воздух, окружающий второй контакт. Источники тока включены в термопаре встречно, и если их эдс равны, то тока в цепи нет (сумма эдс равна нулю). Это имеет место при равенстве температур контактов. Если же температуры контактов не одинаковы, сумма эдс не равна нулю и в цепи идет ток.

Что же происходит в контактах металлов, и почему некоторые электроны движутся в них в направлении, противоположном тому, в котором действует на них электрическое поле? Чтобы уяснить этот вопрос, вспомним, как

движутся тела в поле тяготения, в частности молекулы воздуха. В любой момент времени часть молекул воздуха движется вверх, т. е. против поля тяготения. Это связано с тем, что молекулы воздуха, как и молекулы любого другого тела, при температурах, отличных от абсолютного нуля, всегда беспорядочно движутся по всем направлениям, в том числе и вверх. Подобно этому электроны также могут двигаться против направления действующих на них электрических сил.

Электроны, свободно перемещающиеся внутри куска металла, при комнатной температуре не выходят за его границы. Причиной этого является, очевидно, наличие на границе металл — вакуум электрического поля, уменьшающего скорость электронов, движущихся к выходу из металла. Дело в том, что на границе металла образуется двойной слой из положительных ионов решетки и электронов (рис. 353). Этот двойной слой и создает электрическое поле, не позволяющее электронам вылетать за пределы металла. Чтобы электроны могли выйти из металла наружу, нужно произвести работу. Она называется работой выхода.



Работу выхода, так же как и другие величины, связанные с энергией электронов, обычно выражают в электронвольтах. *Электронвольт (эв)* есть работа электрических сил при перемещении электрона между точками, напряжение между которыми равно 1 вольту. Расчет показывает, что $1 \text{ эв} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ дж}$, или $1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$. Работа выхода является одним из важнейших понятий физики и техники. Она может быть измерена разными способами. С одним из них мы познакомимся в разделе «Оптика».

Приведем значения работы выхода для некоторых металлов (в эв):

Рис. 353. Схема расположения ионов в решетке металла и электронов на границе металл — вакуум.

Вольфрам . . .	4,5
Железо	4,4
Натрий	2,3
Цезий	1,9

Как видно, работы выхода разных металлов близки друг другу (несколько электронвольт).

Для сравнения подсчитаем среднюю энергию молекул газа, например кислорода, при 0°C . Масса молекулы кислорода равна массе 1 моля кислорода (32 г), деленной на число молекул в 1 моле, $6,02 \cdot 10^{23}$ (см. § 160), т. е. равна $5,3 \cdot 10^{-23}$ г. Средняя скорость молекул кислорода при 0°C составляет $425 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$.

Тогда средняя кинетическая энергия молекулы кислорода равна

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{5,3 \cdot 10^{-23} (425 \cdot 10^4)^2}{2} \text{ эрг} = 4,8 \cdot 10^{-14} \text{ эрг} = 0,03 \text{ эв}.$$

Кинетические энергии молекул других газов при 0°C имеют ту же величину. Видно, что средняя энергия частиц при 0°C примерно в 100 раз меньше той энергии, которая соответствует работе выхода. Как мы увидим позже, выход электронов из металлов становится возможен при высокой температуре или при освещении металла светом. Это значит, что при таких условиях энергия части электронов достаточна для выхода их из металла.

Теперь обратимся к явлениям в контактах металлов. При соприкосновении разнородных металлов наружные электронные слои их совмещаются (рис. 354). На границе двух металлов А и В образуются два электрических поля противоположных направлений, разделенных слоем электронов С. Этот слой С

является как бы барьером, который нужно преодолеть электронам, чтобы перейти из металла *A* в *B* или наоборот.

Пусть энергия какого-либо электрона, движущегося по направлению из *A* в *B*, достаточно велика, чтобы за счет ее могла быть произведена работа выхода из *A*. Попав в поле металла *B*, электрон далее будет двигаться ускоренно и непременно попадет внутрь *B*. В свою очередь также и электроны из металла *B* могут попадать в металл *A*. Таким образом, соприкасающиеся металлы *A* и *B* все время обмениваются электронами. Если бы с самого начала, как только металлы соприкоснулись, число электронов, переходящих из *A* в *B*, было бы равно числу электронов, переходящих за то же время из *B* в *A*, то при соприкосновении металлов *A* и *B* ничего бы не произошло: ведь все электроны одинаковы, и если электроны в металле *A* заменяются электронами из *B*, то это никак не отражается на состоянии металла.

Однако обычно существуют два обстоятельства, вследствие которых в начальный момент число электронов, переходящих из *A* в *B*, отличается от числа электронов, переходящих из *B* в *A*. Это, во-первых, различие в концентрации свободных электронов в *A* и *B*; чем больше концентрация электронов, тем большее их число поступает на границу соприкосновения металлов; во-вторых, различие в работе выхода: чем больше ее величина, тем меньше электронов может выйти за пределы металла. Вследствие различия в числе перемещающихся электронов, в одном из металлов (пусть это будет металл *A*) образуется недостаток электронов, т. е. положительный заряд, а в другом — избыток электронов, т. е. отрицательный заряд. Между *A* и *B* возникает возрастающая со временем разность потенциалов и, значит, электрическое поле, которое усиливает поле вблизи *A* и уменьшает поле вблизи *B*, затрудняя тем самым перемещение электронов из *A* в *B* и способствуя обратному перемещению их.

Через некоторое время разность потенциалов между *A* и *B* достигнет такой величины, что числа электронов, переходящих из *A* в *B* и обратно, сравняются. Дальнейший рост разности потенциалов прекратится, и установится подвижное равновесие. Разность потенциалов, устанавливающаяся между соприкасающимися металлами, называется контактной разностью потенциалов, а вызывающая ее эдс называется контактной эдс.

Контактные эдс имеют для металлов значения порядка 1—2 в. По мере повышения температуры они немного увеличиваются, потому что движение электронов в металлах становится более оживленным. Отсюда понятно, почему термоэдс увеличивается по мере роста разности температур контактов.

Итак, если соприкасаются два металла, то между ними возникает разность потенциалов.

Уже давно установлено, что разность потенциалов между двумя металлами не зависит от того, соприкасаются ли они непосредственно или между ними имеются другие металлы (з а к о н В о л ь т а). Этот закон является вполне понятным в свете современных представлений о причинах контактной разности потенциалов.

Контактные разности потенциалов и связанные с ними термоэлектрические явления имеют место не только в металлах. Особо важное значение они приобретают в случае полупроводников.

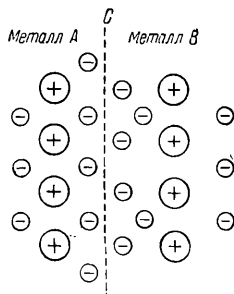


Рис. 354. Схема расположения ионов и электронов на границе соприкосновения металлов *A* и *B*.

У п р а ж н е н и я

395. Принимая массу электрона равной $9,1 \cdot 10^{-23}$ г, вычислите скорость, при которой энергия электрона достаточна для совершения работы выхода из цезия.

396. Вычислите среднюю энергию (в эв) молекулы азота при 0° С, если ее скорость равна $450 \frac{м}{сек}$.

397. При какой температуре средняя энергия молекулы кислорода равна 1 эв?

§ 277. Пьезоэлектрический эффект. В § 230 было сказано, что под действием электрического поля в диэлектрике, помещенном в него, происходит определенная ориентация молекул, в результате чего на одном конце диэлектрика обнаруживаются положительные, на другом — отрицательные заряды. Такое появление положительных и отрицательных полюсов носит название электрической поляризации.

Электрическая поляризация у некоторых диэлектриков может быть вызвана не только электрическим полем, но и при помощи механических и тепловых воздействий. Вызванная механическим сжатием или растяжением электрическая поляризация называется пьезоэлектрическим эффектом. Наиболее заметно он проявляется у кристаллов кварца, турмалина, сегнетовой соли и некоторых других веществ.

Рис. 355.
Кристалл
кварца.

Для наблюдения пьезоэлектрического эффекта обычно применяют тонкую пластинку с параллельными плоскостями, вырезанную определенным образом из кристалла кварца (рис. 355). Если поместить эту пластинку между двумя металлическими пластинками (электродами), соединенными

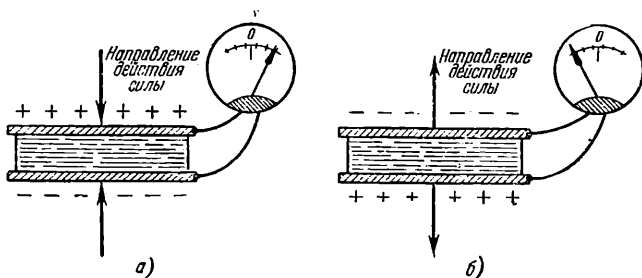


Рис. 356. Так обнаруживается пьезоэлектрический эффект.

с вольтметром, то при сжатии кварцевой пластинки на электродах появляются равные, но противоположные по знаку заряды, что и будет обнаружено вольтметром (рис. 356).

Если вместо сжатия подвергать кварцевую пластинку растяжению, то знаки зарядов на электродах изменятся на обратные, стрелка вольтметра отклонится в обратную сторону.

Можно дать следующее объяснение описанному явлению. Мельчайшую ячейку кристалла кварца (химический состав SiO_2) можно представить в виде ячейки шестиугольной структуры, в углах которой размещены ионы Si и O (последние для упрощения сведены; рис. 357). В недеформированном кристалле силы взаимодействия

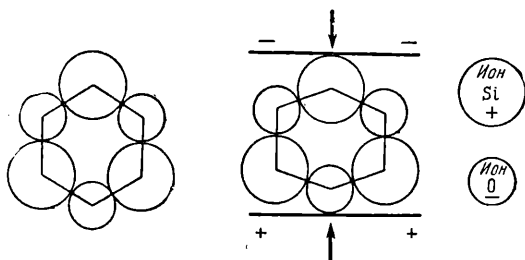


Рис. 357. К объяснению пьезоэффекта.

положительных и отрицательных зарядов уравновешены и потому кристалл электрически нейтрален.

Сила давления, приложенная к электродам, сплющивает ячейку кристалла, и положительный заряд вверху и отрицательный внизу

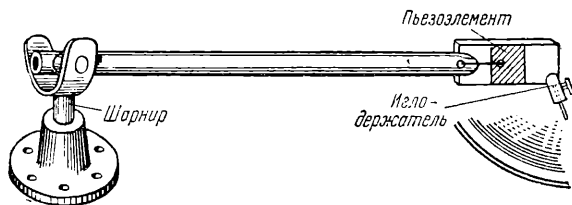


Рис. 358. Устройство пьезоэлектрического звукоснимателя.

вдвигаются между разноименными с ними зарядами, расстояния последних от соответствующих электродов уменьшаются, вследствие чего верхний электрод получает знак $-$, нижний — знак $+$.

В случае растяжения кристалла происходит обратное явление. Интенсивность эффекта в том и другом случае прямо пропорциональна приложенной силе.

Кроме описанного, так называемого прямого пьезоэлектрического эффекта наблюдается обратный пьезоэлектрический эффект. Если кварцевую пластинку поместить в электрическое поле (сообщить электродам противоположные по знаку заряды), то пластинка

деформируется — сжимается или растягивается в зависимости от направления поля.

Если присоединить электроды описанного пьезоэлемента к источнику переменного напряжения, то попеременно сжимающаяся и расширяющаяся кварцевая пластинка приходит в колебательное состояние.

Пьезоэффект находит многообразные применения в технике. Пьезоэлементами пользуются для генерации ультразвуковых колебаний, для записи и воспроизведения звука (рис. 358), в устройстве микрофонов и телефонных трубок, в пьезоманометрах для измерения давления, для исследования напряжений в механических конструкциях и во многих других приложениях.

ГЛАВА XXII ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

§ 278. **Постоянные магниты.** Людям уже давно известны постоянные магниты — предметы, притягивающие железо, никель и некоторые другие вещества. Из курса физики общеобразовательной школы известно, что любой магнит имеет два полюса, т. е. два места, особенно сильно притягивающих предметы. Между полюсами находится нейтральная зона магнита, т. е. место, не притягивающее тел. Железные предметы, находясь вблизи магнитов, сами приобретают

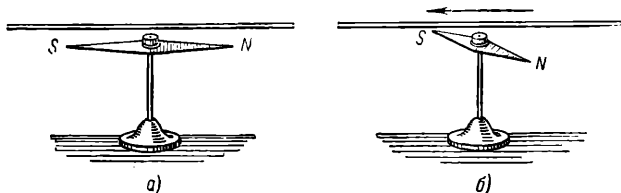


Рис. 359. Опыт Эрстеда: а) медный провод натянут горизонтально с севера на юг; направление магнитной стрелки, помещенной под проводом, параллельно направлению провода; б) по проводу идет ток; магнитная стрелка отклонилась от первоначального направления.

свойства магнитов и притягивают к себе другие тела. Полюсы магнитов называются северным и южным, так как магнит, имеющий возможность вращаться около вертикальной оси, стремится принять направление одним полюсом на север, другим — на юг. Одноименные полюсы магнитов отталкиваются друг от друга, а разноименные притягиваются.

Наконец, известно, что электрический ток тоже действует на находящиеся вблизи магниты, а также на железные предметы, заставляя их располагаться определенным образом. Напомним, например, опыт Эрстеда, изображенный на рис. 359.

В настоящее время доказано, что магнитные свойства электрического тока являются основой вообще всех магнитных явлений. Поэтому мы начнем изучение магнитных явлений с магнитных свойств токов.

§ 279. **Взаимодействие токов. Магнитное поле.** Рассмотрим такой опыт. На близком расстоянии расположены две проволочные катушки, по которым идут токи (рис. 360). Чтобы расстояние между катушками могло меняться, одна из катушек подвешена на двух гибких проводах. Если токи в катушках идут, как показано на рис. 360, в одном направлении (попутно), то катушки притягив-

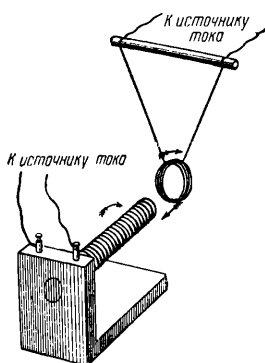


Рис. 360. Взаимодействие токов, идущих через катушки.

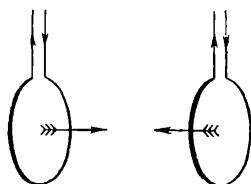


Рис. 361. Взаимодействие попутных токов, идущих через параллельные витки провода.

ваются друг к другу. Если же токи в катушках идут по встречным направлениям, то катушки отталкиваются.

Вместо катушек можно взять только по одному витку провода (рис. 361). В этом случае тоже наблюдается взаимодействие, но оно во много раз слабее. Можно обнаружить, что и вообще любые два провода, по которым идут токи, взаимодействуют: *попутные токи притягиваются, а встречные — отталкиваются* (рис. 362, а, б).

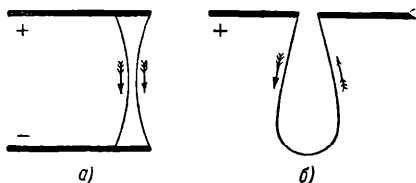


Рис. 362. а) Попутные токи притягиваются; б) встречные токи отталкиваются.

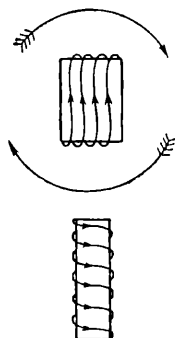


Рис. 363. Взаимодействие катушек.

Видоизменим опыт, показанный на рис. 360: расположим катушки так, чтобы при отсутствии тока в них подвижная катушка была расположена на продолжении оси неподвижной катушки и притом так, чтобы оси катушек образовали некоторый угол, напри-

мер были бы взаимно-перпендикулярны (рис. 363). Пустив в катушки токи, мы увидим, что подвижная катушка повертывается так, что оси катушек стремятся совпасть и токи получают попутное направление, а затем катушки притягиваются. Вращение катушки показывает, что на каждый ее виток действует вращающий момент. Рис. 364 поясняет, почему это происходит. На этом рисунке каждая из катушек представлена одним витком. Вверху показан виток подвижной катушки (*I*), внизу — виток неподвижной катушки (*II*). На нижнюю часть витка *I* действует сила отталкивания от правой части витка *II* и сила притяжения к левой части витка *II*. Результирующая этих сил есть F_1 . Подобно этому результирующая сил, действующих на верхнюю часть витка *I*, есть F_2 . Силы F_1 и F_2 образуют вращающий момент, поворачивающий виток *I*, как показано изогнутой стрелкой.

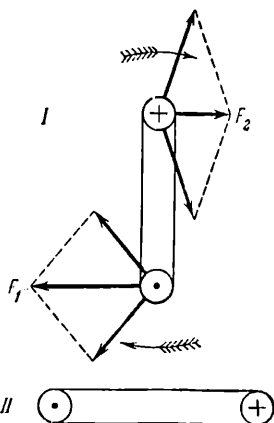


Рис. 364. К объяснению возникновения вращающего момента в случае, когда оси витков *I* и *II* образуют прямой угол.

На рис. 365 показано расположение сил F_1 и F_2 , действующих на виток *I* после того, как оси витков совпали. Видно, что результирующая F сил F_1 и F_2 направлена вниз, т. е. виток *I* притягивается к витку *II*.

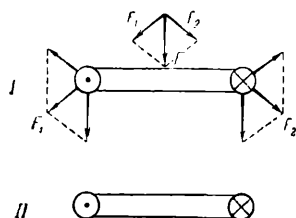


Рис. 365. К объяснению сближения витков *I* и *II* в случае совпадения направлений их осей.

Описанные опыты убеждают нас в том, что пространство вокруг проводов, по которым идут токи, чем-то отличается от пространства вблизи тех же проводов, когда ток в них отсутствует. При наличии тока в проводе вблизи него проявляются силы, действующие на другой провод, по которому идет ток.

Наличие этих сил указывает на существование вблизи провода, по которому идет ток, особого вида материи, который принято называть магнитным полем. Впоследствии мы увидим, что магнитному полю, так же как и электрическому, присущи и энергия, и масса.

§ 280. Намагничение железа и стали. Если вставить в катушку, изображенную на рис. 360 железный сердечник, то взаимодействие катушек при тех же токах в них заметно усилится. Это

показывает, что к магнитному полю тока, идущего по катушке, прибавилось дополнительное поле. Очевидно, это добавочное поле связано с какими-то токами внутри железного сердечника. Что это за токи и почему они сильно проявляются только в железе, мы постараемся выяснить немного далее. Пока только отметим, что железный сердечник, помещенный внутри катушки, по которой идет ток, порождает вокруг себя магнитное поле, усиливающее магнитное поле катушки. Это состояние железного сердечника называется **намагничивением**.

Что произойдет, если выключить ток в обмотке? Результат зависит от формы сердечника. Если железный сердечник имеет форму замкнутого сплошного кольца, то по выключении тока намагниченность в сердечнике почти полностью сохраняется. Если же сердечник имеет форму прямого стержня, то при выключении тока он быстро размагнитится, и притом тем в большей мере, чем он короче и шире.

Иначе ведет себя стальной сердечник. Поместив на длительное время в катушку, по которой идет ток, стальной сердечник (прямой или подковообразный, рис. 366), мы можем намагнитить его. В отличие от железного, прямой или подковообразный стальной сердечник и по выключении

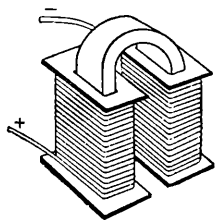


Рис. 366. Изготовление постоянного магнита.

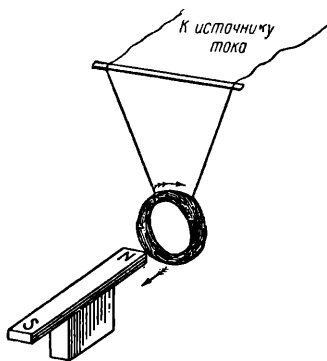


Рис. 367. Неподвижную катушку прибора, изображенного на рис. 314, можно заменить постоянным магнитом.

тока сохраняет значительное остаточное намагничение. Таким образом получается **постоянный магнит**.

Магнитное поле вблизи постоянного магнита имеет такие же свойства, как и магнитное поле вблизи катушки, по которой идет ток. Это ясно из такого опыта. Заменим длинную катушку, показанную на рис. 360 достаточно сильным постоянным магнитом (рис. 367). Если по катушке идет ток, то она взаимодействует с постоянным магнитом так же, как и с катушкой, по которой идет ток. Если

обратить магнит к подвижной катушке другим полюсом, то притяжение заменится отталкиванием.

§ 281. Направление магнитных сил. Изучая взаимодействие неподвижной и подвижной катушек (§ 279), мы выяснили, что подвижная катушка ориентируется в поле неподвижной катушки определенным образом. Мы ограничились тогда случаем, когда подвижная катушка находилась на продолжении оси неподвижной катушки. Если продолжить опыты § 279, располагая подвижную катушку сбоку неподвижной, то и в этом случае подвижная катушка ориентируется в поле неподвижной катушки. Однако гораздо удобнее производить опыты не с подвижными катушками, а с маленькими магнитными стрелками, магнитные свойства которых сходны со свойствами прямых катушек таких же размеров.

Поместим вокруг катушки несколько стрелок (рис. 368, а). Пока по катушке не идет ток, стрелки располагаются в направлении с юга на север. Пусть по катушке ток: стрелки изменят свое направление и расположатся определенным образом (рис. 368, б). Переменим направление тока: все стрелки повернутся и расположатся по направлениям, противоположным тем, которые они только что имели.

Описанные опыты показывают, что направление, в котором располагается в магнитном поле ось прямой катушки или магнитной стрелки, является для данного поля вполне определенным. Это направление называется **направлением магнитных сил** в рассматриваемой точке магнитного поля. За направление магнитных сил в каком-либо месте магнитного поля условно принимают направление от южного полюса к северному маленькой магнитной стрелки, помещенной в этом месте.

§ 282. Силовые линии магнитного поля. *Силовыми линиями магнитного поля называются воображаемые линии, касательные к которым в любой точке поля совпадают с направлением магнитной силы в данной точке.*

Как узнать расположение магнитных силовых линий? Очень удобный прием изучения структуры магнитного поля состоит

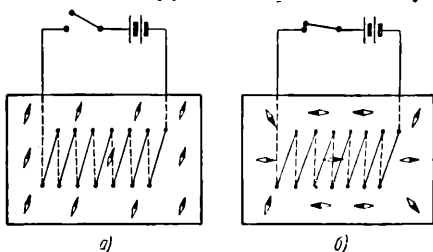


Рис. 368. а) Ток в катушке отсутствует, и направление магнитных стрелок совпадает с направлением магнитного поля Земли; б) по катушке идет ток, создающий магнитное поле, значительно, более сильное, чем поле Земли; направления стрелок показывают направление магнитного поля тока.

в следующем. В магнитное поле помещают в горизонтальном положении плоский предмет, сделанный из немагнитного материала (стекла, картона и т. п.). На картон сверху насыпают ровным тонким слоем железные опилки. После этого по картону нужно слегка постучать. Тогда опилки расположатся в виде цепочек. Происходит это потому, что опилки в магнитном поле намагничиваются и притягиваются друг к другу разноименными полюсами (рис. 369). Цепочки, по которым располагаются в магнитном поле железные опилки, можно считать совпадающими с магнитными силовыми линиями.

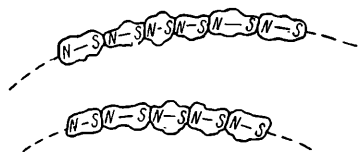


Рис. 369. Цепочки из железных опилок располагаются вдоль магнитных силовых линий, показанных пунктиром.

§ 283. Структура магнитных полей токов и постоянных магнитов. Пользуясь железными опилками, можно найти расположение магнитных силовых линий, т. е. структуру магнитных полей, в различных случаях. На рис. 370 и 371 показаны расположения железных опилок вблизи прямой катушки, по которой идет ток, и вблизи прямого постоянного магнита (картон помещен над магнитом).

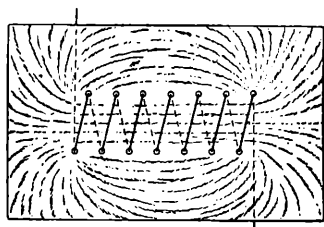


Рис. 370. Железные опилки в поле прямой катушки.

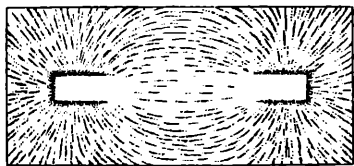


Рис. 371. Железные опилки на картоне, под которым расположен прямой магнит.

Как видно, поле вне катушки вполне сходно с полем вне магнита: в обоих случаях силовые линии расходятся веером из одного конца и сходятся к другому концу. Внутри катушки магнитное поле однородно, т. е. силовые линии идут параллельно друг другу с одинаковой густотой.

Важный для практики случай представляет магнитное поле катушки, свернутой в кольцо. Исследование его посредством опилок показывает, что силовые линии идут только внутри катушки (рис. 372). Это значит, что в кольцевой катушке магнитное поле сосредоточено внутри нее и почти отсутствует вне ее.

На рис. 373 показана структура магнитного поля в случае нескольких прямых катушек, оси которых совпадают и токи в которых идут попутно. Видно, что силовые линии проходят из одной катушки в другую. Вместо катушек можно взять отдельные витки; поле в этом случае будет иметь сходную структуру (рис. 374). Таким образом, поле длинной катушки можно рассматривать как

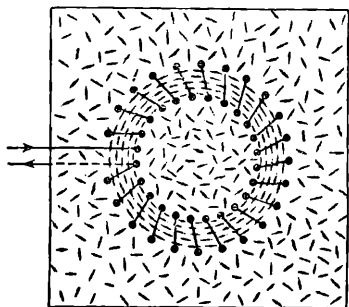


Рис. 372. Железные опилки в поле кольцевой катушки.

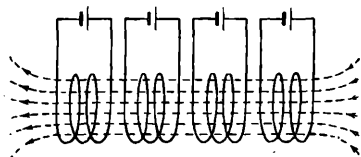


Рис. 373. Магнитные силовые линии в случае нескольких соосных катушек с попутными токами.

результат наложения множества полей отдельных витков. На рис. 375 показано поле одного, удаленного от других, витка. На рис. 376 изображена структура поля вблизи прямого провода, являющегося частью витка очень большого радиуса. В этом случае формы силовых линий близки к окружностям, центры которых совпадают с проводом.

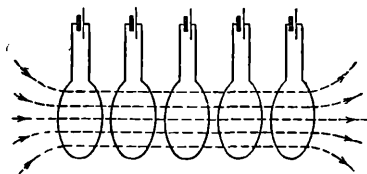


Рис. 374. Магнитные силовые линии в случае соосных витков с попутными токами.

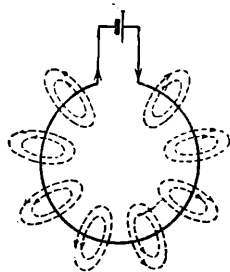


Рис. 375. Магнитное поле одного витка.

Изучая расположение магнитных линий в разных местах поля, легко подметить, что оно показывает не только направление магнитных сил в той или иной точке поля. Густота расположения магнитных линий служит наглядным указанием и на величину сил поля. Это хорошо видно, например, из рис. 371. Магнитные линии более густо располагаются вблизи полюсов, т. е. там, где магнитные силы велики. По мере удаления от полюсов густота расположения

магнитных линий убывает, и это соответствует уменьшению магнитных сил. В частности, если густота магнитных линий во всех точках поля одна и та же, то это значит, что магнитное поле одинаково сильно во всех точках (о д н о р о д н о е поле). Примером такого поля может служить поле внутри длинной прямой катушки (рис. 370).

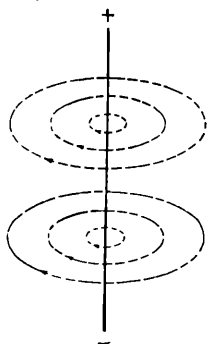


Рис. 376. Магнитное поле прямого провода.

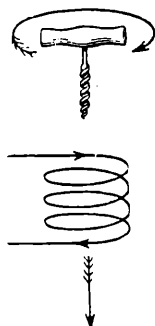


Рис. 377. Правила штопора.

§ 284. Правило штопора. Мы убедились в том, что магнитные поля прямой катушки и прямого магнита сходны. Какой же конец катушки соответствует северному и какой — южному полюсам магнита? Иными словами, каково направление магнитных сил внутри катушки? Это можно узнать, пользуясь так называемым **п р а в и л о м ш т о п о р а**. Представим себе, что внутри катушки находится пробка и что в эту пробку ввинчивается штопор. Если направление движения ручек штопора совпадает с направлением тока в витках катушки, то направление поступательного движения штопора совпадает с направлением магнитных сил внутри катушки (рис. 377).

Правило штопора пригодно также и для определения направления магнитного поля вокруг провода. В этом случае оно таково: если направление поступательного движения штопора совпадает с направлением тока в проводе, то направление движения ручек штопора совпадает с направлением магнитных сил вокруг провода.

У п р а ж н е н и я

398. По виткам катушки, ось которой расположена вертикально, идет ток, направление которого совпадает с направлением движения стрелки часов, обращенных циферблатом вверх. Каково направление магнитных сил внутри катушки?

399. Каково направление магнитных сил к северу от вертикального провода, по которому идет ток вниз?

У к а з а н и е. В упражнениях 393 и 394 магнитное поле Земли не учитывать.

§ 285. Действие магнитного поля на ток. Правило левой руки. Вернемся к опытам по взаимодействию токов. Пусть на рис. 378, а кружок с крестиком означает сечение провода, по которому ток идет за плоскость чертежа. Проведем одну из силовых линий магнитного поля вокруг правого провода так, чтобы она проходила

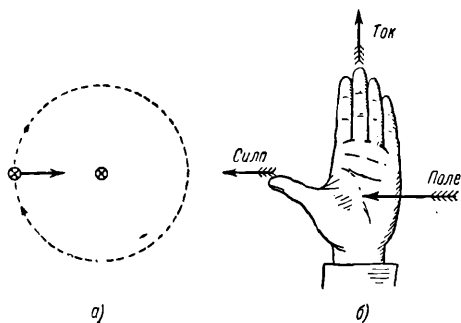


Рис. 378. а) К выводу правила левой руки; б) правило левой руки; направления тока, поля и силы показаны стрелками.

сквозь левый провод. Касательная к этой линии направлена перпендикулярно к проводу вверх. Действующая на провод сила показана стрелкой, направленной вправо (провода притягиваются). Значит, на ток, идущий по проводу, перпендикулярному к силовым линиям магнитного поля, действует сила, направленная перпендикулярно и к линиям, и к проводу.

Для отыскания ее направления можно пользоваться правилом левой руки: если вместо провода поместить в магнитное поле левую руку так, чтобы силовые линии входили в ладонь, а указательный палец показывал направление тока, то направление отогнутого большого пальца покажет направление силы, действующей на ток (рис. 378, б).

Это правило пригодно для любого случая магнитных сил.

Упражнения

400. Для гашения электрической дуги, образующейся при размыкании цепей сильных токов, часто помещают около места размыкания электромагнит. Объясните его действие в данном случае.

401. На рис. 379 показан опыт с действием поля постоянного магнита на ток. Куда отклонится провод, по которому идет ток?

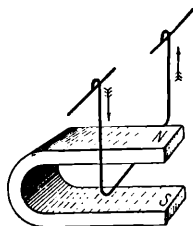


Рис. 379.

§ 286. Действие магнитного поля на движущиеся заряженные частицы. Мы рассмотрели действие магнитного поля на провод, по которому идет ток. Однако, по существу, речь идет о действии поля не на весь провод, а на отдельные заряженные частицы, движущиеся в нем, — электроны.

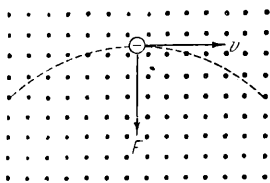


Рис. 380. В однородном магнитном поле (перпендикулярном к чертежу и схематически показанном точками, изображающими следы силовых линий) электрон движется по окружности. Это означает, что действующая на него сила F перпендикулярна к его скорости v .

Сила, которая действует на движущиеся в магнитном поле электроны, всегда *перпендикулярна к скорости* электрона. Если электрон влетает в магнитное поле так, что его скорость перпендикулярна к направлению магнитных сил, и если магнитное поле однородно, то электрон (или другая заряженная частица) движется *по дуге окружности* (рис. 380).

Наблюдение движений электронов и других заряженных частиц в магнитном и электрическом полях оказалось удобным средством исследования свойств этих частиц. Именно оно дало возможность определять массы и скорости заряженных частиц.

§ 287. Индукция магнитного поля. Мы уже видели (§ 283), что магнитное поле может быть сильным или слабым. Надо ввести величины, которыми можно было бы характеризовать магнитное поле.

Производя измерения силы, действующей на ток в проводе, расположенном перпендикулярно к направлению поля, можно найти, что она пропорциональна току I и длине Δl участка провода, на который действует сила. Значит, для данного места в магнитном поле отношение магнитной силы к произведению тока на длину участка провода есть величина постоянная. Для другого места в магнитном поле это отношение будет иным. Указанное отношение и можно принять за величину, характеризующую магнитное поле. В том месте поля, где это отношение велико, поле является сильным, а там, где это отношение мало, поле слабо. Упомянутое отношение называется *индукцией магнитного поля* и обозначается B . На основании сказанного мы можем написать:

$$B = \frac{F}{I\Delta l}.$$

В системе единиц СИ единицей магнитной индукции является индукция такого поля, в котором на участок провода длиной 1 м, при наличии тока 1 а, действует сила 1 н. Мы пока обозначим эту единицу $1 \frac{\text{н}}{\text{а} \cdot \text{м}}$; она имеет и специальное обозначение, о котором

мы скажем в § 290. В системе СГС употребляется еще старая единица, в десять тысяч раз меньшая, называемая гаусс (сокращенно *гс*): $1 \frac{\text{н}}{\text{а} \cdot \text{м}} = 10^4 \text{ гс}$.

Индукция магнитного поля есть векторная величина. Направление вектора индукции магнитного поля в какой-либо точке пространства совпадает с направлением магнитной силы в этой точке. В дальнейшем вместо точного выражения «направление вектора индукции магнитного поля» мы будем употреблять неточное, но более короткое: «направление магнитного поля» (ср. § 228).

Индукцию поля можно связать с густотой расположения магнитных линий, которая, как мы указывали в § 283 тоже характеризует магнитное поле. Для этого условимся чертить магнитные линии с такой густотой, чтобы сквозь 1 см^2 площадки, поставленной перпендикулярно к направлению поля, проходило как раз столько магнитных линий, каково в данном месте численное значение магнитной индукции (выраженной в $\frac{\text{н}}{\text{а} \cdot \text{м}}$ или в *гс*).

Измерять индукцию магнитного поля можно разными способами. Простейшими, но неудобным на практике способом является измерение магнитной силы, о котором мы только что говорили. Зная индукцию магнитного поля, мы можем найти силу, действующую на участок провода, по формуле

$$F = BIl.$$

Эта формула называется **формулой Ампера**. Напомним, что она относится к тому случаю, когда провод расположен перпендикулярно к направлению поля. Если угол между полем и проводом отличен от прямого, то сила имеет меньшее значение, чем дает эта формула. Если указанный угол равен нулю, то и сила, действующая на провод, равна нулю.

Рассмотрим действие однородного магнитного поля на контур, по которому идет ток. Для простоты возьмем контур прямоугольной формы, расположенный относительно поля так, как показано на рис. 381, *а*. Поскольку участки *AD* и *BC* контура параллельны полю, то действующие на них силы равны нулю. Силы же, действующие на участки *AB* и *CD*, равны друг другу и антипараллельны, т. е. составляют *пару сил*. Последняя, как известно (§ 66), не имеет равнодей-

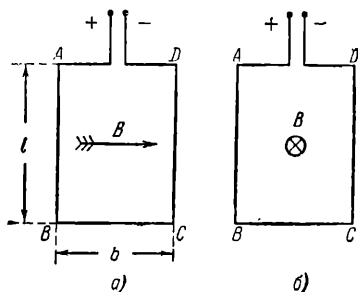


Рис. 381.

ствующей. Вращающий момент пары сил в случае, показанном на рис. 381, *a*, равен

$$M_0 = IBlb = IBS$$

(*S* — площадь контура). В случае, показанном на рис. 381, *b*, силы Ампера, действующие на противоположные участки контура, попарно уничтожаются, так что равнодействующая и вращающий момент равны нулю. В промежуточных положениях равнодействующая по-прежнему равна нулю, а вращающий момент меняется от M_0 до нуля. Эти выводы справедливы в отношении контура любой формы, в частности и для прямой катушки. Наибольший вращающий момент в случае катушки равен $M_0 n$, где *n* — число витков катушки.

У п р а ж н е н и я

402. С какой силой действует магнитное поле с индукцией $0,6 \frac{\text{н}}{\text{а} \cdot \text{м}}$ на один из проводников обмотки якоря электродвигателя (длина якоря 35 см), если ток в обмотке 20 а? Проводник расположен перпендикулярно к направлению магнитного поля.

403. Найдите индукцию магнитного поля, которое действует с силой 120 н на проводник, по которому проходит ток 500 а. Длина проводника 40 см, он расположен перпендикулярно к полю.

404. Прямая катушка состоит из 1000 витков площадью 20 см² каждый. По катушке идет ток 1,5 а. Определите наибольший вращающий момент, действующий на катушку в однородном магнитном поле ($B = 3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{н}}{\text{а} \cdot \text{м}}$).

§ 288. Магнитная проницаемость. Измеряя силу взаимодействия токов, идущих по двум параллельным проводам (I_1 и I_2), можно убедиться, что взаимодействие зависит от этих токов, от расстояния между проводами и от свойств промежуточной среды (последнее сильно проявляется только в случае ферромагнитных веществ). Магнитная сила, действующая на отрезок одного из проводов длиной Δl (рис. 382), равна в рационализованной форме

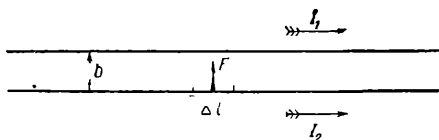


Рис. 382. К пояснению формулы взаимодействия токов.

$$F = \frac{I_1 I_2 \Delta l}{2\pi b} \mu,$$

где *b* — расстояние между проводами, а μ — величина, характеризующая магнитные свойства среды и называемая **магнитной проницаемостью**. Отметим сразу, что понятие магнитной проницаемости применимо также и к вакууму, поскольку провода,

по которым идут токи, взаимодействуют и в вакууме. Магнитную проницаемость вакуума принято обозначать μ_0 она называется магнитной постоянной.

Исследуем посредством железных опилок магнитное поле между двумя разноименными полюсами сильного магнита, когда между полюсами находится только воздух, а затем — когда между полю-

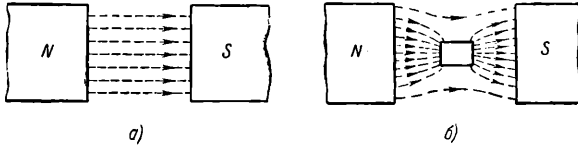


Рис. 383. а) Поле между двумя полюсами магнита; б) то же поле при внесении в него железного стержня.

сами введен железный стержень. Мы увидим, что почти однородное поле в воздухе (рис. 383, а) при наличии стержня искажается (рис. 383, б). Магнитные линии как бы втягиваются в железный стержень. Это явление имеет сходство с течением жидкости или газа через среды с различной проницаемостью. В трубке, заполненной ватой (малая проницаемость), в середину которой вставлена другая трубка (большая проницаемость), вода будет течь так, как показано на рис. 384, т. е. по каналу с большей проницаемостью.

Необходимо, однако, помнить, что никакого течения магнитных линий нет. Дело заключается только в том, что железный стержень при внесении в магнитное поле намагничивается. Собственное поле стержня усиливает основное магнитное поле у концов стержня и ослабляет его рядом со стержнем.

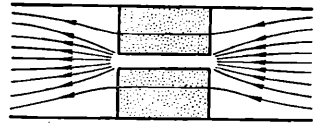


Рис. 384. Течение жидкости сквозь пористую перегородку с трубкой посредине.

Приведенная в этом параграфе формула взята в системе единиц СИ за основу для определения единицы силы тока — ампера. Пусть имеются два длинных параллельных провода, расположенных в вакууме на расстоянии 1 м , по которым идут равные токи. По международному соглашению принимают, что токи в проводах равны 1 а , если сила, действующая на отрезок одного из проводов длиной 1 м , равна $2 \cdot 10^{-7}\text{ н}$. Подставляя это значение в приведенную формулу, найдем: $2 \cdot 10^{-7} = \frac{1 \cdot 1}{2\pi \cdot 1} \mu_0$, откуда

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ ед. системы СИ.}$$

В системе единиц СИ единица магнитной проницаемости в $\frac{10^7}{4\pi}$ раз больше магнитной проницаемости вакуума. Наибольшее значение

магнитной проницаемости для железа технической чистоты равно $5 \cdot 10^4$ ед. СИ, т. е. в 5000 раз больше магнитной проницаемости вакуума. В некоторых сплавах наибольшая магнитная проницаемость еще в сотни раз больше этой величины.

Методов определения магнитной проницаемости различных веществ мы не будем рассматривать. Приведем таблицу отношений магнитных проницаемостей некоторых металлов при комнатной температуре к магнитной проницаемости вакуума (μ_0). Это отношение называется относительной магнитной проницаемостью: $\mu_{отн} = \frac{\mu}{\mu_0}$. Магнитная проницаемость среды

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_{отн}$$

(сравните с диэлектрической проницаемостью § 219). Для ферромагнетиков *) в таблице указаны наибольшие значения относительной магнитной проницаемости.

Металл	Отношение к магнитной проницаемости вакуума
Алюминий } (парамагнетики) *	1,000023
Вольфрам } (парамагнетики) *	1,000175
Медь } (диамагнетики) *	0,999912
Висмут } (диамагнетики) *	0,999824
Железо } (ферромагнетики)	5000
Никель } (ферромагнетики)	300

У п р а ж н е н и я

405. Начертите примерное расположение магнитных линий в случае, когда в однородное поле введен полый железный цилиндр, ось которого перпендикулярна к направлению поля.

406. Прямой и обратный провода от электрической станции идут параллельно друг другу на расстоянии 50 см в воздухе. Определите силу, действующую на участок длиной 20 м одного из проводов при токе в них 1000 а.

§ 289. Индукция магнитного поля тока. Рассмотрим два наиболее важных случая расчета индукции магнитного поля тока.

1) Магнитное поле тока в прямолинейном проводе. Сопоставим формулу для взаимодействия двух параллельных токов

$$F = \frac{I_1 I_2 \Delta l}{2\pi b} \mu$$

с формулой Ампера

$$F = B I_1 \Delta l,$$

*) Значение терминов пояснено в § 292.

где B — индукция магнитного поля тока I_2 в точке, отстоящей от второго провода на расстоянии b (рис. 382). Мы найдем (опуская индекс 2):

$$B = \frac{I}{2\pi b} \mu.$$

Как видно, индукция магнитного поля прямого тока пропорциональна току и обратно пропорциональна расстоянию рассматриваемой точки от провода. Вычислим для примера индукцию в воздухе на расстоянии 2 см от провода, по которому идет ток 5 а. В данном случае

$$I = 5a; \quad b = 0,02 \text{ м}; \quad \mu \approx \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ ед. СИ},$$

$$B = \frac{5}{2\pi \cdot 0,02} 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{н}}{\text{а} \cdot \text{м}} = 5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{н}}{\text{а} \cdot \text{м}}.$$

2) Для практической электротехники важно уметь рассчитывать индукцию внутри катушки, по которой идет ток. Если катушка имеет форму замкнутого кольца (рис. 372) или цилиндра, диаметр которого значительно меньше его длины, то индукцию поля внутри катушки можно вычислять по формуле

$$B = nI\mu,$$

где n — густота намотки витков, т. е. число витков на единице длины катушки*). Пусть, для примера, индукция внутри катушки, имеющей 2000 витков и железный сердечник в виде кольца длиной 50 см, при токе 0,3 а равна $150 \frac{\text{н}}{\text{а} \cdot \text{м}}$. Найдем магнитную проницаемость железа в сердечнике. В данном случае

$$B = 150 \frac{\text{н}}{\text{а} \cdot \text{м}}; \quad n = \frac{2000}{0,5} \text{ м}^{-1} = 4000 \text{ м}^{-1}; \quad I = 0,3 \text{ а};$$

$$\mu = \frac{B}{4\pi n I} = \frac{150}{4 \cdot 3,14 \cdot 4000 \cdot 0,3} \text{ ед. СИ} = 10^{-4} \text{ ед. СИ} = 1000 \mu_0.$$

У п р а ж н е н и я

407. Определите индукцию магнитного поля на расстоянии 10 см от трамвайного провода, по которому идет ток 600 а.

408. Длинный прямой провод, по которому идет ток 20 а, расположен в воздухе горизонтально в однородном магнитном поле с индукцией $10^{-4} \frac{\text{н}}{\text{а} \cdot \text{м}}$, направленном сверху вниз. Определите индукцию на расстоянии 4 см от провода: а) на одной высоте с проводом; б) выше и ниже него.

409. Определите индукцию внутри катушки, имеющей 3000 витков на длине 40 см, если по катушке идет ток 0,5 а. Внутри катушки находится воздух.

*) В нерационализированной форме формула магнитной индукции внутри катушки была бы

$$B = 4\pi n I \mu.$$

§ 290. Работа магнитных сил. Магнитный поток. Если под действием магнитных сил провод перемещается, то производится работа. Как подсчитать эту работу? Рассмотрим наиболее простой случай. Пусть участок провода длиной Δl , расположенный в магнитном поле перпендикулярно к его направлению, перемещается под действием магнитной силы F , как показано на рис. 385. Если провод сместится на расстояние x , то при своем движении он покроет площадь ΔS , равную

$$\Delta S = x\Delta l.$$

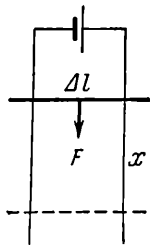


Рис. 385. К выводу формулы работы при перемещении тока в магнитном поле.

Произведенная магнитными силами работа равна $A = Fx = I\Delta l x = I\Delta S$. Этот результат можно записать так: $A = I\Delta(BS)$, где S — площадь, занимаемая всем контуром. Можно показать, что это соотношение имеет место при любой форме контура. Это значит, что работа магнитных сил зависит только от начального и конечного значений произведения BS . Отсюда видно, что произведение BS есть важная физическая величина, характеризующая контур, по которому идет ток. Она называется магнитным потоком и обозначается Φ («фи»). Название «магнитный поток» связано с представлением о числе магнитных линий, которые как бы протекают сквозь рассматриваемую площадь (рис. 386).

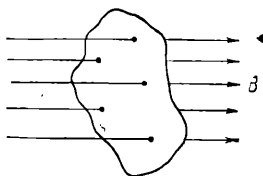


Рис. 386. Графическая иллюстрация понятия «магнитный поток».

Конечно, это только образное, но не точное выражение: никакого течения магнитных линий не существует.

В системе единиц СИ единицей магнитного потока является вебер (обозначается $вб$). Согласно определению, $\Phi = BS$, откуда

$$B = \frac{\Phi}{S}.$$

Поэтому в системе единиц СИ единица магнитной индукции, которую мы обозначали $\frac{н}{а \cdot м}$, называется вебером на квадратный метр и обозначается $\frac{вб}{м^2}$.

В системе СИ единица магнитной индукции называется тесла ($1 тл = 1 \frac{вб}{м^2}$).

Итак, работа магнитных сил равна произведению тока на изменение магнитного потока:

$$A = I\Delta\Phi.$$

Рассмотрим пример. Пусть в контур, по которому идет ток $2a$, вносится постоянный магнит, причем магнитный поток, пронизывающий контур, увеличивается на $0,3$ вб. В этом случае производится работа

$$I\Delta\Phi = 2 \cdot 0,3 \text{ дж} = 0,6 \text{ дж}.$$

У п р а ж н е н и я

410. Чему равен магнитный поток через прямоугольное поперечное сечение сердечника размером 80×50 мм², если магнитная индукция сердечника 5000 гс?

411. Индукция магнитного поля равна $0,8 \frac{\text{вб}}{\text{м}^2}$. Найдите магнитный поток, пронизывающий круг диаметром 20 см.

412. Найдите магнитный поток внутри железного сердечника, имеющего форму кольца площадью поперечного сечения 25 см². На сердечник навита обмотка с густотой 10 витков на 1 см, по которой идет ток 2 а. Магнитная проницаемость железа при таких условиях в 500 раз больше магнитной проницаемости вакуума.

413. Определите работу магнитных сил, если магнитный поток, пронизывающий виток, по которому идет ток 16 а, увеличивается на 5 вб.

414. Виток, по которому идет ток, перемещается в однородном магнитном поле. Производится ли при этом работа, если виток движется: а) поступательно; б) вращательно?

415. В катушку, по 1500 виткам которой идет ток $0,1$ а, вносится постоянный магнит, вследствие чего магнитный поток в катушке увеличивается на $0,002$ вб. Определите механическую работу, производимую при вдвигании магнита.

416. По прямой катушке, имеющей 1000 витков радиусом 5 см, идет ток $3,5$ а. Катушка находится в магнитном поле, индукция которого равна $0,03$ вб/м², причем ось катушки совпадает с направлением поля. Определите работу, которая производится магнитными силами при повороте оси катушки на 90° . При каком условии эта работа положительна?

§ 291. Напряженность магнитного поля. Мы познакомились с важной величиной, характеризующей магнитное поле в некоторой его точке, — с индукцией магнитного поля. Эта величина зависит от тока, от геометрической формы проводника и его расположения, а также от свойств среды, в которой присутствует магнитное поле. Часто, однако, для расчетов требуется другая величина, тоже характеризующая магнитное поле в некоторой точке, но в отличие от индукции зависящая не от свойств среды, а только от величины тока, формы и расположения проводника; такой величиной является индукция магнитного поля, деленная на магнитную проницаемость. Эта величина называется **н а п р я ж е н н о с т ь ю** магнитного поля и обозначается $H = \frac{B}{\mu}$. На основании формул, приведенных в § 289, можно написать формулы для напряженности поля прямого тока и поля внутри прямой катушки:

$$H = \frac{I}{2\pi b}, \quad H = nI^*).$$

*) В нерационализованной форме было бы

$$H = \frac{2I}{b}, \quad H = 4\pi nI.$$

В системе СИ за единицу напряженности принимают напряженность магнитного поля внутри прямой катушки с густотой намотки один виток на метр длины катушки ($n = 1 \text{ виток/м}$) при токе $I = 1 \text{ а}$. Эта единица называется ампер-виток на метр или просто ампер на метр и обозначается 1 а/м .

В системе СГС единица напряженности магнитного поля 1 эрстед (обозначается э), равная 80 а/м .

Так же как и индукция, напряженность магнитного поля есть векторная величина. Направление последней совпадает с направлением вектора индукции магнитного поля.

У п р а ж н е н и е

417. а) Какой ток должен идти по катушке, имеющей 120 витков на 1 см длины, чтобы напряженность поля в катушке была равна 500 а/м ?

б) На каком расстоянии от прямого провода, по которому идет ток 5 а , напряженность поля равна $0,02 \text{ э}$?

Из определения напряженности можно написать формулу для магнитной проницаемости и путем ряда преобразований определить размерность ее:

$$\mu = \frac{B}{H} \frac{\frac{n}{a} \cdot \text{м}}{a} = \frac{n \cdot \text{м}}{a \cdot \text{м} \cdot a} = \frac{\text{дж}}{a \cdot \text{м} \cdot a} = \frac{a \cdot \text{в} \cdot \text{сек}}{a \cdot a \cdot \text{м}} = \frac{\text{ом} \cdot \text{сек}}{\text{м}}.$$

С другим, более употребительным выражением размерности μ мы познакомимся в § 305.

§ 292. Магнитные свойства веществ. Мы уже говорили, что резко выраженной способностью намагничиваться обладают железо, никель, кобальт. Этим свойством они обладают и в чистом виде, и в виде ряда сплавов. Такие вещества называются **ферромагнитными**. Намагничение ферромагнитных веществ возможно только в кристаллическом состоянии и притом при температурах, не превышающих некоторого предела (например, у железа при температурах не выше 770°С).

Все остальные вещества, а также и ферромагнитные вещества при высоких температурах, обнаруживают магнитные свойства в очень слабой степени. Одни из этих веществ, будучи помещены в магнитное поле, намагничиваются так, что немного усиливают намагничивающее их поле. Такие вещества называются **парамагнитными** (алюминий, кислород). Ферромагнитные вещества при высоких температурах, при которых их ферромагнетизм исчезает, приобретают свойства парамагнитных тел (например, железо при температуре выше 770°С). Другие вещества намагничиваются в магнитном поле так, что немного ослабляют поле. Они называются **диамагнитными** (медь, сера, азот). Слабое намагничение

у пара- и диамагнитных веществ обнаруживается во всех состояниях — в кристаллическом, в жидком, в газообразном. Отсюда можно сделать заключение, что магнитными свойствами обладают сами атомы таких веществ, независимо от того, находятся ли вблизи них другие атомы.

Магнитная проницаемость парамагнитных веществ немного больше магнитной проницаемости вакуума, а магнитная проницаемость диамагнитных веществ — немного меньше нее. Так как эта разница ничтожна, то при технических расчетах обычно принимают, что магнитная проницаемость всех неферромагнитных веществ равна магнитной проницаемости вакуума, т. е. $4\pi 10^{-7}$ ед. СИ.

У ферромагнитных веществ магнитная проницаемость значительно больше магнитной проницаемости вакуума и в отличие от пара- и диамагнитных веществ не является постоянной величиной.

В настоящее время можно считать доказанным, что магнитные свойства атомов обусловлены движениями электронов вокруг ядер атомов, соответствующими круговым токам. Этими движениями обусловлены слабые магнитные свойства, которые обнаруживаются у всех веществ.

В немагнитном веществе расположение атомных магнетиков является совершенно хаотичным. Поэтому их общее магнитное поле, складывающееся из множества полей всевозможных направлений, равно нулю. Под действием внешнего магнитного поля атомные магнетики, продолжая свое тепловое движение, располагаются все же преимущественно в направлении внешнего поля. При этом магнитные поля отдельных атомных магнетиков, налагаясь друг на друга, дают магнитное поле, которое и обнаруживается в окружающем пространстве: возникает намагничение тела.

Кроме магнитного поля, обусловленного движением электронов вокруг ядер атомов, электронам присуще еще собственное магнитное поле. Это поле таково, как будто электрон вращается подобно волчку. Ферромагнитные явления связаны именно с собственным полем электронов.

Обратимся к свойствам ферромагнитных веществ. В настоящее время выяснено, что кристаллы ферромагнетиков состоят из большого числа очень маленьких областей, в каждой из которых атомные магнетики все расположены в одинаковом направлении, так что их действия взаимно усиливают друг друга. Такие области называют областями самопроизвольного намагничения, или доменами. Общее направление атомных магнетиков в отдельной области может быть различным, но при отсутствии внешнего поля устойчивыми направлениями самопроизвольного намагничения в отдельных мелких кристалликах ферромагнетика (например, железа) являются только три направ-

вления. Эти направления взаимно-перпендикулярны и определяются расположением узлов в кристаллической решетке (рис. 387).

На рисунке показано, что при отсутствии внешнего поля в каждом кристалле имеются домены, магнитные поля которых составляют замкнутые цепи со взаимноперпендикулярными и с антипараллельными направлениями. Во внешнем по отношению

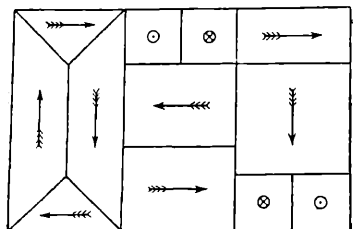


Рис. 387. Примерная схема расположения доменов. Стрелки показывают направления магнитных полей в доменах.

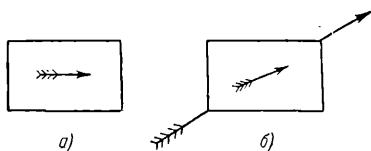


Рис. 388. а) Направление домена при отсутствии внешнего поля; б) тот же домен при наличии внешнего поля, направление которого показано длинной стрелкой.

к кристаллу пространстве магнитные поля доменов не проявляются. Если же железо помещено в магнитное поле, в доменах происходят изменения, в результате которых магнитные поля доменов проявляются и вне кристалла.

Во-первых, атомные магнитики в доменах могут повернуться, приближаясь к направлению внешнего поля (рис. 388). Во-вторых,

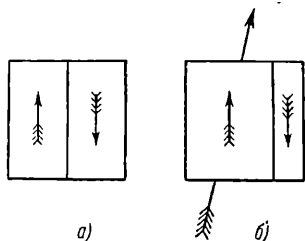


Рис. 389. а) Два домена противоположного направления; б) при наличии внешнего поля, направление которого близко к направлению левого домена, он растет за счет правого.

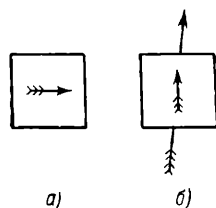


Рис. 390. а) Домен при отсутствии внешнего поля; б) тот же домен при наличии внешнего поля «опрокинулся» в направлении, перпендикулярном к первоначальному.

домены с направлением, наиболее близким к направлению внешнего поля (рис. 389, а), могут расти за счет соседних, причем граница между ними смещается (рис. 389, б). Наконец, возможен поворот на 90° всех магнитиков в домене скачком («опрокидывание»), причем направление магнитиков в домене приближается к направлению внешнего поля (рис. 390).

В результате таких процессов общее поле всех доменов вне кристалла уже не равно нулю и усиливает (иногда во много тысяч раз) внешнее поле. Если речь идет о кольцевом сердечнике, в котором внешнее поле обусловлено током в обмотке, навитой на сердечник (рис. 372), то в нем все домены расположены цепочками, и их взаимное влияние поддерживает упорядоченное расположение доменов. При выключении тока в обмотке внешнее поле исчезает, но взаимное влияние доменов продолжает действовать, а потому сердечник сохраняет намагниченность почти полностью (см. § 280). Если сердечник не замкнут в кольцо, а имеет, например, форму цилиндра, то на основаниях цилиндра взаимное влияние доменов ослаблено и домены возвращаются к структуре, показанной на рис. 387. Затем такие же процессы происходят и в доменах, расположенных в глубине, и железо почти полностью размагничивается.

Постоянные магниты изготавливаются не из чистого железа, а из сплавов железа с неферромагнитными веществами, прежде всего с углеродом (сталь). При наличии этих веществ между доменами образуются прослойки, которые мешают доменам возвращаться к структуре, показанной на рис. 387 и тем самым затрудняют размагничивание.

§ 293. Ферромагнетики в переменном магнитном поле. Рассмотрим, какие явления будут происходить, если поместить ферромагнетик в переменное магнитное поле, т. е. поле, индукция которого не сохраняет постоянного значения, а изменяется по величине или направлению.

Поставленный вопрос имеет первостепенное значение в практической электротехнике, где часто приходится иметь дело с намагничиванием и размагничиванием сердечников трансформаторов и различных электрических аппаратов и машин.

Исключительно большое значение в исследовании намагничивания ферромагнетиков имеют работы А. Г. Столетова, установившего (1871 г.) зависимость между напряженностью магнитного поля и намагниченностью ферромагнетика.

Различные материалы характеризуются кривыми намагничивания различных видов (рис. 391). Обычно на координатных осях

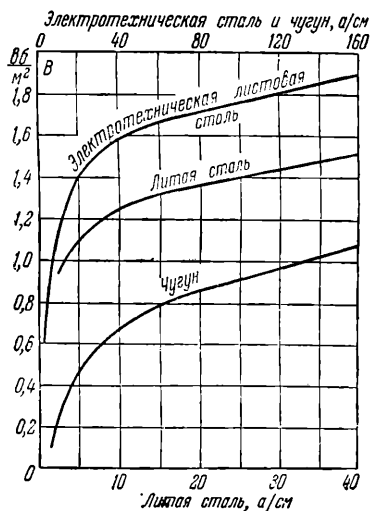


Рис. 391. Кривые намагничивания для стали и чугуна.

в этих случаях откладываются B и H . Такие кривые дают исходный материал для расчетов в электротехнике.

§ 294. Гистерезис. В практических применениях ферромагнетиков очень большую роль играет явление гистерезиса, наблюдаемое при переменном намагничивании и размагничивании ферромагнетиков *). Этим термином обозначается отставание изменения магнитной индукции от изменения напряженности внешнего поля. Причиной этого является продолжающееся влияние доменов предыдущего магнитного состояния на переход к новому при изменившейся напряженности поля.

Рассмотрим процесс циклического перемагничивания подробнее (рис. 392). Поместим ненамагниченный сердечник внутрь соленоида и, пользуясь реостатом, будем постепенно усиливать ток, протекающий по соленоиду, а с ним и напряженность магнитного поля внутри соленоида (ампер-витки на сантиметр).

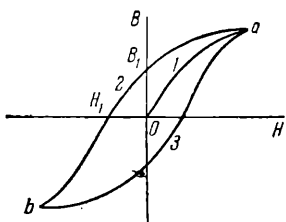


Рис. 392. Петля гистерезиса.

Кривая намагничения сердечника, ранее не подвергавшегося намагничиванию, называется кривой первоначального намагничения (линия Oa на рис. 392). Доведя намагничение до насыщения, будем уменьшать ток и напряженность магнитного поля. Сердечник начнет размагничиваться, но кривая обратного изменения магнитной индукции его не будет совпадать с кривой первоначального намагничения, а пойдет несколько выше, т. е. для какого-нибудь значения H величина B не успевает упасть до того значения, которое она имела при первоначальном намагничивании.

Когда ток и напряженность поля будут равны нулю, индукция сохранит еще некоторое значение B_1 («остаточная индукция», отрезок OB_1). Для полного размагничивания придется изменить направление тока и поля, и тогда при некотором значении напряженности H_1 ферромагнетик размагнитится. Значение напряженности, при котором это произойдет, называется «задерживающей» или коэрцитивной силой.

При дальнейшем увеличении напряженности происходит перемагничивание. В точке b достигается насыщение.

При новом уменьшении напряженности процесс размагничивания пойдет снова с запозданием против первоначальной кривой и в точке a кривая гистерезиса замкнется, образуя так называемую «петлю гистерезиса».

*) От греческого *hysterésis* — запаздывание.

Форма петли гистерезиса различна у различных материалов. Для мягкого, отожженного железа гистерезис выражен слабо, петля получается узкая. Закаленная сталь дает широкую петлю гистерезиса (рис. 393). Перемагничивание ферромагнетиков, конечно, связано с затратой энергии на изменение расположения доменов. Затраченная энергия превращается во внутреннюю энергию — сердечники нагреваются.

Величина остаточной индукции и величина коэрцитивной силы зависят от природы материала. Для изготовления постоянных магнитов выгоднее брать стали с большой коэрцитивной силой. Напротив, для сердечников трансформаторов и электрических машин, подвергающихся действию переменного магнитного поля, выгоднее применять сорта стали с малой коэрцитивной силой (трансформаторная сталь).

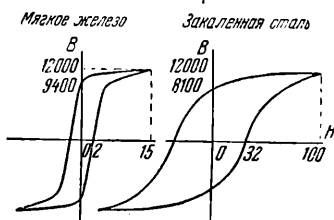


Рис. 393. Кривые гистерезиса мягкого железа и закаленной стали.

§ 295. Точка Кюри. Величина намагниченности ферромагнетика уменьшается при нагревании и при некоторой температуре обращается в нуль. Эта температура называется точкой Кюри. Для железа она равна 1042°K . При этой температуре железо теряет свои ферромагнитные свойства. Это объясняется тем, что в точке Кюри интенсивность теплового движения атомов ферромагнетика оказывается достаточной для разрушения его доменов и в результате ферромагнетик превращается в парамагнетик.

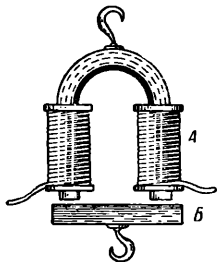


Рис. 394. Электромагнит.

А — электромагнит; В — якорь.

ный якорь (рис. 394).

Сила притяжения якоря В к полюсам электромагнита А тем больше, чем больше число витков провода в катушке и чем больше ток в ней, и зависит, кроме того, от формы и размеров железного сердечника.

Важным случаем применения электромагнитов является электромагнитное реле (рис. 395) — приспособление для замыкания цепи сильного тока посредством слабого тока.

§ 296. Электромагниты. Из курса физики общеобразовательной школы известно, что электромагнитами называются катушки с железными сердечниками различной формы; последние притягивают железный якорь (рис. 394). Сила притяжения якоря В к полюсам электромагнита А тем больше, чем больше число витков провода в катушке и чем больше ток в ней, и зависит, кроме того, от формы и размеров железного сердечника.

Важным случаем применения электромагнитов является электромагнитное реле (рис. 395) — приспособление для замыкания цепи сильного тока посредством слабого тока.

Замыкание цепи производится посредством электромагнита, возбуждаемого слабым током от отдаленного источника.

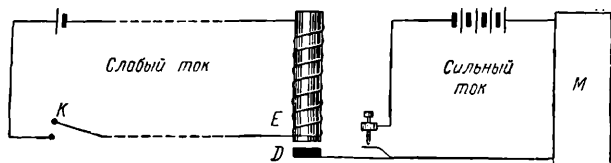


Рис. 395. Схема электромагнитного реле.

При замыкании ключа K слабый ток возбуждает электромагнит E , притягивающий якорь D и тем замыкающий цепь сильного тока, питающего прибор M .

§ 297. Устройство электроизмерительных приборов. Одним из применений магнитного действия тока являются приборы для измерения тока и напряжения.

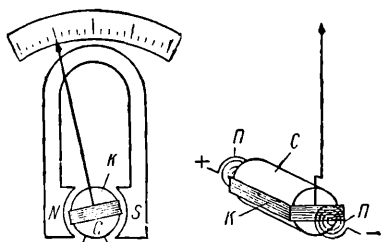


Рис. 396. Схема устройства магнито-электрического измерительного прибора.

На рис. 396 показана схема устройства одного из таких приборов. Между полюсами постоянного магнита располагается легкая катушка K . Внутри нее помещается с целью усиления магнитного поля неподвижный железный сердечник C . Ток в катушку поступает по металлическим пружинкам $П$. При отсутствии тока пружинки удерживают катушку в горизонтальном положении.

Пусть на рис. 396 ток в левой части катушки идет от нас, а в правой — к нам. На основании правила левой руки можно заключить, что левая часть катушки будет опускаться, а правая — подниматься, т. е. катушка повернется. Угол поворота будет тем большим, чем сильнее ток.

Такой прибор называется гальванометром. Он очень чувствителен и может регистрировать весьма слабые токи. Его можно приспособить и для измерений тока (т. е. обратить его в амперметр), и для измерений напряжения (т. е. обратить его в вольтметр).

В первом случае надо присоединить параллельно катушке гальванометра шунт небольшого сопротивления (рис. 397). Тогда большая часть тока пройдет через шунт и лишь небольшая часть ответится на катушку прибора. Изменяя сопротивление шунта, можно

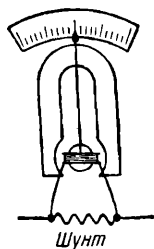


Рис. 397. Схема амперметра.

добиться, чтобы при токе в цепи в 1 а в катушке шел ток, вызывающий отклонение стрелки на одно деление, при токе в 2 а — на два деления и т. д. Гальванометр с таким шунтом является амперметром.

Чтобы обратить гальванометр в вольтметр, нужно присоединить последовательно к его катушке большое сопротивление (рис. 398). Это сопротивление подбирается так, чтобы при напряжении в 1 в стрелка прибора отклонялась на одно деление и т. д.

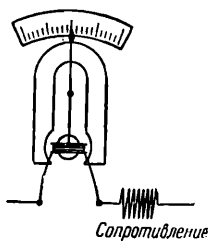


Рис. 398. Схема вольтметра.

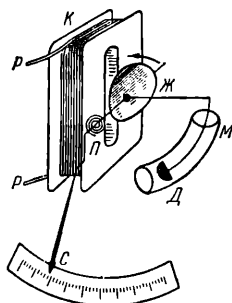


Рис. 399. Устройство технического электромагнитного измерительного прибора.
РР — подводящие провода.

Описанные приборы называются магнитоэлектрическими. В технике часто употребляются измерительные приборы другого типа, называемые электромагнитными. В них ток идет через неподвижную катушку K (рис. 399). При этом катушка втягивает небольшой кусочек железа $Ж$, что вызывает поворот скрепленной с ним стрелки $С$. Пластинка $Д$,двигающаяся при перемещении стрелки внутри изогнутой коробки $М$, служит для успокоения колебаний стрелки, мешающих отсчету.

Электромагнитные приборы дают отклонение стрелки всегда в одну сторону, независимо от направления тока. Они проще и дешевле магнитоэлектрических, но менее точны.

У п р а ж н е н и е

418. а) В амперметре одно деление шкалы соответствует току 1 а . Какова будет цена его деления, если присоединить к нему второй шунт, сопротивление которого равно сопротивлению амперметра? если сопротивление второго шунта в два раза меньше сопротивления амперметра?

б) В вольтметре одно деление шкалы соответствует 1 в . Какова будет цена его деления, если последовательно с ним включить второе дополнительное сопротивление, равное сопротивлению вольтметра? в два раза меньшее сопротивление?

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 298. **Опыты Фарадея.** Напомним основные опыты по электромагнитной индукции (опыты Фарадея), известные из курса физики общеобразовательной школы.

Составив цепь из катушки и гальванометра (рис. 400), вдвинем в катушку магнит (например, северным полюсом влево). В момент вдвигания стрелка гальванометра отклонится, а затем, при остановке магнита, вернется к нулю. При выдвигании магнита (вправо или влево) стрелка гальванометра снова отклонится, но уже в обратном направлении. Если вдвигать магнит в катушку южным полюсом, то отклонение стрелки гальванометра произойдет в направлении, противоположном случаю вдвигания северного полюса.

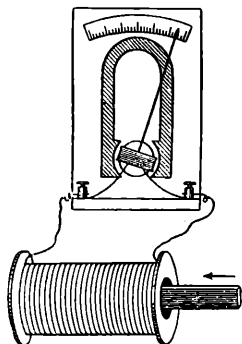


Рис. 400. При вдвигании магнита в катушку стрелка гальванометра отклоняется.

Вместо того чтобы вдвигать магнит в катушку, можно, наоборот, оставить магнит неподвижным и надвигать катушку на него. Можно также вместо магнита приближать и удалять электромагнит, по обмотке которого идет ток. Действие останется тем же.

Мы знаем (§ 243), что для получения тока в цепи нужно наличие в ней источника тока, в котором за счет траты той или иной формы энергии создается электродвижущая сила (эдс).

Что же служит источником тока в описанном опыте? Очевидно, катушка, внутри которой движется магнит. При движении магнита магнитный поток, пронизывающий катушку, меняется (рис. 401): при вдвигании увеличивается, при выдвигании уменьшается. Итак, изменение магнитного потока, пронизывающего катушку, связано с появлением эдс в витках катушки.

Можно ту же мысль выразить иначе. Когда магнит вдвигается в катушку, то витки катушки пересекают магнитные силовые линии.

Вообще *всегда*, когда проводник пересекает магнитные силовые линии, в нем наводится эдс.

Это явление называется **электромагнитной индукцией** *). Оно было открыто Фарадеем в 1831 г. Ток, вызванный электромагнитной индукцией, называется **индукционным**.

§ 299. Закон Ленца. Каково происхождение энергии индукционного тока, возникающего в катушке при движении в ней магнита? Очевидно, работу, результатом которой является эта энергия, производит сила, движущая магнит. Катушка, в которой появляется ток, приобретает свойства магнита и, следовательно, может взаимодействовать с движущимся магнитом. При этом направление тока в катушке таково, что взаимодействие препятствует движению магнита: при приближении магнита катушка отталкивает его, а при удалении, наоборот, притягивает. За счет работы, производимой механической силой по преодолению этого противодействия, и создается энергия тока в цепи.

Как установил в 1834 г. Э. Х. Ленц, это положение можно обобщить: *направление индукционного тока таково, что его магнитное поле тормозит движение, вызывающее электромагнитную индукцию* (закон Ленца).

Тормозящее действие индукционного тока можно обнаружить в следующем опыте. Качания сплошного алюминиевого кольца, подвешенного на двух нитках, затухают медленно, так как сопротивление воздуха незначительно. Если же поставить сильный магнит (или электромагнит) так, чтобы кольцо в своем движении надевалось на один из его полюсов (рис. 402), то качания быстро прекратятся. В кольце возникает индукционный ток, который нагревает его. Таким образом, уменьшение кинетической энергии движущегося кольца связано с увеличением его внутренней энергии.

Еще яснее тормозящее действие индукционного тока видно из такого опыта. Небольшая машинка, служащая для получения тока посредством электромагнитной индукции (B на рис. 403), приводится во вращение опускающимся грузом A через шкив. Машинка может давать электрический ток для питания лампочки C . Приведем машинку во вращение, не включая лампочки. Груз стремительно падает вниз, так как трение в машинке мало. Теперь включим

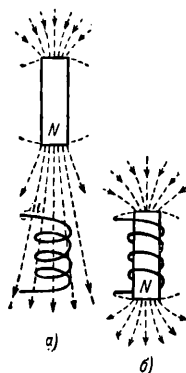


Рис. 401. а) Магнит отдален от катушки, и магнитный поток в катушке мал; б) магнит вдвинут в катушку, и магнитный поток в катушке велик.

*) Здесь слово «индукция» имеет смысл некоторого явления, тогда как термин «индукция магнитного поля» имеет смысл некоторой величины.

лампочку и вновь приведем машинку во вращение. Груз падает вниз теперь медленно, а лампочка загорается. Таким образом, вследствие противодействия индукционного тока работа силы тяжести почти не увеличивает кинетической энергии груза, но зато вызывает появление электрической энергии, за счет которой нагревается волосок лампочки. В случае мощных динамомашин разница в мощности, которую надо прилагать для вращения нагруженной машины и машины, работающей холостую громадна.

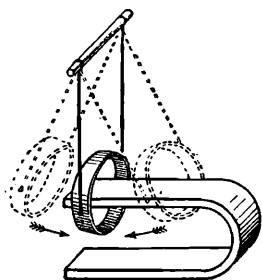


Рис. 402. Торможение качаний алюминиевого кольца.

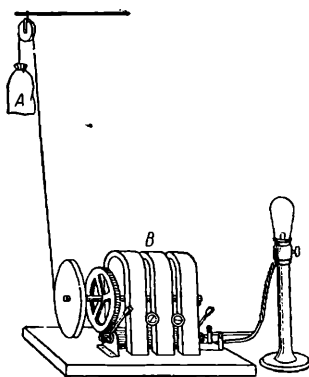


Рис. 403. При движении вниз груза *A* машинка *B* дает ток, питающий лампу *C*.

Из сказанного ясно, что закон Ленца есть выражение закона сохранения энергии для электромагнитных явлений.

§ 300. Электродвижущая сила индукции. Если вдвинуть в катушку один раз сильный магнит, а другой раз — слабый, то во втором случае ток получится более слабый. При этом чем быстрее вдвигается магнит, тем сильнее ток. Значит, эдс в катушке тем больше, чем быстрее меняется магнитный поток в катушке. Кроме того, эдс тем больше, чем больше число витков в катушке. Это станет понятным, если рассматривать каждый отдельный виток катушки как элемент источника тока, а катушку — как батарею таких элементов, включенных последовательно и согласно (см. § 263).

Выведем формулу для расчета эдс индукции. Сперва возьмем один виток. При вдвигании в него магнита получается индукционный ток I , который в течение малого отрезка времени Δt можно считать постоянным. Если при движении магнита за малый отрезок времени Δt магнитный поток в витке изменился на $\Delta\Phi$, то (§ 290) была произведена механическая работа (например, силой руки)

$$A_1 = I\Delta\Phi.$$

За счет этой работы в источнике тока (виток) произведена работа

$$A_2 = EI\Delta t,$$

где E — эдс за время Δt .

На основании закона сохранения энергии можем написать:

$$A_1 = -A_2$$

и

$$EI\Delta t = -I\Delta\Phi.$$

Отсюда

$$E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Электродвижущая сила индукции в витке равна отношению изменения магнитного потока в витке к отрезку времени, в течение которого это изменение произошло.

Это отношение можно назвать скоростью изменения магнитного потока. Поэтому можно сказать, что эдс индукции в витке равна скорости изменения пронизывающего виток магнитного потока (взятой с обратным знаком).

В катушке, имеющей n витков, эдс в n раз больше, чем в одном витке:

$$E = -n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

В системе единиц СИ магнитный поток выражается в *вб*, время — в *сек*, эдс — в *в*. Пусть, например, при вдвигании магнита в катушку, имеющую 1000 витков, магнитный поток, пронизывающий ее, меняется за 0,1 *сек* на 0,0005 *вб*. Средняя эдс индукции в катушке тогда равна

$$E = -\frac{0,0005 \text{ вб} \cdot 1000}{0,1 \text{ сек}} = -5 \text{ в}.$$

Почему в формуле для эдс индукции стоит знак минус? Он означает, что эдс, а следовательно, и индукционный ток, всегда противоположны по знаку изменению магнитного потока. Если магнитный поток увеличивается, то индукционный ток имеет такое направление, что его магнитное поле уменьшает поток, и наоборот. Отсюда ясно, что знак минус в формуле для эдс индукции есть следствие закона Ленца.

У п р а ж н е н и я

419. В катушку, имеющую 2000 витков, вдвигается за 0,2 *сек* постоянный магнит, причем магнитный поток в катушке увеличивается от нуля до $5 \cdot 10^{-5}$ *вб*. Определите среднюю величину эдс индукции в катушке.

420. Два рельса, отстоящие друг от друга на 1,6 *м*, соединены проводником с сопротивлением 1 *ом*. По рельсам катится ось со скоростью 6 $\frac{\text{м}}{\text{сек}}$. Контур,

составленный проводником, рельсами и осью, пронизывается направленным почти вертикально магнитным полем Земли с индукцией $5 \cdot 10^{-5} \frac{вб}{м^2}$. Сопротивление рельсов и оси ничтожно мало. Какой ток идет по контуру?

§ 301. Правило правой руки. В технике часто необходимо определить направление эдс индукционного тока в проводнике, который пересекает магнитные силовые линии. Для этой цели удобно пользоваться правилом правой руки. *Расположим правую руку так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, а направление отогнутого большого пальца совпадало с направлением*

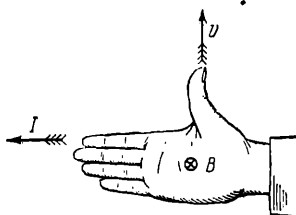


Рис. 404. Правило правой руки. Стрелки указывают направление скорости движения провода v , индукции B и тока I .

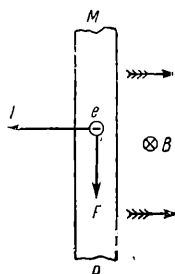


Рис. 405. Связь правил правой и левой рук.

скорости движения проводника (рис. 404). Тогда указательный палец покажет направление эдс индукционного тока.

Это правило можно связать с правилом левой руки, которое мы установили для силы, действующей на ток в магнитном поле. Пусть PM на рис. 405 изображает участок провода, движущегося в магнитном поле, направленном перпендикулярно к плоскости чертежа от нас. Направление движения провода показано двумя стрелками. Согласно правилу правой руки при этом должен возникнуть ток, направленный от P к M . Рассмотрим электрон e . Двигаясь вместе с проводом вправо, он тем самым создает ток I , направленный влево. Применив к этому току правило левой руки, мы увидим, что на электрон действует сила, направленная вниз. Эта сила вызывает перемещение электрона от M к P , т. е. ток, направленный от P к M .

Итак, при электромагнитной индукции силой, заставляющей заряды двигаться внутри источника тока против направления, в котором на них действует электрическое поле (сторонней силой), является сила действия магнитного поля на движущиеся заряды.

У п р а ж н е н и е

421. Определите направление индукционного тока в кольце, показанном на рис. 354, если оно движется слева направо, а северный полюс магнита наверху.

§ 302. Электромагнитная индукция при изменении тока. В § 298 мы рассмотрели электромагнитную индукцию тока в катушке при движении в ней магнита или электромагнита, по обмотке которого идет ток.

Можно получить индукцию тока иначе. Вставим в катушку, замкнутую на гальванометр, катушку с сердечником (рис. 406) и будем включать и выключать ток в последней катушке (или усиливать и ослаблять его посредством реостата). При включении (или при усилении) тока стрелка гальванометра будет отклоняться в одну сторону, при выключении (или ослаблении) — в другую.

Этот опыт показывает, что включение или усиление тока в обмотке электромагнита производит совершенно то же действие, как и приближение магнита. Число магнитных силовых линий, пронизывающих катушку, увеличивается. Выключение или ослабление тока равносильно, наоборот, удалению магнита.

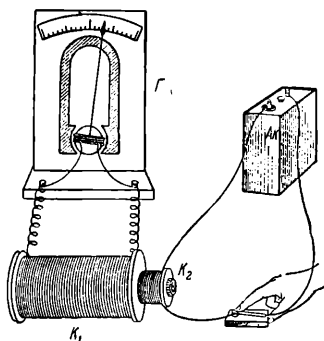


Рис. 406. В моменты включения и выключения тока в катушке K_2 стрелка гальванометра G отклоняется.

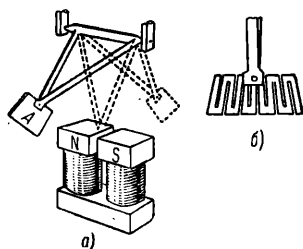


Рис. 407. а) При включении тока в обмотке электромагнита колебания маятника A , сделанного из сплошного куска алюминия, быстро затухают; б) маятник, сделанный из куска алюминия с прорезьями, почти не тормозится магнитным полем.

У п р а ж н е н и е

422. Если вставить одну катушку в другую, соединить одну из них с гальванометром, а другую — с аккумулятором и затем вдвигать в них и выдвигать железный сердечник, то во время движения сердечника стрелка гальванометра отклоняется то в одну, то в другую сторону. Объясните, почему.

§ 303. Токи в сплошных проводниках. Мы видели, что при изменениях магнитного поля в проводниках, образующих замкнутую цепь (например, в металлическом кольце), возникают индукционные токи. Индукционные токи образуются также в любых сплошных проводниках, если внутри них меняется магнитное поле. Эти токи называются в их ре вы ми т о к а м и, или т о к а м и Ф у к о.

О наличии токов Фуко свидетельствует, например, такой опыт. Если между полюсами электромагнита качается маятник, сделанный из сплошного куска алюминия (рис. 407, а), то при включении

тока в обмотке электромагнита маятник быстро тормозится. Если же маятник сделан из куска алюминия с большим числом прорезей (рис. 407, б), то он тормозится очень слабо. Очевидно, торможение вызывается, согласно закону Ленца (§ 299), индукционными токами в маятнике, т. е. токами Фуко. Прорези уменьшают токи Фуко и вызываемое ими торможение.

У п р а ж н е н и я

423. В некоторых электроизмерительных приборах (например, в электросчетчиках) имеется тормоз в виде алюминиевого диска, вращающегося на оси между полюсами постоянного магнита (рис. 408). Почему торможение тем сильнее, чем быстрее движется диск?

424. При производстве стеклянных вакуумных приборов надо прогреть металлические части, расположенные внутри стеклянной колбы. Для этого колбу помещают в быстро меняющееся магнитное поле, в котором металлические части сильно нагреваются, в то время как стеклянные остаются холодными. Объясните, почему.

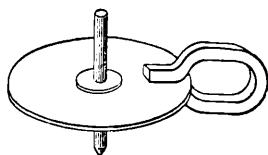


Рис. 408.

§ 304. Самоиндукция. При размыкании тока, например от аккумулятора, в месте разрыва цепи часто проскакивает искра. Особенно сильные искры получаются, если в цепь включен электромагнит. Появление их указывает на наличие в месте размыкания цепи довольно высокого напряжения, во всяком случае более высокого, чем может создавать эдс аккумулятора. Отсюда ясно, что при размыкании цепи в каких-то ее участках возникает новая эдс, отсутствовавшая, пока ток в цепи оставался постоянным. Возникновение эдс в какой-либо цепи при изменении тока в ней называется с а м о и н д у к ц и е й.

Составим цепь из аккумулятора, реостата и электромагнита. Будем менять ток в цепи посредством реостата. При этом будет меняться и магнитное поле в электромагните. Но изменение магнитного поля в сердечнике электромагнита связано с возникновением эдс индукции в его обмотке.

Таким образом, во время изменения тока в цепи действует не один источник тока, как при постоянном токе, а два: аккумулятор и обмотка электромагнита. Эдс самоиндукции, возникающая при изменении тока в цепи, согласно закону Ленца направлена встречно току при его нарастании и попутно при убывании тока. Поэтому при включении тока в цепи он достигает полной величины постепенно.

Это явление имеет место всегда. Но в случаях, когда включаемые приборы создают лишь очень слабое магнитное поле (например, при включении электрических ламп), ток нарастает быстро и через сотые доли секунды практически уже не отличается от уста-

новившегося значения тока. При включении мощных электромагнитов, создающих большие магнитные потоки, это время может достигать нескольких секунд.

На рис. 409 изображена схема опыта, иллюстрирующего описанное явление. При замыкании ключа K лампочка L_1 , включенная последовательно с обмоткой электромагнита M , начинает гореть в полной мере заметно позже, чем такая же лампочка L_2 , включенная последовательно с реостатом R .

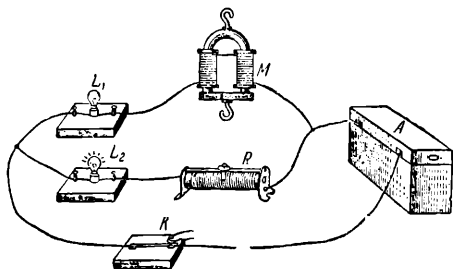


Рис. 409. Опыт, иллюстрирующий явление самондукции при замыкании цепи, A — источник тока.

В момент выключения тока в обмотке электромагнита возникает эдс самоиндукции, имеющая то же направление, что и ток. Эта эдс обычно значительно больше напряжения в цепи. Вследствие этого в месте разрыва цепи (у ключа) получается настолько большое напряжение, что может проскакивать искра (для появления которой необходимы напряжения порядка сотен вольт).

У п р а ж н е н и е

425. Почему искры, проскакивающие между трамвайной дугой и воздушным проводом, значительно уменьшаются, если водитель выключает мотор, так что ток идет только через лампы?

§ 305. Индуктивность. Мы уже указали, что в различных цепях (например, с разными катушками) эдс самоиндукции при одном и том же изменении тока неодинакова. Для характеристики катушек в этом отношении пользуются величиной и н д у к т и в н о с т и. *Индуктивность катушки характеризуется той эдс, которая возникает в ней при изменении тока на 1 а в течение 1 сек.*

Единицей индуктивности служит генри (сокращенно *гн*). *Генри есть индуктивность такой катушки, в которой при изменении тока на 1 а в течение 1 сек возникает эдс, равна 1 в.*

Индуктивность катушки пропорциональна числу витков в ней и зависит от формы и размеров катушки. Особенно велика индуктивность катушки при наличии в ней железного сердечника. Например, индуктивность катушки из 100 витков длиной 10 см и диаметром 20 см без сердечника равна 0,002 гн. При введении внутрь катушки железного сердечника индуктивность ее повышается примерно до 10 гн.

Отметим, что даже один виток обладает хотя и очень малой, но все же измеримой индуктивностью.

Обозначая индуктивность катушки буквой L , мы можем записать формулу эдс самоиндукции в виде:

$$E = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

где $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ — быстрота изменения тока.

Формула эдс самоиндукции позволит нам дать другое выражение размерности магнитной проницаемости. Соотношение размерностей в формуле эдс самоиндукции

$$v = gH \frac{a}{\text{сек}}.$$

Отсюда

$$gH = \frac{v \cdot \text{сек}}{a} = \text{ом} \cdot \text{сек}.$$

Следовательно, размерность магнитной проницаемости $\text{ом} \cdot \text{сек}/\text{м}$ или $gH/\text{м}$.

Как мы увидим в главе XXIX, в радиотехнике существует необходимость менять индуктивность катушек. Это делается или посредством включения

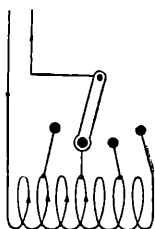


Рис. 410. Схема катушки с переменной индуктивностью.

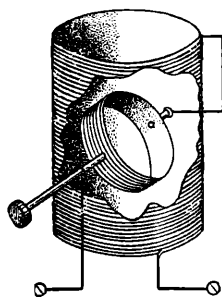


Рис. 411. Схема вариометра.

разного числа витков катушки (рис. 410), или применением двух последовательно соединенных катушек, из которых одна может вращаться внутри другой (так называемый в а р и о м е т р; рис. 411). Если магнитные поля двух катушек вариометра усиливают друг друга, то индуктивность его наибольшая. Если же повернуть внутреннюю катушку так, чтобы магнитные поля их ослабляли друг друга, то индуктивность будет малой.

Г Л А В А XXIV

ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

§ 306 Что такое переменный ток? До сих пор мы изучали свойства и применение постоянного тока, т. е. тока, величина и направление которого с течением времени не изменяются. Постоянный ток применяется в лабораторных исследованиях, в технике связи, во многих видах электротранспорта, в электрохимической промышленности. Однако гораздо более распространен переменный ток, во многих отношениях более выгодный, чем постоянный ток.

В настоящее время широкое снабжение промышленности и населения электроэнергией производится исключительно посредством переменного тока.

Постоянный ток в металлах представляет собой направленное движение свободных электронов. Переменный ток можно рассматривать как колебательное движение свободных электронов. Для того чтобы эти колебания не затухали, необходима внешняя периодически изменяющаяся сила. Такой силой является эдс генераторов электрических станций. Получаемые и поддерживаемые действующими переменными эдс колебания электронов являются вынужденными колебаниями. Переменный ток есть, таким образом, вынужденные колебания электронов в цепи.

Другие виды колебаний электронов будут рассмотрены в соответствующих главах: свободные колебания при изучении колебательного контура в радиотехнике, автоколебания — в работе лампового генератора.

§ 307. Получение переменной эдс. Чтобы понять, как получается переменная эдс, рассмотрим вращение проволочной рамки (витка или катушки) в однородном магнитном поле (рис. 412). Концы витка соединены при помощи скользящего контакта с клеммами чувствительного гальванометра.

В зависимости от положения витка он будет пронизываться магнитным потоком различной величины: максимальным при положении витка, перпендикулярном к направлению магнитных силовых линий, и равным нулю в моменты, когда плоскость витка будет совпадать с направлением магнитного поля.

Изменение магнитного потока, пронизывающего виток, будет вызывать появление электродвижущей силы, периодически меняющейся по величине и по знаку. Перемена знака будет происходить в те моменты, когда виток будет менять направление движения относительно поля на обратное. Величина же эдс будет меняться непрерывно в зависимости от скорости изменения магнитного потока. Стрелка гальванометра будет периодически отклоняться то в одну, то в другую сторону, достигая некоторого максимального (амплитудного) значения.

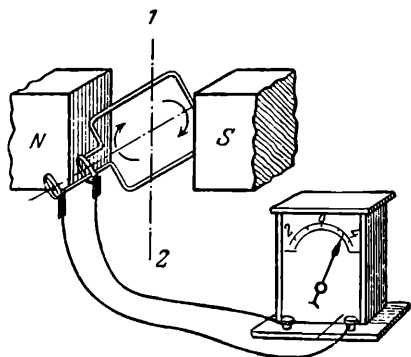


Рис. 412. Вращение витка в однородном магнитном поле.

Заменяв гальванометр осциллографом, можно наблюдать на его экране синусоидальную диаграмму изменения эдс или тока (рис. 413).

Теоретически можно доказать,

что изменения эдс при вращении витка в однородном магнитном поле происходят именно по закону синуса (рис. 414). Мгновенные

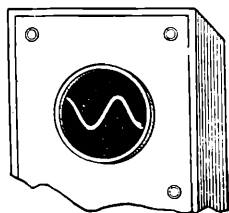


Рис. 413. Кривые тока на экране осциллографа.

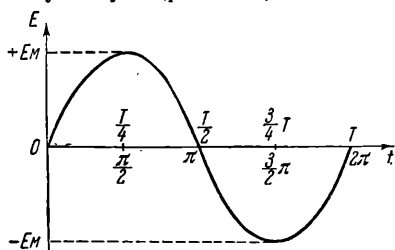


Рис. 414. График переменной эдс.

значения эдс e , т. е. значения, соответствующие положению витка в какой-нибудь определенный момент, могут быть выражены формулой, аналогичной формуле смещения при гармоническом колебании:

$$e = E_m \sin \omega t,$$

где E_m — максимальная величина эдс, ω — угловая скорость вращения витка.

Для замкнутой цепи получим соответственно формулу мгновенных значений тока i :

$$i = I_m \cdot \sin \omega t.$$

Произведение ωt в этих формулах показывает угловое смещение витка, соответствующее определенной стадии колебательного процесса, т. е. фазу процесса. Если $\omega t = 0$, то и мгновенное значение эдс (или тока) равно нулю, при $\omega t = \frac{\pi}{2}$ мгновенное значение $e = E_m$.

Отрезок времени, в течение которого эдс (или ток) совершает одно полное колебание, называется периодом T и измеряется в секундах. Число периодов в секунду называется частотой f и измеряется в герцах ($гц$). Поскольку за один оборот угловое смещение равно 2π рад, то

$$\omega = 2\pi f \frac{\text{рад}}{\text{сек}}.$$

В электротехнике для питания силовых и осветительных сетей в СССР применяется частота 50 $гц$, в радиотехнике и в некоторых установках высокой частоты применяются токи с частотой в несколько килогерц и даже мегагерц (мегагерц = 1 млн. $гц$).

Кроме синусоидальных колебаний переменного тока можно получить колебания и более сложной формы, однако синусоидальные токи имеют значительные преимущества в практическом отношении. Поэтому основным видом переменного тока в технике является синусоидальный ток.

Упражнение

426. Сколько раз изменится направление тока за 1 сек при частоте 50 $гц$?

§ 308. Генератор синусоидального переменного тока. Описанная выше принципиальная схема генерирования синусоидальной переменной эдс не применяется на практике: воздушные пространства между полюсами магнита и якорем вызывают большие магнитные потери. Поэтому полюсным наконечникам магнита (индуктора) придают такую форму, чтобы они охватывали якорь наиболее плотно, и притом воздушный зазор между полюсами индуктора и якорем делается не одинаковым, а с таким расчетом, чтобы сам магнитный поток подчинялся закону синуса. Только в этом случае будет получаться ток, более точно приближающийся к синусоидальному (рис. 415).

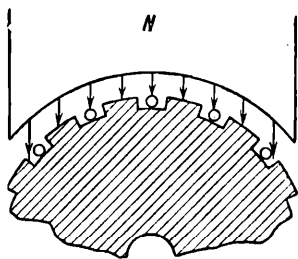


Рис. 415. Воздушный зазор между полюсом индуктора и якорем, позволяющий получить ток, близкий к синусоидальному.

Генераторы с неподвижным индуктором и подвижным якорем пригодны, однако, только для машин небольшой мощности. Генера-

торы мощностью свыше 30 *квт* *) с напряжением выше 500 *в* конструируются всегда с неподвижным якорем и вращающимся индуктором (рис. 416). При неподвижном якоре отпадает необходимость устройства скользящего контакта с кольцами и щетками и, следовательно, устраняются потери энергии в нем. Индуктор же представляет систему электромагнитов, питаемых относительно слабым током и при меньшем напряжении, и потому подвод тока для питания электромагнитов осуществить легче. Источник постоянного тока для питания индуктора — это генератор постоянного тока, размещаемый обычно на общем валу с индуктором. Неподвижная часть (якорь) называется статором, вращающийся индуктор — ротором. Ротор приводится в движение гидравлическим или тепловым двигателем. Сочетание турбины с генератором переменного тока называется турбогенератором.

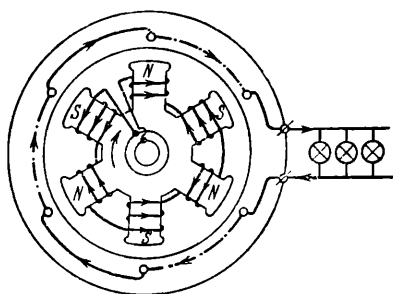


Рис. 416. Принципиальная схема генератора переменного тока с вращающимися полюсами.

Рис. 416. Принципиальная схема генератора переменного тока с вращающимися полюсами.

§ 309. Действующее (эффективное) значение переменного тока и напряжения. Как измерить и оценить величину и напряжение переменного тока? Ведь если частота тока 50 *гц*, то это значит, что весь цикл изменений мгновенных значений тока протекает за $\frac{1}{50}$ долю секунды. Магнитоэлектрический прибор (вольтметр или амперметр) не успевает следить за столь быстрыми изменениями, и стрелка такого прибора лишь дрожит около нулевого деления шкалы.

Однако прибор электромагнитного типа покажет вполне определенное значение. Изменение направления тока не оказывает влияния на втягивание железа в катушку такого прибора.

Если бы изменения тока были медленными, то можно было бы наблюдать как стрелка электромагнитного прибора отклонялась бы от нуля, доходила до некоторого максимума, потом снова постепенно возвращалась к нулю, с тем чтобы во второй половине цикла начать новое отклонение в ту же сторону. Если же изменения тока происходят быстро, то стрелка не успевает ни достичь максимального отклонения, ни вернуться к нулю, а останавливается на каком-то промежуточном делении между нулем и максимумом.

*) Мощность генераторов переменного тока по причинам, которые будут выяснены ниже, указывается не в *квт*, а в киловольт-амперах (*квта*).

Опыт и теория показывают, что это промежуточное значение меньше максимального в $\sqrt{2}$ (приблизительно в 1,4) раз. Такое промежуточное значение переменного тока называют действующим или эффективным значением, потому что ток, действующее значение которого равно, например, 5 а, производит такое же тепловое действие, такой же тепловой эффект, как постоянный ток такой же величины.

Действующим значением величины переменного тока или напряжения называют величину или напряжение такого постоянного тока, который производит такое же тепловое действие, как и переменный.

Шкалы измерительных приборов для переменного тока и градуируются в эффективных значениях тока или напряжения

$$I_{\text{эф}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

В формулах и расчетах значок «эф» опускается.

Приведем некоторые соображения, поясняющие эту зависимость.

При прохождении переменного тока через сопротивление R , так же как и при прохождении постоянного тока, выделяется тепло, но так как величина переменного тока изменяется от 0 до I_m , то количество электрической энергии, превращающейся за один цикл во внутреннюю энергию, можно принять равным среднему между 0 и Q_m :

$$Q_{\text{ср}} = \frac{I_m^2 R t}{2}.$$

Для постоянного тока это же превращение энергии выразится формулой

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t.$$

Отсюда следует:

$$I^2 = \frac{I_m^2}{2}$$

и

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Аналогично для напряжения

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Отсюда

$$U_m = U \sqrt{2}.$$

Например, если напряжение осветительной сети переменного тока 127 в, то надо помнить, что в моменты максимумов напряжение достигает $127 \cdot \sqrt{2} \approx 180$ в. Знание максимальных значений

напряжения имеет значение при расчетах изоляции проводов и приборов, так как пробой изоляции может произойти в момент максимума напряжения.

У п р а ж н е н и я

427. По показанию вольтметра напряжение на клеммах розетки в сети переменного тока 220 в. Найти максимальное значение напряжения. Начертить график зависимости напряжения от времени для этого примера.

428. На какое максимальное значение напряжения должна быть рассчитана изоляция проводов сети переменного тока с действующим значением эдс 127 в?

429. Через спиральку электрической плитки идет переменный ток 5 а. Какого максимального значения достигает ток?

430. На конденсаторе указано, что он испытан на напряжение 500 в. Под какое самое большее напряжение можно подключать этот конденсатор?

§ 310. **Активное сопротивление переменному току.** Из учения о постоянном токе вы знаете, что энергия электрическая может превращаться в другие виды энергии: во внутреннюю (нагревание проводов и приборов), в механическую (в электродвигателях), в химическую и др. Необратимо потребляемая во всех этих случаях мощность называется активной мощностью.

Деля активную мощность на квадрат тока, мы получим активное сопротивление R . В цепях, в которых единственным необратимым превращением электрической энергии является нагревание проводников током, активное сопротивление совпадает с сопротивлением проводников, вычисляемым по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

При частотах выше 50 гц активное сопротивление проводника несколько больше, чем его сопротивление постоянному току. Это объясняется тем, что под влиянием вихревых токов, вызываемых переменным магнитным полем тока, происходят ослабление тока внутри проводника и усиление его в слоях ближе к поверхности. Происходит как бы «вытеснение тока» к поверхности проводника. Вследствие такого «поверхностного эффекта» ток при высокой частоте «течет» преимущественно в тонком поверхностном слое и активное сопротивление увеличивается. Поверхностный эффект учитывается в технике высокочастотных токов. Провода линий высокочастотных токов делают в виде полых труб. Поверхности некоторых деталей в радиотехнике покрывают тонким слоем серебра, которое, как известно, является наилучшим проводником. Токи высокой частоты используются для поверхностной закалки стали в тех деталях машин, где желательно увеличить стойкость к истиранию поверхности, избежав в то же время возникновения хрупкости, неизбежной при обычной закалке (зубчатые колеса).

Пропорциональность U и I в цепях с одним только активным сопротивлением справедлива как для эффективных, так и мгновенных значений. Отсюда следует, что ток и напряжение в таких цепях в процессе своего изменения находятся в одинаковых фазах: одновременно возрастая от нуля, одновременно проходя через максимумы, одновременно меняя знак и т. д. (рис. 417).

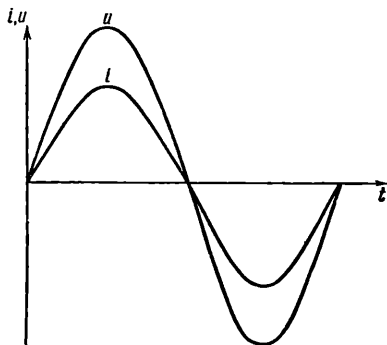


Рис. 417. Графики тока и напряжения в цепи с активной нагрузкой.

§ 311. Емкостное сопротивление. Рассмотрим теперь цепь с включенной в нее емкостью. Если в цепь постоянного тока включить конденсатор и последовательно с ним высокоомный вольтметр, который будет играть роль миллиамперметра, то можно будет наблюдать, что при замыкании цепи стрелка вольтметра сначала резко отклонится, а потом постепенно вернется к нулю по мере того, как пластинки конденсатора заряжаются до разности потенциалов, равной приложенному напряжению. По-

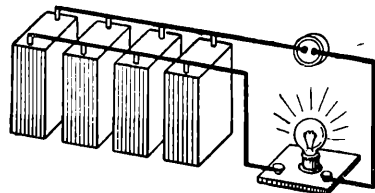


Рис. 418. Переменный ток проходит через конденсатор.

стоянный ток, таким образом, через конденсатор не проходит. Если же конденсатор включить в цепь переменного тока, то будет происходить колебательный процесс, состоящий в последовательной зарядке и разрядке конденсатора. Несмотря на наличие диэлектрика между пластинами конденсатора, переменный ток не прекращается — лампочка, включенная последовательно с батареей конденсаторов, горит, хотя и не полным накалом (рис. 418). Свечение лампочки при этом тем ярче, чем больше емкость конденсатора.

Если отключить батарею конденсаторов и вместо нее замкнуть цепь сплошным проводником, то накал лампочки становится полным. Следовательно, конденсатор в цепи переменного тока, хотя и не прерывает тока, но оказывает ему некоторое сопротивление. Это сопротивление называется емкостным сопротивлением.

Измеряя величину тока при разных значениях емкости, можно убедиться, что емкостное сопротивление X_C обратно пропорционально емкости C .

Пользуясь источником тока, частоту которого можно изменять, убедимся, что емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте тока f , или, вводя коэффициент 2π , угловой скорости ω . Итак:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi f C}.$$

Уяснению физической сущности переменного тока в цепи с емкостью поможет следующая гидравлическая аналогия.

Представим себе два сосуда A и B , соединенных гибкой трубкой с промежуточной камерой C , которая разделяется эластичной перепонкой M (рис. 419). За-

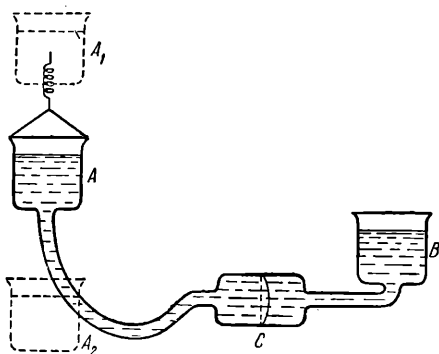


Рис. 419. Гидравлическая аналогия цепи переменного тока при наличии емкости.

ставим сосуд A колебаться между крайними положениями A_1 и A_2 по закону гармонического колебания, для чего стоит только привязать сосуд A к концу довольно длинной и мягкой пружины.

При колебаниях пружины с сосудом жидкость будет то устремляться по направлению от A к B , выгибая перепонку, то обратно от B к A , причем перепонка будет снова выпрямляться. Следовательно,

жидкость в соединительной трубке будет периодически перетекать в противоположных направлениях, вызывая выгибание перепонки то в одну, то в другую сторону. Таким образом, несмотря на наличие разделяющей камеру перепонки, течение жидкости будет непрерывным и переменным. Изменения разности уровней и натяжения перепонки (при достаточно широкой и короткой трубке) происходят в одно время, скорость же движения жидкости будет достигать максимума в тот момент, когда разность уровней будет проходить через нуль. Ведь в этот момент скорость движения сосуда A достигает наибольшей величины, подобно скорости маятника, проходящего через положение равновесия. Наоборот, при подходе сосуда к амплитудным положениям A_1 и A_2 натяжение перепонки достигает максимума, а скорость течения обращается в нуль (происходит перемена направления). Между разностью уровней и скоростью (величиной) тока мы видим разность фаз в четверть периода, причем ток, опережает напряжение (разность уровней).

Такую же последовательность фаз тока и напряжения мы имеем и в цепи переменного тока, содержащей емкость (при отсутствии активного и индуктивного сопротивления). В первой четверти периода на пластинках конденсатора накапливаются заряды, конденсатор запасает энергию в форме потенциальной энергии электрического поля.

К тому моменту, когда напряжение на пластинках достигает максимума и становится равным напряжению на клеммах генератора, ток прекращается, а затем меняет направление и течет из конденсатора обратно в цепь к генератору. Графики рис. 420 показывают последовательность изменения тока и напряжения.

Чем правее расположено на графике какое-нибудь значение тока или напряжения, тем оно наступает позже. Из рассмотрения графиков можно сделать вывод, что фазы напряжения наступают позже соответствующих фаз тока. Такое расхождение фаз называется сдвигом фаз. На экране осциллографа можно его наблюдать (рис. 421).

Вследствие сдвига фаз пропорциональности U и i для мгновенных значений тока и напряжения, отнесенных к одному и тому же моменту времени, не существует, но она справедлива для амплитудных, а значит, и для эффективных значений $U = X_C I$ (в цепи с чисто емкостным сопротивлением).

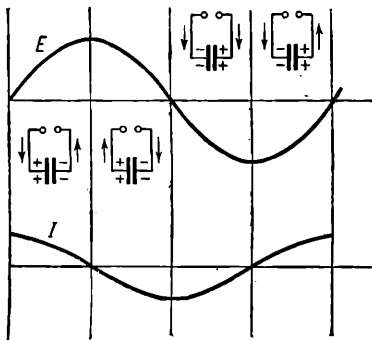


Рис. 420. Графики переменного тока и напряжения в цепи с емкостной нагрузкой.

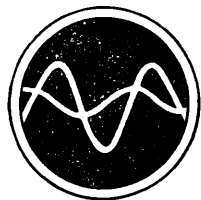


Рис. 421. Осциллограммы сдвига фаз.

У п р а ж н е н и я

431. Каково сопротивление конденсатора емкостью 2 мкф току частотой 50 гц?

432. Какой величины ток проходит через этот конденсатор при подключении его под напряжение переменного тока 220 в?

§ 312. Индуктивное сопротивление. Соединим катушку с большим числом витков с батареей аккумуляторов, включив в цепь еще амперметр постоянного тока. Амперметр покажет величину тока, определяемую по закону Ома ($I = \frac{U}{R}$).

Увеличим индуктивность катушки, вставив внутрь ее железный сердечник. Мы увидим, что величина тока от этого не изменится.

Следовательно, сопротивление постоянному току не зависит от индуктивности катушки.

Теперь присоединим ту же катушку к осветительной сети (переменного тока) последовательно с амперметром переменного тока. В этом случае при вдвигании железного сердечника в катушку мы заметим резкое уменьшение тока (рис. 422). Следовательно, наличие в цепи переменного тока индуктивности уменьшает величину тока. Наличие индуктивности равносильно наличию сопротивления в цепи переменного тока. Сопротивление, оказываемое переменному току катушкой индуктивности, называется поэтому индуктивным сопротивлением X_L .

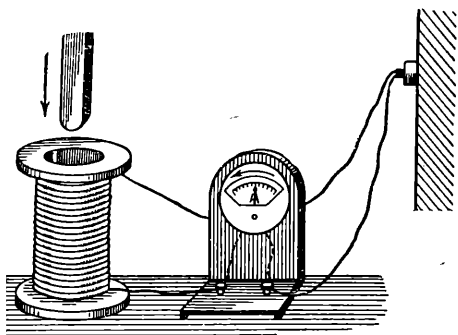


Рис. 422. Амперметр показывает резкое уменьшение переменного тока, когда в катушку введен железный сердечник.

в ней эдс самоиндукции, направленной навстречу току при его нарастании и в одну сторону с ним при убывании тока. В переменном токе величина эдс самоиндукции колеблется в зависимости от скорости изменения тока. Скорость же синусоидального тока наибольшая в моменты прохождения значений тока через нуль и она падает до нуля в моменты максимумов тока. Всегда препятствуя изменению магнитного поля (возрастанию и убыванию), самоиндукция вызывает то, что ток в цепи с индуктивностью нарастает и убывает медленнее, чем при отсутствии индуктивности: ток в цепи с чисто индуктивным сопротивлением отстает по фазе от напряжения на четверть периода (рис. 423).

Индуктивное сопротивление не вызывает необратимого поглощения энергии генератора. Эта энергия то запасается в виде энергии магнитного поля катушки, то возвращается обратно в цепь к генератору.

В отличие от активного сопротивления, вызывающего необратимые превращения энергии генератора, индуктивное и емкостное сопротивления называются реактивными. Хотя наличие реактивного сопротивления в цепи не вызывает поглощения энергии, однако циркуляция энергии от генератора к реактивному сопротив-

лению, показывают, что индуктивное сопротивление прямо пропорционально индуктивности катушки и частоте переменного тока

$$X_L = L\omega = 2\pi Lf.$$

Как объяснить действие индуктивного сопротивления? Вспомним, что всякое изменение тока в цепи связано с возникновением

лению и обратно загружает цепь и требует установки генератора большей мощности, чем при наличии только активного сопротивления.

Поскольку при конструировании генератора не всегда известно, будет ли его нагрузка активной или в цепи будут реактивные сопротивления (например, электродвигатели, трансформаторы), то мощность генераторов переменного тока указывается не в киловаттах, а в киловольт-амперах, количество же потребляемых киловатт будет зависеть от величины активной нагрузки.

Если в цепи имеются одновременно и активное и индуктивное сопротивление, то формула Ома для эффективных значений тоже применима, но полное сопротивление Z цепи берется как геометрическая сумма активного и индуктивного сопротивления при последовательном соединении их $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$.

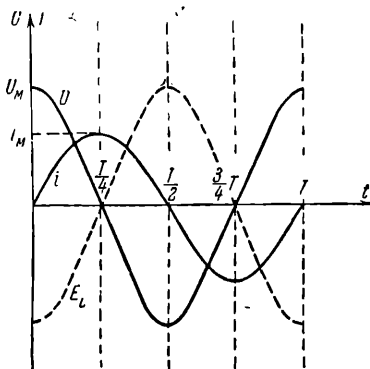


Рис. 423. График тока и напряжения для цепи с индуктивностью.

У п р а ж н е н и е

433. К катушке с индуктивностью 0,05 гн приложено переменное напряжение 15 в, 50 гц. Найти индуктивное сопротивление и ток.

§ 313. Лабораторная работа № 17. Определение емкости конденсатора *).

Цель работы. Экспериментальное ознакомление с емкостным сопротивлением.

Принадлежности. Конденсаторы по 2 мкф (две штуки), амперметр с делениями на десятые и сотые доли ампера, вольтметр на местное напряжение сети.

Выполнение работы. Собрать схему по чертежу (рис. 424). После проверки руководителем включить в сеть и записать показания вольтметра и амперметра. Найти емкостное сопротивление.

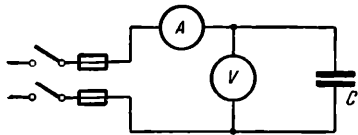


Рис. 424.

*) Работы № 17 и № 18 предлагаются взамен программной работы по исследованию цепи переменного тока.

§ 315. Передача электрической энергии. Основным преимуществом переменного тока является возможность осуществлять при его посредстве дешевую передачу энергии на большие расстояния.

Вспомним, что потеря энергии на нагревание проводов тем больше, чем больше их сопротивление и чем больше ток (§ 229). Значит, уменьшить потерю энергии в проводах можно двумя способами: 1) уменьшая сопротивление проводов; 2) пользуясь менее сильными токами.

Чтобы уменьшить сопротивление, надо взять более толстые медные провода. Однако это возможно только на небольших расстояниях; при больших расстояниях такая проводка обойдется слишком дорого. Вторая возможность была впервые указана Д. А. Лачиновым (1880 г.).

При передаче энергии на большие расстояния надо пользоваться менее сильными токами. Но тогда, чтобы получить ту же мощность, придется увеличить напряжение. Мощность тока определяется произведением силы тока на его напряжение (§ 269). Одну и ту же мощность, например 500 *вт*, можно получить разными токами, например током в 50 *а* при напряжении 10 *в* или током в 0,5 *а* при напряжении 1000 *в*. В первом случае мы пользуемся сильным током низкого напряжения. Во втором случае мы получаем ту же мощность, пользуясь слабым током высокого напряжения. Итак, *для уменьшения потерь при передаче электрической энергии нужно пользоваться слабым током высокого напряжения.*

Но пользоваться высоким напряжением для технических и бытовых целей неудобно, а иногда невозможно. Оно опасно для жизни; нужна очень хорошая изоляция проводов, что стоит дорого; приборы и машины, вообще говоря, более экономичны, если они работают на низком напряжении; лампы накаливания на напряжения выше 250 *в* и не производятся: они были бы совсем невыгодны. Напряжения, которыми пользуются при потреблении электроэнергии в быту и в технических установках, обычно не превышают нескольких сотен вольт.

Поэтому при передаче электроэнергии на значительные расстояния приходится подвергать ток **т р а н с ф о р м а ц и и**: заменять сильный ток низкого напряжения слабым током высокого напряжения и посылать его по высоковольтным линиям (см. рис. 293) к потребителям, а на местах потребления вновь заменять ток высокого напряжения током низкого напряжения.

§ 316. Трансформатор переменного тока. Трансформация переменного тока производится при помощи **т р а н с ф о р м а т о р о в**, изобретенных П. Н. Яблочковым. Основными частями трансформатора являются железная рама (**м а г н и т о п р о в о д**) и надетые на нее две обмотки из изолированных проводов (рис. 426). Одна обмотка имеет малое число витков толстого провода, другая —

большое число витков тонкого провода. Железная рама не сплошная, а состоит из многих железных пластин, изолированных друг от друга лаком. Это делают для уменьшения бесполезных потерь энергии на образование токов Фуко в самой раме. Большие трансформаторы заключаются в железные ящики, наполненные маслом с целью изоляции и охлаждения.

Если по одной из обмоток трансформатора (первичной) идет переменный ток, то в другой обмотке (вторичной) все время создается эдс той же частоты. Переменный ток в первичной обмотке создает в магнитопроводе периодически меняющийся магнитный поток, а изменения магнитного потока создают периодическую эдс индукции во вторичной обмотке.

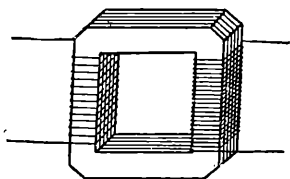


Рис. 426. Схема устройства трансформатора.

Если в качестве первичной взять обмотку с малым числом витков, а в качестве вторичной — обмотку с большим числом витков, то напряжение в последней будет повышено по сравнению с первичной (приблизительно во столько раз, во сколько число витков вторичной обмотки больше числа витков первичной обмотки).

Обе обмотки пронизываются одним и тем же магнитным потоком. Его изменения вызывают в обмотках эдс, пропорциональные числам витков (§ 300). Напряжение, под которым находится первичная обмотка, немного больше возбуждаемой в ней эдс (так как часть напряжения тратится на преодоление сопротивления обмотки). Напряжение, которое дает во внешнюю цепь вторичная обмотка, наоборот, немного меньше возбуждаемой в ней эдс (так как часть эдс тратится на преодоление ее сопротивления). Поэтому *отношение напряжений на концах первичной и вторичной обмоток только приблизительно равно отношению чисел их витков.*

Однако, выиграв в напряжении, мы проигрываем в токе: первичная обмотка потребляет более сильный ток, чем снимается со вторичной обмотки. Это следует из того, что мощность во вторичной цепи не может быть больше мощности, потребляемой первичной цепью.

Если же, наоборот, в качестве первичной обмотки взять обмотку с большим числом витков, то вторичная обмотка с малым числом витков может служить источником сильного тока низкого напряжения.

Таким образом, один и тот же трансформатор может работать и как повышающий, и как понижающий (например, трансформатор, повышающий напряжение от 120 в до 600 в, может служить как понижающий с 600 в до 120 в).

Энергия, затрачиваемая в первичной обмотке, передается во вторичную обмотку не целиком. Часть энергии тратится бесполезно (на нагревание обмоток и магнитопровода). Эти потери невелики. В современных мощных трансформаторах кпд достигает 99%.

У п р а ж н е н и я

434. На рис. 427 изображено устройство сварочного трансформатора (B, B — электроды). Повышается или понижается напряжение на зажимах вторичной обмотки, если ручку P передвигать от контакта A к контакту K ?

435. Первичная обмотка трансформатора имеет 1500 витков. Сколько витков надо взять во вторичной обмотке, если трансформатор должен повышать напряжение от 120 в до 300 в?

§ 317. Индукционная катушка.

Часто необходимы источники тока, создающие напряжения в несколько тысяч вольт (например, для получения искры, поджигающей горючее в двигателях внутреннего сгорания, для получения рентгеновых лучей и т. п.).

Удобным прибором для создания высоких напряжений является и н д у к ц и о н н а я к а т у ш к а, работающая от источника тока низкого напряжения, но достаточной величины (аккумуляторы). Индукционная катушка состоит из железного сердечника D и двух

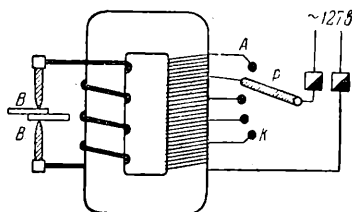


Рис. 427.

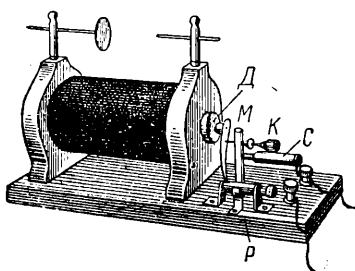


Рис. 428. Внешний вид индукционной катушки.

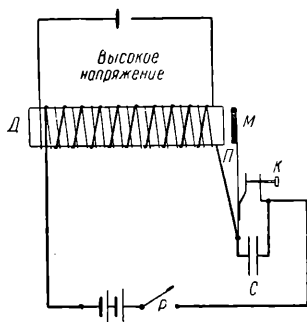


Рис. 429. Электрическая схема индукционной катушки.

обмоток (рис. 428 и 429) первичной, с небольшим числом витков сравнительно толстой проволоки, и вторичной, с большим числом витков тонкой, хорошо изолированной проволоки. Замыкая и размыкая ток в первичной обмотке, мы вызываем изменение магнитного поля в сердечнике, особенно резкое при быстром размыкании. При этом во вторичной обмотке появляется эдс, тем более высокая,

чем быстрее производится размыкание тока и чем больше витков во вторичной обмотке.

Замыкание и размыкание тока производится автоматически при помощи устройств, называемых прерывателями. На рис. 428 и 429 показан широко распространенный электромагнитный прерыватель. Он состоит из

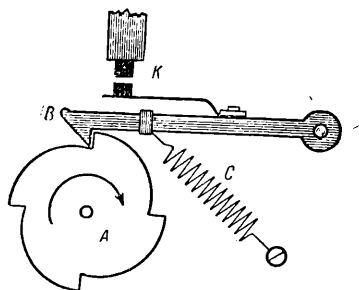


Рис. 430. Схема механического прерывателя.

При вращении звездчатого колеса *A* стержень *B*, оттягиваемый пружиной *C*, периодически замыкает и размыкает контакт *K*.

железного молоточка *M*, укрепленного на пружинке *П*; последняя отрегулирована на контакт с винтом *K*. При замыкании ключа *P* по первичной обмотке идет ток, сердечник катушки *D* намагничивается и притягивает к себе молоточек *M*. В этот момент контактный винт *K* и пружинка *П* разъединяются, ток в первичной обмотке прекращается, сердечник *D* размагничивается и пружинка отводит молоточек *M* обратно. При этом снова замыкается цепь, и процесс повторяется.

В момент размыкания первичной цепи во вторичной обмотке получается высокая эдс. Как показывает опыт, индукционная катушка может работать только в том случае, если параллельно первичной обмотке включен конденсатор *C**). Назначение его двоякое: во-первых, при надлежащем подборе конденсатора скорость изменения магнитного потока в сердечнике *D* увеличивается

и эдс, возникающая во вторичной цепи при разрыве первичной, значительно повышается; во-вторых, уменьшается вредное искрообразование в месте разрыва цепи между винтом *K* и пружинкой.

Индукционные катушки, иногда устанавливаемые на автомобилях для зажигания двигателей (бобины), вместо электромагнитных прерывателей снабжаются механическими, устройство которых понятию из рис. 430.

*) Часто присоединение конденсатора к первичной обмотке делают так, как показано на рис. 428, т. е. последовательно с конденсатором присоединен источник тока.

ТРЕХФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

§ 318. Что такое трехфазный ток? Получение трехфазного тока. Присматриваясь к проводке электрического тока, можно заметить, что очень часто число проводов равно трем (например, на рис. 431). Это проводка широко распространенного трехфазного тока.

Трехфазным током называется система трех переменных токов одинаковой частоты, сдвинутых относительно друг друга по фазе на $\frac{1}{3}$ периода (рис. 432).

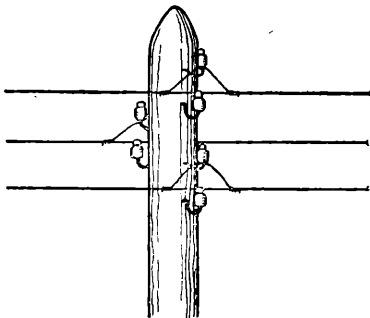


Рис. 431. Трехфазная проводка.

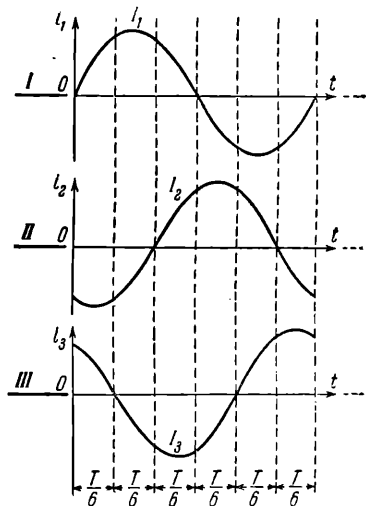


Рис. 432. Три переменных тока одинаковой частоты, сдвинутые относительно друг друга по фазе на $\frac{1}{3}$ периода.

Чтобы понять, как получается трехфазный ток, рассмотрим такой опыт. На столе расположены под углом друг к другу в 120° три катушки с железными сердечниками (рис. 433). Между этими катушками вращается магнит.

При вращении магнита во всех трех катушках получаются переменные токи, что и можно обнаружить при помощи трех гальванометров. Однако фазы этих токов не совпадают, они не одновременно начинают усиливаться, достигают максимумов, уменьшаются,

меняют знак и т. д. В то время, когда полюс магнита проходит мимо какой-нибудь из катушек, она пронизывается максимальным магнитным потоком, но скорость изменения магнитного потока в это время минимальная и эдс, индуцируемая в этой катушке, тоже минимальная, падает до нуля.

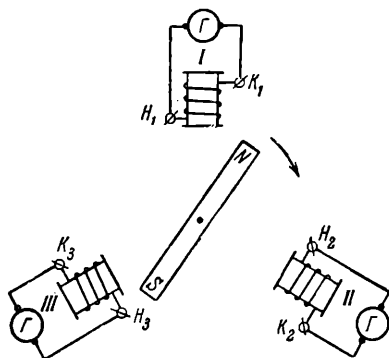


Рис. 433. Схема установки для демонстрации трехфазного тока.

Катушке, но соответствующие фазы цикла будут наступать на $1/3$ периода позже, чем в первой; в третьей катушке еще на $1/3$ периода позже, чем во второй.

Можно разместить катушки на общем стальном сердечнике (рис. 434). Неподвижный стальной сердечник с тремя катушками (обмотками) образует статор генератора трехфазного тока. Внутри статора вращается ротор — магнит (на схеме), или система электромагнитов, питаемых постоянным током от отдельного генератора постоянного тока (рис. 435).

Концы и начала обмоток статора выведены на общий щиток на корпусе статора.

Если от клемм, соответствующих началам и концам каждой обмотки, провести провода к потребителям электрической энергии, то получится шестипроводная система из трех самостоятельных цепей переменного тока, токи в которых будут различаться по фазам на $1/3$ периода один от другого (рис. 436). Такая «несвязанная система» еще не представляет каких-либо существенных преимуществ перед тремя самостоятельными цепями переменного тока с отдельными генераторами.

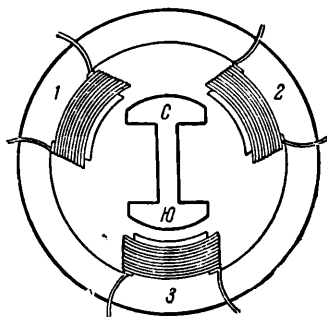


Рис. 434. Схема обмотки статора для получения трех переменных токов, сдвинутых по фазе на $1/3$ периода.

Однако особенности синусоидальных переменных токов позволяют осуществить канализацию электроэнергии по трем (или

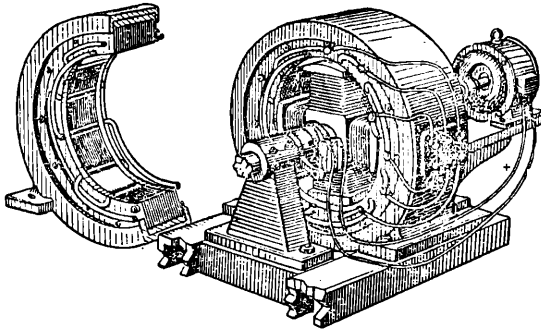


Рис. 435. Устройство генератора трехфазного тока.

четырем) проводам вместо шести, для этого потребуется только соответствующим образом соединить концы (или начала) обмоток генератора между собой и с потребителями. Чтобы уяснить это, познакомимся с одной замечательной особенностью трехфазного тока.

§ 319. График трехфазного тока. Рассматривая график трехфазного тока, все три синусоиды которого вычерчены на одном чертеже (рис. 437), можно заметить, что для любого момента времени сумма трех мгновенных значений токов, идущих по трем линиям проводки, равна нулю.

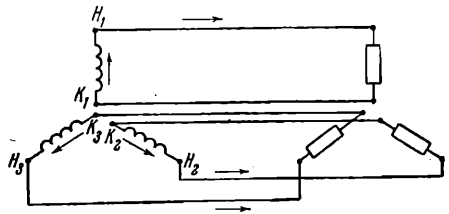


Рис. 436. Несвязная шестипроводная трехфазная система.

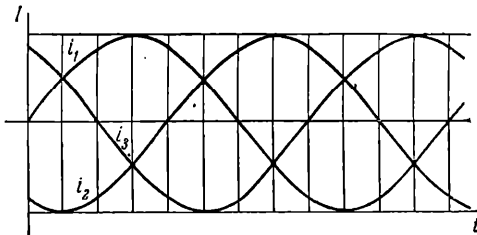


Рис. 437. График трехфазного тока.

Следовательно, если три таких тока, после того как они пройдут через три одинаковых потребителя, соединить в одном проводе, то

сумма их будет равна нулю. Этот четвертый провод (нулевой провод) можно в случае равной нагрузки всех трех цепей и совсем отбросить. Тогда получится трехпроводная система, причем выгода с точки зрения экономии проводов очевидна. Даже и при четырехпроводной системе, которая применяется при неравномерной нагрузке (например, лампами) трех цепей, экономия получается на 30—40% против шестипроводной системы.

§ 320. Соединение обмоток генератора трехфазного тока звездой. Куда же присоединить оставшиеся свободными три конца обмоток генератора? Один из способов соединения обмоток генератора трехфазного тока состоит в том, что все три конца обмоток тоже

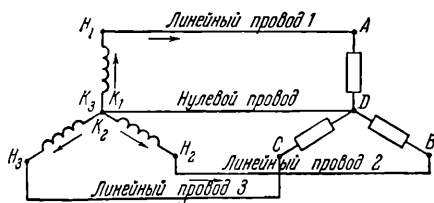


Рис. 438. Схема соединения обмоток генератора и приемников энергии звездой при четырехпроводной системе (направления токов показаны условно).

соединяют в одну общую точку, так называемую нулевую точку, и к ней присоединяют нулевой провод, идущий от нулевой точки потребителя (рис. 438).

Такой способ соединения обмоток называется соединением звездой.

§ 321. Соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении звездой. Три провода, подводящих ток от генератора к потребителю, называются линейными проводами. Обмотки генератора называются фазными обмотками или фазами. Напряжения между линейными проводами называются «линейными напряжениями». Напряжения между концами и началами фазных обмоток называются «фазными напряжениями». Соответственно этому различают и токи: линейные — идущие в линейных проводах и фазные — токи в фазах.

При соединении обмоток звездой каждая линия является продолжением фазной обмотки и потому линейные токи равны фазным

$$I_{л} = I_{ф}.$$

Что касается напряжений, то можно доказать теоретически и проверить лабораторно (§ 326), что при равномерной нагрузке фаз

$$U_{л} = U_{ф} \sqrt{3} = 1,73U_{ф}.$$

Упражнение

435а. Линейное напряжение в сети трехфазного тока 220 в. Каково напряжение между линией и нулевым проводом?

Возможность иметь два различных напряжения (линейное и фазное) является тоже одним из преимуществ трехфазного тока.

§ 322. Соединение обмоток генератора трехфазного тока треугольником. Кроме соединения обмоток генератора звездой возможно соединение их треугольником. В этом случае начало одной фазовой обмотки соединяют с концом следующей (рис. 439).

Как видно из чертежа, в этом случае напряжение между линейными проводами является в то же время напряжением между концом и началом фазной обмотки, т. е.

$$U_{л} = U_{\phi}.$$

Соотношение между линейными и фазными значениями токов приведем без доказательства:

$$I_{л} = I_{\phi} \sqrt{3} = 1,73 I_{\phi}.$$

§ 323. Включение потребителей звездой. Потребителей трехфазного тока тоже можно включать звездой или треугольником и

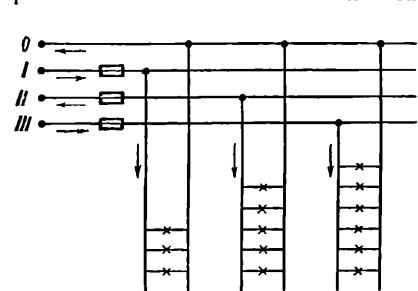


Рис. 440. Схема соединения приемников энергии звездой при четырехпроводной трехфазной системе.

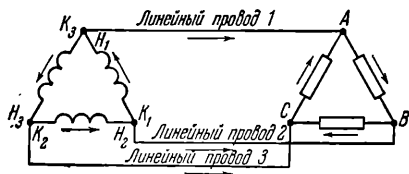


Рис. 439. Схема соединения обмоток генератора и приемников энергии треугольником.

звездой или треугольником и притом совершенно независимо от способа соединения обмоток генератора (о котором потребитель обычно и не знает). Рассмотрим сначала соединение звездой. При этом необходимо иметь в виду, что такое включение потребителей не означает пространственного расположения ламп или других приборов звездообразно. Рис. 440 показывает, в чем тут дело. При включении звездой начало каждой группы ламп присоединяется к линейному проводу, а концы — к общему нулевому проводу. Оставшийся при неравномерной нагрузке фаз ток (разное число и разная мощность ламп) стекает по обратному нулевому

проводу к нулевой же точке генератора. Наличие нулевого провода в этом случае обязательно.

§ 324. Значение нулевого провода. Все группы ламп находятся под напряжением, равным фазному. Если бы нулевого провода не было, то напряжение на отдельных группах ламп было бы различным: на группе с меньшим сопротивлением напряжение было бы меньше, на других группах больше. Назначение нулевого провода состоит в регулировании фазных напряжений потребителя. Фазное напряжение потребителя при этом будет всегда равно фазному напряжению генератора.

Чтобы не произошло отключения нулевого провода, на нем никогда не ставят ни выключателей ни предохранителей.

§ 325. Включение потребителей в трехфазную сеть треугольником. При соединении треугольником к каждому линейному проводу присоединяются конец одной и начало другой фазы (группы ламп) потребителей или, иначе, можно сказать, что каждая фаза присоединена к двум линейным проводам и от каждого линейного провода одновременно питаются две фазы потребителя. Таким образом, при соединении треугольником фазные напряжения потребителя всегда равны линейным и не зависят от нагрузки отдельных групп ламп.

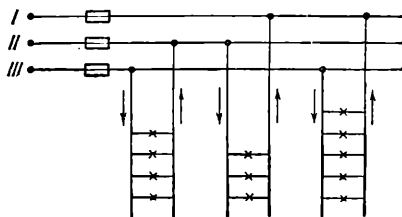


Рис. 441. Схема соединения приемников энергии треугольником.

Название «треугольник» здесь тоже относится только к схеме, монтаж ламп в помещении (рис. 441) несколько не напоминает геометрической фигуры треугольника.

Отметим нередко наблюдающееся на практике явление: случается, что вдруг в некоторых комнатах или квартирах дома лампочки начинают гореть «вполнакала», тогда как в других комнатах они горят нормально. Что произошло? Перегорел предохранитель на одной из линий. Потребители, питавшиеся током от нее, оказались включенными последовательно в сеть с таким же напряжением третьей фазы, а каждая группа ламп в отдельности — с напряжением ниже нормального.

У п р а ж н е н и е

436. Как будут гореть лампы в квартирах 1, 2 и 3, если перегорит предохранитель второго линейного провода (II) (рис. 442)?

§ 326. Лабораторная работа № 19. Изучение трехфазных цепей при включении ламп звездой и треугольником. Определение соотношений фазных и линейных напряжений и токов.

Цель работы. Научиться собирать схемы включения потребителей в сеть трехфазного тока, изучить зависимость между линейными и фазными значениями напряжений и токов при соединении звездой и треугольником.

Принадлежности. Три ламповых реостата, два амперметра, один или два вольтметра на местное напряжение, плавкие предохранители.

Выполнение работы. Соберите схему (рис. 443, а) соединения ламп звездой. После проверки ее преподавателем включите в сеть

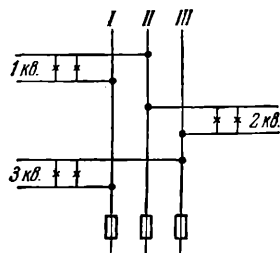


Рис. 442. Схема распределения токов в доме с тремя квартирами (к задаче).

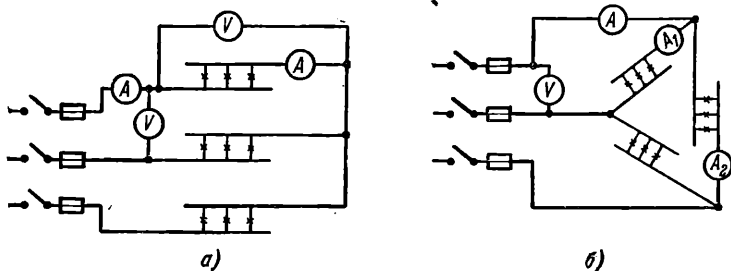


Рис. 443.

и произведите измерения. Результат запишите в таблицу и найдите соотношения между напряжениями и токами.

Схема	I_l	I_ϕ	U_l	U_ϕ
Звезда				
Треугольник				

То же самое повторите для соединения ламп треугольником (рис. 443, б).

§ 327. Вращающийся магнитный поток и его получение. Самым значительным преимуществом трехфазного тока является возможность получения при помощи него вращающегося магнитного поля, на применении которого основано устройство весьма простых, удобных и дешевых электродвигателей *).

Что такое вращающееся магнитное поле? Это легко понять из следующего опыта. Будем вращать подковообразный магнит вокруг его оси (рис. 444). Если поместить под магнитом

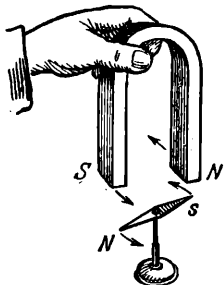


Рис. 444. Получение вращающегося магнитного поля при помощи магнита.

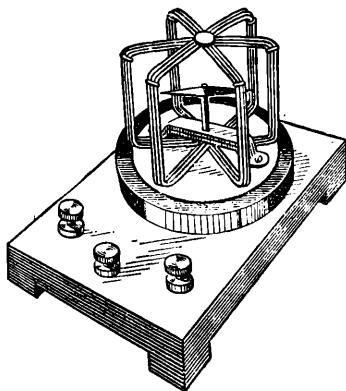


Рис. 445. Получение вращающегося магнитного поля при помощи трехфазного тока.

магнитную стрелку, то при вращении магнита стрелка будет следовать за ним, вращаясь с той же скоростью, что и магнит («синхронно с магнитом»).

Вращающееся магнитное поле может быть получено и без вращения магнита, если воспользоваться трехфазным током. Для этой цели надо расположить три катушки под углом 120° друг к другу. Катушки соединяются по схеме звезды или треугольника подобно обмоткам статора генератора трехфазного тока (рис. 445). Если питать катушки трехфазным током, то в каждой из них будет образовываться переменное магнитное поле, но максимумы магнитного потока будут достигаться не одновременно и как бы переходить от одной катушки к другой. Таким образом, несмотря на то, что катушки неподвижны, их магнитное поле будет вращаться, увлекая за собой и магнитную стрелку.

*) Честь разработки системы трехфазного тока для canalизации электрической энергии, а также конструкции трехфазных электродвигателей принадлежит русскому инженеру М. О. Доливо-Добровольскому (1862—1919 гг.).

Скорость вращения поля будет равна 1 обороту за 1 цикл, т. е. при частоте переменного тока 50 гц скорость поля будет равна 50 об/сек, или $50 \cdot 60 = 3000$ об/мин.

Вместо магнитной стрелки можно поместить во вращающееся магнитное поле металлический цилиндр, надетый на ось (рис. 446). При пересечении его магнитными силовыми линиями поля в нем будут возникать вихревые токи (§ 303), магнитное поле которых во взаимодействии с полем статора приведет цилиндр во вращательное движение. Различие с магнитной стрелкой будет то, что цилиндр (ротор) будет вращаться не синхронно с полем, а несколько отставать от него. Если бы цилиндр достиг скорости вращения магнитного поля, то силовые линии поля больше не пересекали бы металлический цилиндр и не возбуждали бы в нем вихревых токов. Исчезновение же токов в цилиндре привело бы к его остановке. Тогда магнитное поле статора стало бы набегать на неподвижный цилиндр с максимальной относительной скоростью. В результате ротор вращается вслед за магнитным полем с несколько меньшей угловой скоростью. Такое отставание ротора от вращающегося поля статора носит название «скольжения».

Трехфазный двигатель, основанный на описанном принципе, носит название асинхронного, скорость его ротора при номинальной мощности отстает от скорости магнитного поля на 3—5%.

§ 328. Понятие об устройстве трехфазного асинхронного двигателя. Асинхронный двигатель отличается простотой своего устройства. Он состоит из двух частей: статора и ротора (рис. 447). На внутренней поверхности статора в пазы ее укладываются три обмотки, подобно тому, как это делается в статоре генератора трехфазного тока. Обмотки могут быть соединены звездой или треугольником. То или другое соединение может быть легко выполнено, так как концы и начала обмоток выведены в определенном порядке на щиток на корпусе статора. Соединяя концы (или начала) общей металлической перемычкой и подводя к оставшимся свободным клеммам щитка провода трехфазной сети, получают схему звезда, соединяя же попарно вертикально расположенные клеммы, переключим двигатель на треугольник (рис. 448).

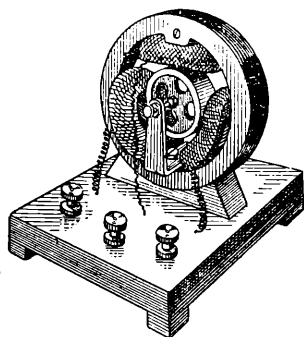


Рис. 446. Модель трехфазного двигателя. Видны три катушки на статоре, создающие вращающееся магнитное поле, в котором помещен ротор.

В соответствии с той или иной схемой асинхронный двигатель может быть включен под линейное или фазное напряжение. Поэтому в паспорте двигателя всегда указываются два напряжения: 220/127

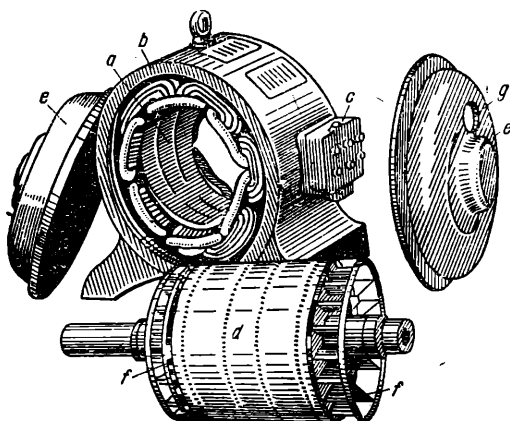


Рис. 447. Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором в разобранном виде.

или 380/220. Высшее из паспортных напряжений соответствует схеме звезда, низшее — схеме треугольник. (Легко запомнить правило-шутку: «звёзды — вверх».) Ошибки при включении не должны допускаться. Если местное (линейное) напряжение сети

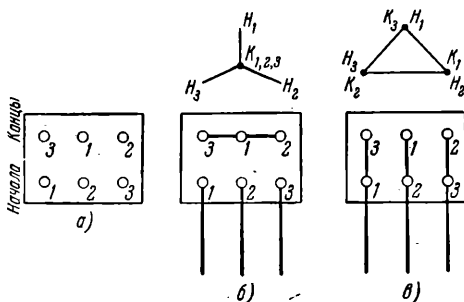


Рис. 448. Схема соединения обмоток статора асинхронного двигателя звездой или треугольником.

соответствует высшему обозначенному в паспорте напряжению, то ошибочное включение на треугольник вместо звезды может привести к перегоранию обмоток статора. Наоборот, если местное напряжение соответствует низшему паспортному, а двигатель

включен на звезду, то двигатель будет работать с пониженной в три раза мощностью.

Ротор двигателя делается или короткозамкнутым или с тремя фазными обмотками. Приведем описание лишь первого типа, который обычно применяется для двигателей небольшой мощности.

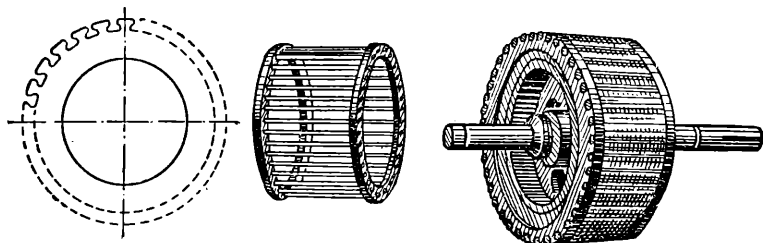


Рис. 449. Ротор короткозамкнутого двигателя.

Короткозамкнутый ротор (рис. 449) собирается из железных штампованных пластин, в пазы которых вкладываются медные стержни, на торцах приваренные к медным кольцам (такая конструкция получила название «беличьего колеса»). Вращающееся поле статора возбуждает в медных стержнях вихревые токи, железо же служит для концентрации магнитного потока.

Асинхронные двигатели просты и экономичны. Поэтому они имеют самое широкое распространение в промышленности и в сельском хозяйстве. Недостатками их являются трудность регулировки числа оборотов и малый пусковой момент (плохо «берут» с места).

У п р а ж н е н и е

437. Напряжение сети 220 в. На какую схему надо включить двигатель с паспортным напряжением 220/127 в?

ГЛАВА XXVI

ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ

§ 329. **Химическое действие тока.** Напомним известные из курса физики общеобразовательной школы сведения о процессах, происходящих при пропускании тока через растворы солей, кислот и щелочей. На проводниках, подводящих ток к раствору в ванне (электродах), выделяются в результате прохождения электрического тока те или иные продукты химического разложения раствора.

Это явление называется **э л е к т р о л и з о м**, а вещества, в которых оно происходит, — **э л е к т р о л и т а м и**. Отметим, что электролитами являются не только растворы кислот, солей и щелочей, но и расплавы их. Вследствие электролиза могут происходить те или другие химические реакции, связанные с образованием продуктов электролиза.

Приведем два примера электролиза.

1. Опустим в раствор соляной кислоты, состоящей, как известно, из водорода и хлора, два электрода, на которые соляная кислота химически не действует (например, угольные), и будем пропускать ток. Мы увидим, что возле электродов начнут выделяться газы: около катода — водород, около анода — хлор.

Как известно из химии, смесь водорода и хлора может превращаться в хлористый водород, причем выделяется большое количество теплоты. Значит, энергия смеси водорода и хлора больше энергии хлористого водорода. Следовательно, при электролизе происходит превращение электрической энергии в химическую.

2. Электролиз раствора медного купороса (CuSO_4) сопровождается переносом меди с положительного электрода (анода) на отрицательный электрод (катод).

Что происходит в растворах в приведенных примерах электролиза, мы рассмотрим ниже.

§ 330. **Ионы в электролитах.** Дистиллированная (химически чистая) вода почти не проводит тока. Стоит, однако, растворить в воде немного какой-либо кислоты или соли, и раствор начнет проводить ток. Как это объяснить? Как объяснить также, что

в отличие от металлов электрический ток в растворах кислот и солей связан с переносом вещества?

Возьмем, например, электролиз соляной кислоты. Мы указали (§ 329), что при этом на аноде выделяется хлор, а на катоде — водород, т. е. атомы хлора притягиваются к аноду, а атомы водорода — к катоду. Но отсюда следует, что это не просто атомы хлора и водорода, а и о н ы, т. е. атомы, получившие избыточные электрические заряды: хлор — отрицательный, а водород — положительный. Молекулы хлористого водорода распадаются в воде на хлор и водород, причем от атома водорода отрывается один электрон *); он удерживается у атома хлора. Таким образом, образуются положительный и отрицательный ионы (символические обозначения их H^+ и Cl^-).

Такое действие воды обусловлено строением ее молекул, имеющих далеко отстоящие положительные и отрицательные заряды, вследствие чего электрическая проницаемость воды велика. Относительная диэлектрическая проницаемость воды 81. Связь ионов хлора и водорода в молекуле при растворении в воде сильно ослабляется, и они легко отделяются друг от друга вследствие теплового движения молекул. Это явление называется д и с с о ц и а ц и е й молекул на ионы. Наличием ионов и объясняется электропроводность раствора соляной кислоты и других электролитов.

Через некоторое время после диссоциации молекулы ионы могут встретиться и вновь соединиться, образуя молекулу. Но в то же время происходит диссоциация других молекул. Таким образом, в электролите одновременно существуют и ионы, и нейтральные молекулы. В некоторых случаях концентрация нейтральных молекул растворенного вещества ничтожно мала, и практически все оно находится в виде ионов. Это всегда имеет место в сильно разбавленных растворах, а для некоторых веществ (например, солей соляной и серной кислот) и в крепких растворах.

Отметим, что растворы многих органических веществ, например сахара, не проводят тока. Значит, сахар не распадается на ионы.

При повышении температуры электропроводность электролитов возрастает (§ 253). Это можно объяснить тем, что при высокой температуре вязкость жидкостей уменьшается и ионы приобретают большую подвижность. Потеря изолирующих свойств стеклом и другими изоляторами при нагревании имеет сходное объяснение.

Итак, ток в электролитах осуществляется движением ионов (положительных — к катоду, отрицательных — к аноду). Проводники такого рода называются и о н н ы м и п р о в о д н и к а м и.

*) В случае других элементов от атомов могут отрываться два и более электрона.

§ 331. Явления на границе металл — электролит. Мы уже говорили о химических источниках тока. Эти источники, которые мы рассмотрим позднее, состоят из двух разнородных электродов (чаще всего металлических), опущенных в электролит. Поскольку такое устройство дает ток во внешнюю цепь, то, видимо, металл, соприкасающийся с электролитом, заряжается. Можно обнаружить, что при соприкосновении с электролитом заряжаются и другие вещества. Электролизная ванна тоже состоит из электродов, опущенных в электролит.

Чтобы понять суть явлений, происходящих при электролизе и в химических источниках тока, надо уяснить себе процессы на границе металл — электролит. Рассмотрим их на примере медного электрода (например, пластинки), опущенного в водный раствор медного купороса (CuSO_4).

Ионы меди, расположенные на границе металла с раствором, находятся в ином состоянии, чем те же ионы на границе металла с воздухом. Вследствие

взаимодействия между ионами меди и молекулами воды отдельные ионы, у которых в данный момент скорость теплового движения особенно велика, могут оторваться от кристаллической решетки и перейти в раствор. С другой стороны, ионы меди из раствора могут обратно переходить на медную пластинку. При этом возможны три случая.

1) Концентрация ионов в растворе мала, и в начальный момент, когда металл опускается в раствор, число ионов, переходящих из раствора на металл, меньше числа ионов, переходящих за то же время с металла в раствор. В таком случае металл (в нашем примере медь) начнет заряжаться отрицательно, а раствор — положительно. В тонком слое на границе между медью и раствором образуется

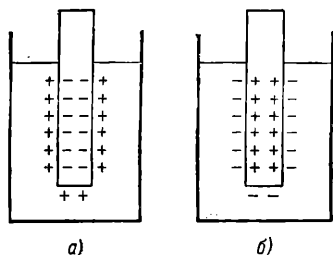


Рис. 450. Двойной слой на границе металл — электролит. а) Поле направлено из электролита в металл; б) поле направлено из металла в электролит.

электрическое поле, направленное из раствора в металл (рис. 450, а). Это поле способствует возвращению ионов меди на электрод и препятствует их переходу в раствор. По мере увеличения напряжения между раствором и металлом числа ионов, переходящих с металла в раствор и обратно, будут все меньше отличаться друг от друга. Когда эти числа сравняются, установится подвижное равновесие и дальнейший рост напряжения между медью и раствором прекратится. Между медным электродом и электролитом установится постоянное напряжение, зависящее от концентрации ионов в растворе и от природы ионов. Последняя зависимость объясняется тем, что ионы металла переходят в раствор вследствие теплового движения, а для поддержания этого движения требуется приток энергии. Он обеспечивается теплотой химической реакции образования молекул из положительных и отрицательных ионов, а эта теплота для разных ионов различна.

2) Концентрация ионов в растворе велика, и в начальный момент при опускании металла в раствор число ионов, переходящих из раствора на металл, больше числа ионов, переходящих за то же время с металла в раствор. В таком случае металл зарядится положительно, а раствор — отрицательно (рис. 450, б).

3) Концентрация ионов в растворе такова, что число ионов, переходящих из раствора на металл, с самого начала равно числу ионов, переходящих с металла в раствор. Тогда обмен ионами между металлом и раствором не вызовет появления зарядов ни на металле, ни в растворе. Никакого напряжения между металлом и раствором не возникнет.

Итак, на границе металл — электролит образуется тонкий (10^{-6} — 10^{-7} см) заряженный слой, создающий электрическое поле. А это значит, что на границе металл — электролит, так же как и на границе двух разных металлов, действует эдс. Эта эдс, как и контактная эдс, обусловлена тепловым движением носителей зарядов (на границе двух металлов роль носителей зарядов выполняют электроны, а на границе металл — электролит ими являются ионы).

Перейдем теперь к рассмотрению явлений в электролизной ванне (э л е к т р о л и з е р е), когда с электролитом соприкасаются два (или более) электрода.

1) Рассмотрим сперва случай, когда оба электрода сделаны из одного и того же металла и в растворе нет других положительных ионов, кроме ионов этого металла (например, два медных электрода в растворе CuSO_4). В этом случае электроды будут одинаковым образом заряжены по отношению к раствору и между электродами не будет напряжения. Около электродов находятся тонкие «слои» электрического поля. Во всем остальном объеме электролита электрическое поле отсутствует.

Что произойдет, если включить электролизер в цепь и, таким образом, создать между электродами дополнительное поле? (На рис. 451 это поле направлено слева направо.) Тогда поле, прилегающее к левому электроду, будет ослаблено, поле около правого электрода — усилено, а в объеме электролита между электродами возникнет поле, направленное слева направо. В результате подвижное равновесие около обоих электродов нарушится: ионы меди Cu^{++} с левого электрода будут переходить в раствор в большем числе, чем возвращаться обратно; получающийся вследствие этого избыток их будет перемещаться вправо, а ионы SO_4^{--} — влево. Около правого электрода ионы меди будут в большем числе переходить из раствора на электрод, чем обратно; вместе с тем к правому электроду все время будут притекать электроны от источника тока, а от левого электрода по направлению к источнику тока будут уходить электроны. Внешне все эти процессы проявятся в постепенном уменьшении массы левого электрода и таком же увеличении массы правого электрода. Химическая природа электродов при этом не меняется. Единственным результатом работы электрических сил в данном случае является изменение внутренней энергии, связанное с повышением температуры раствора и электродов.

2) Теперь рассмотрим случай, когда электролиз сопровождается изменением химической природы электродов. Ради простоты предположим, что электроды не дают заметного количества ионов в раствор (это будет, например, в случае угольных электродов, опущенных в водный раствор соляной кислоты). Пока на электроды не подано напряжение, ни около электродов, ни в растворе нет поля. После включения напряжения ионы Cl^- и H^+ начинают двигаться к электродам и осаждаются на них.

Положение усложняется тем, что выделившиеся на электродах ионы могут переходить обратно в раствор, вследствие чего появляются электрические поля в тонких слоях вблизи электродов, затрудняющие движение ионов. Чтобы ионы все же перемещались, напряжение на электролизере должно быть не меньше некоторого определенного значения, иначе возникший вначале ток быстро прекратится. Иными словами, в этом случае ток будет пропорционален не напряжению, а разности между приложенным к электролизеру

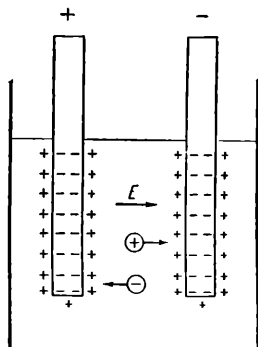


Рис. 451. Поле в объеме электролита направлено слева направо. Положительный ион меди (Cu^{++}) движется вправо, отрицательный ион (SO_4^{--}) движется влево.

напряжением и некоторым постоянным для данного раствора «мешающим» напряжением. Вспоминая закон Ома, мы можем сказать, что в электролизере действует эдс, знак которой противоположен знаку напряжения, приложенного к электролизеру. В этом случае работа электрических сил больше работы, эквивалентной количеству теплоты, выделяющейся в электролизере. Легко понять, почему это так. Ведь в данном случае происходит не только нагревание электролизера, но и накопление разделенных хлора и водорода у электродов, что связано с ростом химической энергии.

§ 332. Законы электролиза. Английский физик Фарадей, изучая явления электролиза, установил два закона, носящих его имя.

Первый из этих законов гласит, что *масса выделенного при электролизе вещества на электроде пропорциональна количеству протекшего электричества*. Обозначив массу выделенного вещества m , а количество протекшего электричества q , можно написать:

$$m = kq.$$

Коэффициент k называется *электрохимическим эквивалентом* выделяющегося на электроде вещества. Электрохимический эквивалент вещества показывает, какая масса вещества выделяется на электроде при прохождении через электролит 1 кулона. Мы уже знаем (§ 218), что для серебра (Ag^+) электрохимический эквивалент равен $1,118 \frac{\text{мг}}{\text{к}}$. Для меди (Cu^{++}) $k = 0,329 \frac{\text{мг}}{\text{к}}$, для золота (Au^{+++}) $k = 0,681 \frac{\text{мг}}{\text{к}}$.

С точки зрения представлений о механизме электролиза первый закон Фарадея объясняется просто. И количество электричества, и масса выделившегося вещества пропорциональны числу ионов, прошедших через электролит, ибо каждый ион переносит как заряд, так и массу.

Если при электролизе ток с течением времени не меняется, то (см. § 247) можно написать:

$$q = It,$$

где I — ток, t — время. Отсюда получится другая формула для первого закона Фарадея:

$$m = kIt.$$

Второй закон Фарадея можно сформулировать так: *для выделения 1 моля любого одновалентного вещества требуется прохождение по электролиту одного и того же количества электричества, а именно 96 500 кулонов*. Это количество электричества впоследствии получило название *фарадея* (обозначается F). Для выделения 1 моля двухвалентного вещества требуются 2 фарадея, трехвалентного — 3 фарадея. Вообще, выделение 1 моля вещества, валентность которого равна z , происходит при прохождении по раствору z фарадеев электричества. Обозначив массу моля какого-

нибудь вещества, выделившегося при электролизе, μ («мю»), можно написать на основании первого закона Фарадея

$$\mu = kzF.$$

Отсюда

$$k = \frac{\mu}{zF}.$$

Рассмотрим пример. Атомный вес меди равен $63,6 \frac{г}{моль}$, $1 F = 96\,500 \frac{к}{моль}$. Значит, электрохимический эквивалент двухвалентной меди равен

$$k = \frac{63,6 г}{2 \cdot 96\,500 к} = 0,000329 \frac{г}{к}.$$

У п р а ж н е н и я

438. Какое количество электричества прошло по раствору медного купороса, если масса медного анода уменьшилась, а масса катода увеличилась на $0,4 г$?

439. Сколько времени надо пропускать по электролизеру ток $0,2 а$, чтобы выделить на катод слой золота толщиной $6 \cdot 10^{-5} мм$, если площадь катода равна $13 см^2$?

440. Каков электрохимический эквивалент двухвалентного хрома (атомный вес $52 \frac{г}{моль}$)?

441. При электролизе водного раствора серной кислоты на электродах выделяются газообразные водород и кислород, а количество серной кислоты не меняется. На сколько уменьшится количество воды в электролизере, если по нему в течение 2 минут будет идти ток $1,5 а$?

§ 333. Лабораторная работа № 20. Определение электрохимического эквивалента меди.

З н а ч е н и е р а б о т ы. Работа позволяет учащимся опытным путем ознакомиться с процессом электролиза и с первым законом Фарадея.

П р и н а д л е ж н о с т и: электролизер с раствором медного купороса, технические весы с разновесом до $0,01 г$, батарея аккумуляторов (4 вольта), реостат с ползуном на ток $2 а$, амперметр постоянного тока с делениями до десятых долей ампера, часы, провода, электрическая плитка для сушки электродов, сосуд с водой для ополаскивания электродов, ключ.

В ы п о л н е н и е р а б о т ы. Медную пластинку, которая будет служить катодом при электролизе, хорошо очистите (до блеска) наждачной бумагой и после этого не касайтесь пальцами ее

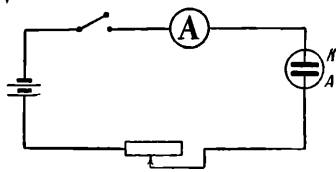


Рис. 452.

поверхности (берите за край, не погружаемый в раствор). Обтерев пластинку промокательной бумагой, взвесьте ее с точностью до 0,01 г. Составьте цепь по схеме рис. 452. Реостатом быстро отрегулируйте ток в 0,5 а и заметьте время. Во время опыта следите за постоянством тока, регулируя его реостатом. Ток пропускайте в течение $\frac{1}{2}$ часа. По окончании опыта выньте электроды, промойте осторожно водой, высушите над электрической плиткой и взвесьте. Результат запишите в таблицу:

Масса катода, мг		Прирост массы катода, мг	Время, сек	Ток, а	Электрохимический эквивалент меди
до опыта	после опыта				

§ 334. Заряд иона. Вспомним, что 1 грамм-моль любого вещества содержит $6,02 \cdot 10^{23}$ молекул (число Авогадро, см. § 160). Разделив фарадей (96 500 кулонов) на число Авогадро, получим, что заряд одновалентного иона равен $\frac{96\,500}{6,02 \cdot 10^{23}} \kappa = 1,6 \cdot 10^{-19} \kappa$, трехвалентного — в три раза больше ($4,8 \cdot 10^{-19} \kappa$) и т. д.

Заряд одновалентного иона равен, как мы указали, заряду электрона.

Отметим, что другие способы определения заряда электрона приводят к тому же результату. Итак, *заряд электрона равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ кулона.*

У п р а ж н е н и я

442. Какая сила действует на ион хлора, находящийся в электролите, если расстояние между электродами равно 2 см, а разность потенциалов между ними 1 в? Как движется под действием этой силы ион хлора?

443. Какая сила действует на все ионы хлора в растворе, если между электродами предыдущей задачи находится 4 мг хлористого натрия, полностью диссоциировавшего на ионы. Атомный вес натрия примите $23 \frac{e}{\text{моль}}$, хлора $35,5 \frac{e}{\text{моль}}$.

§ 335. Технические применения электролиза. Современная техника широко использует электролиз в ряде отраслей промышленности.

1. Электролитическое изготовление копий рельефных предметов (г а л ь в а н о п л а с т и к а). С рельефного предмета (например, с медали) делается восковой отпечаток. С целью сделать поверхность воскового отпечатка проводящей ее покрывают тонким слоем графитового порошка. Затем на него наращивают посредством электро-

лиза слой металла, после чего воск удаляют; получается копия медали. Гальванопластика была изобретена в России Б. С. Якоби в 1838 г.

2. Покрывание металлических изделий тонким слоем другого металла (гальваностегия) — никелирование, хромирование, серебрение и т. д. Это делается чаще всего с целью предохранения металлов от окисления (например, железа — от ржавления, причиняющего, как известно, большие убытки), иногда же с целью повысить механическую прочность изделия (никелирование печатного шрифта и т. п.). При гальваностегии (например, при никелировании) в качестве катода употребляется покрываемое изделие. Оно опускается в ванну с раствором соли никеля, причем анодом служит никелевая пластинка.

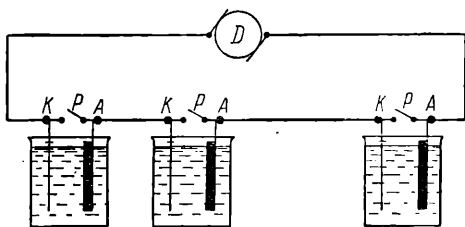


Рис. 453. Схема установки для рафинирования меди.

Электролитические ванны с раствором медного купороса получают ток от динамомашины *D*; *AA* — толстые пластины из «сырой» меди (аноды); *KK* — тонкие листы очищенной меди (катоды). Чтобы пустить ток в ванны, нужно выключить рубильники *P*.

3. При электролизе раствора медного купороса, описанном в § 329, на катоде выделяется чистая медь. Этим широко пользуются для

очистки (р а ф и н и р о в а н и я) меди от примесей. На рис. 453 изображена схема установки для очищения меди. Рафинирование посредством электролиза растворов солей также применяется для серебра, золота, железа и других металлов.

4. Электролиз растворов применяется также в химической промышленности. Например, посредством электролиза раствора хлористого натрия получают хлор, водород и едкий натр.

5. Большое значение имеет электролиз расплавов. Таким образом извлекают натрий (из расплавленного едкого натра), бериллий, магний и другие металлы. Особенно важно получение алюминия, имеющего в настоящее время чрезвычайно большое значение. В основном алюминий добывается из особого сорта глины — б о к с и т а. Путем переработки из боксита получается окись алюминия (г л и н о з е м), которая в смеси с легкоплавкими солями расплавляется в электрической печи, а потом в той же печи подвергается в расплавленном виде электролизу, причем на катоде (на дне электролитической ванны) выделяется алюминий.

§ 336. Явления в гальваническом элементе. Мы рассмотрели явления электролиза, при которых электрическая энергия превращается в химическую энергию. Напомним, что обратный

процесс — получение электрической энергии при затрате химической — происходит в химических источниках тока: в гальванических элементах и в аккумуляторах при их разрядке. Рассмотрим действие химических источников тока подробнее.

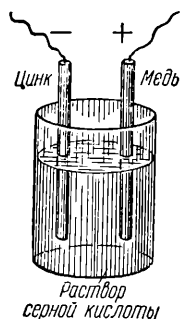


Рис. 454. Элемент Вольта.

Что происходит при работе этого элемента? Раствор серной кислоты содержит ионы H^+ и SO_4^{2-} . Мы уже видели (§ 331), что металлический электрод, опущенный в электролит, заряжается, причем устанавливается подвижное равновесие между числом ионов, переходящих с металла в раствор, и числом ионов, переходящих из раствора на металл. Разность потенциалов между электродом и раствором зависит от природы металла и от концентрации его ионов в растворе. Если оба электрода одинаковы и раствор около них тоже одинаков, то они имеют один и тот же потенциал, и, соединив их проводником, мы не получим никакого тока. Если же электроды различны, то ионы одного из них переходят в раствор в большем числе, чем ионы другого, и электроды имеют разные потенциалы.

В рассматриваемом элементе ионы Zn^{2+} переходят в раствор в значительно большем числе, чем ионы Cu^{2+} . Мы можем для простоты совсем пренебречь переходом ионов Cu^{2+} в раствор и считать, что медный электрод не заряжен (рис. 455, а). В результате перехода ионов цинка в раствор цинк оказывается заряженным отрицательно по отношению к раствору и к меди. Пока оба электрода не соединены друг с другом, раствор всюду имеет один и тот же потенциал, электрическое поле в нем отсутствует и ионы H^+ и SO_4^{2-} движутся беспорядочно, не стремясь к электродам.

Соединим цинковый и медный электроды проводником, причем для простоты рассуждения предположим, что сопротивление его настолько мало, что потенциалы электродов сделаются почти равными. Тогда внутри элемента будут существовать два электрических поля: одно — между цинком и прилегающим к нему слоем раствора, другое — между этим слоем и медным электродом (рис. 455, б). Так как, по нашему предположению, разность потенциалов (напряжение) между электродами отсутствует, то напряжение между цинком и

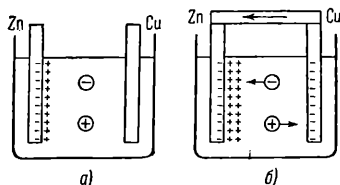


Рис. 455. а) На границе между цинком и раствором имеется электрическое поле

Для упрощения изображены заряды только с одной стороны электрода. Поле внутри раствора отсутствует. Отсутствие стрелок у кружков, изображающих ионы, означает, что они не стремятся двигаться к электродам.

б) Zn и Cu соединены проводником

В растворе появилось поле, направленное противоположно полю у поверхности цинка. Стрелки означают, что ионы движутся к электродам и одновременно движутся электроны по проводнику.

прилегающим слоем раствора равно и противоположно напряжению между этим слоем и медным электродом.

Поле в растворе вызовет движение ионов SO_4^{2-} к цинку, а ионов H^+ — к меди. Ионы SO_4^{2-} свяжут ионы Zn^{2+} в растворе, и ионы Zn^{2+} будут возвращаться на цинковый электрод в меньшем числе, чем раньше. Но переход ионов Zn^{2+} с цинка в раствор будет продолжаться, что и послужит причиной пополнения отрицательного заряда на цинковом электроде. В то же время ионы H^+ будут выделяться на медном электроде и нейтрализовать на нем отрицательные заряды, притекающие с цинка. Таким образом в проводнике, соединяющем электроды, поддерживается движение зарядов — электрический ток.

Обратим внимание, что переход ионов Zn^{2+} с цинка в раствор обусловлен их тепловым движением, и если бы не было пополнения внутренней энергии, то работа элемента была бы связана с понижением температуры. Однако этого не происходит, так как при реакции соединения ионов Zn^{2+} и SO_4^{2-} выделяется теплота, и это поддерживает температуру элемента на прежнем уровне. Кроме того, возможен еще теплообмен между гальваническим элементом и окружающими телами.

Подведем итог. В слое, прилегающем к цинку, имеет место движение ионов Zn^{2+} в направлении, противоположном тому в котором на них действует электрическое поле. Это движение происходит за счет энергии теплового движения ионов Zn^{2+} . Энергия последнего при работе элемента пополняется за счет энергии, выделяемой при химической реакции $Zn^{2+} + SO_4^{2-} = ZnSO_4$.

Аналогичные процессы происходят в других гальванических элементах.

§ 337. Поляризация гальванических элементов. В работающем элементе Вольта на медном электроде выделяется водород. Это имеет такие последствия. Во-первых, пузырьки водорода уменьшают рабочую площадь электрода, что повышает внутреннее сопротивление элемента. Во-вторых, водород стремится перейти в виде ионов H^+ обратно в раствор, и это создает новую эдс, направленную противоположно эдс элемента.

Последнее явление называется *поляризацией элемента*. Она снижает эдс элемента, а следовательно, уменьшает ток во внешней цепи. Действительно, присоединив к элементу Вольта лампочку, мы заметим, что накал ее постепенно уменьшается.

Поляризация имеет место во многих типах гальванических элементов. Для борьбы с ней в раствор добавляют вещества, химически связывающие водород (*деполяризаторы*). Можно также удалять пузырьки газов на электродах механически. Действительно, встряхнув медный электрод элемента Вольта, чтобы пузырьки водорода оторвались от него и поднялись вверх, мы увидим, что лампочка вспыхнет ярче.

§ 338. Элемент Лекланше. Из многочисленных типов гальванических элементов рассмотрим наиболее распространенный элемент Лекланше (рис. 456). В раствор нашатыря опущены цинковая пластинка (отрицательный полюс) и угольный стержень (положительный полюс), помещенный в мешочек с перекисью марганца. При работе элемента раствор нашатыря растворяет цинк. Перекись марганца (деполяризатор) служит для окисления выделяющегося на

положительном полюсе водорода. Эдс элемента Лекланше около 1,4 в.

Очень сходны с элементом Лекланше с у х и е э л е м е н т ы. В них раствор нашатыря смешан с особой пастой вроде клейстера,

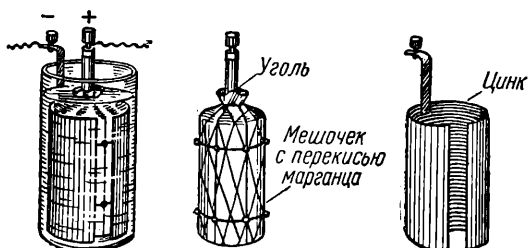


Рис. 456. Элемент Лекланше.

помещенной внутри цинковой коробочки, служащей отрицательным полюсом. Сухие элементы заделываются в картонные коробки и заливаются сверху смолой, из которой выступают только конец угольной палочки и проволочка, припаянная к цинковой коробочке. Сухие элементы используются, в частности, для питания карманных фонариков (рис. 457).

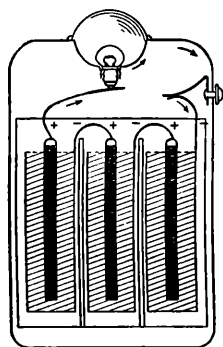


Рис. 457. Разрез карманного фонарика и его батарейки.

Угли элементов показаны черными; их окружают цинковые коробочки, внутри которых находится паста с раствором нашатыря; между элементами — картонные прокладки.

Гальванические элементы употребляются в качестве источников тока в установках для электрической сигнализации, для звонков, телеграфа и т. п.

§ 339. Аккумуляторы. Гальванические элементы могут работать до тех пор, пока не будет полностью израсходована заключенная в них химическая энергия (например, пока не растворится цинк в элементе Лекланше). Иногда пользуются такими гальваническими элементами, в которых необходимая для их действия химическая энергия возобновляется посредством электролиза. Такие элементы называются а к к у м у л я т о р а м и, а процессы накопления в них энергии (аккумуляирование энергии) посредством электро-

лиза — з а р я д к о й аккумулятора. При зарядке аккумуляторов через них пропускают ток от какого-нибудь постороннего источника в направлении, противоположном току, который они дают.

В технике употребляют аккумуляторы двух типов. К и с л о т н ы е аккумуляторы состоят из свинцовых пластин, опущенных

в раствор серной кислоты (рис. 458). Отрицательные пластины делаются из чистого свинца с сильно разрыхленной поверхностью (губчатый свинец); положительные пластины покрыты перекисью свинца. При разрядке аккумулятора обе пластины постепенно покрываются сернокислым свинцом. При зарядке аккумуляторов различие в составе положительных и отрицательных пластин восстанавливается электролизом. Эдс кислотного аккумулятора составляет около 2 в.

Важной характеристикой аккумулятора является емкость аккумулятора. Емкостью аккумулятора называется наибольшее количество электричества, которое можно получить при разрядке аккумулятора до наименьшего допускаемого напряжения. Емкость аккумулятора принято измерять не в кулонах, а в ампер-часах. Аккумулятор емкостью 40 а-час может давать без вреда для себя ток 4 а в течение 10 часов, или ток в 2 а в течение 20 часов и т. д.

Емкость аккумулятора зависит от размеров пластин. Чем больше поверхность пластин, тем больше активной массы (перекиси свинца и губчатого свинца) находится на них и больший запас химической энергии может принять аккумулятор. При разрядке химическая энергия превращается в электрическую.

При разрядке аккумулятор, конечно, не возвращает всей энергии, которая была затрачена на его зарядку; часть энергии тратится на нагревание электролита и пластин при прохождении зарядного и разрядного тока. Отношение количества энергии, полученной от аккумулятора при разрядке, к количеству энергии, затраченной на зарядку, называется коэффициентом полезного действия аккумулятора (кпд свинцового аккумулятора около 75—85%).

Аккумулятор — очень распространенный прибор. С ним приходится иметь дело и водителю автомобиля, с ним вы встречаетесь и при выполнении лабораторных работ. Поэтому важно знать основные правила обращения с аккумулятором. Несоблюдение их приводит к порче аккумулятора.

Важнейших из этих правил два:

1. Не допускать получения от аккумулятора токов, численно больших $\frac{1}{8}$ — $\frac{1}{10}$ его емкости в ампер-часах. Так, для аккумулятора емкостью 40 а-час предельный допустимый ток 4—5 а. Ни в коем случае не допускать короткого замыкания. Аккумулятор имеет очень малое внутреннее сопротивление, и при коротком замыкании возникнет чрезмерно сильный ток, который вызовет коробление пластин и выкрашивание активной массы.

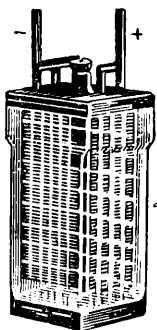


Рис. 458. Внешний вид кислотного аккумулятора.

Число положительных пластин на одну меньше числа отрицательных.

2. Не допускать при разрядке падения напряжения ниже 1,8 в, считая на каждую банку аккумуляторной батареи. При падении напряжения ниже этого предела на пластинах аккумулятора начинается выделение белого нерастворимого налета — крупнозернистого сернокислого свинца (сульфата). Закрывая поверхность пластин, сульфат свинца приводит к уменьшению емкости аккумулятора. Поэтому аккумулятор надо поддерживать в заряженном состоянии.

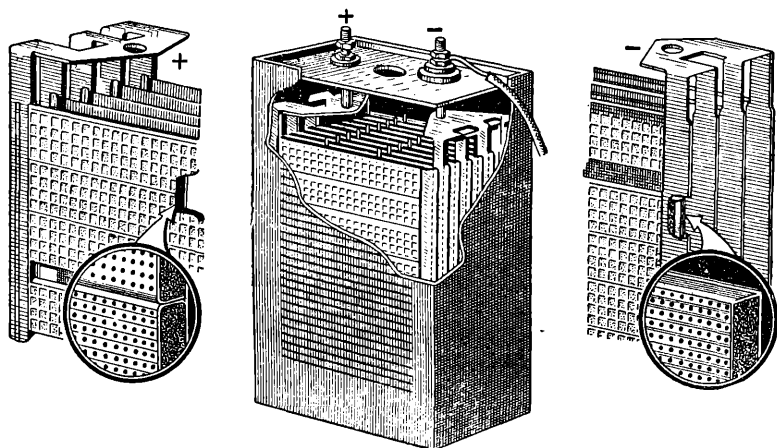


Рис. 459. Внешний вид и устройство пластин щелочного аккумулятора.

Щелочные аккумуляторы состоят из пластин никелевой стали, снабженных карманами (рис. 459). В карманы закладываются окись никеля (положительная пластина) и окись железа (отрицательная пластина). Электролитом служит раствор едкого калия. Эдс щелочного аккумулятора составляет около 1,3 в. Щелочные аккумуляторы удобнее и легче кислотных, но кпд их около 50%.

Аккумуляторы являются необходимой принадлежностью автомобилей, самолетов, поездов с электрическим освещением, телефонных станций, подводных лодок и т. п.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ И В ВАКУУМЕ

§ 340. Ионы в газах. *Газы, вообще говоря, проводят электричество плохо.* Однако в некоторых случаях электропроводность газов сильно возрастает.

Электропроводность газа увеличивается при повышении температуры. Например, довольно хорошо проводят электричество накалинные газы пламени.

Электропроводность газов увеличивается при прохождении через них некоторых лучей — ультрафиолетовых, рентгеновых, лучей радиоактивных веществ, космических лучей.

Это объясняется так. Электропроводность веществ зависит, как мы выяснили (§ 252), от концентрации носителей зарядов и от их подвижности. В случае газов изменение электропроводности связано, при неизменной плотности газа, с изменением концентрации носителей. В обычном состоянии газы состоят из нейтральных молекул и ничтожного числа положительных и отрицательных ионов, о происхождении которых мы скажем позже. Под влиянием указанных выше причин электроны отрываются от атомов и нейтральные молекулы газа превращаются в ионы; отделившийся электрон при достаточной плотности газа (например, при атмосферном давлении) через короткое время притягивается к нейтральной молекуле, образуя, таким образом, отрицательный ион. Процесс образования ионов называется *и о н и з а ц и е й* газа.

Чтобы из нейтральной молекулы получились электрон и положительный ион, нужно произвести работу (*р а б о т у и о н и з а ц и ю*), которая для разных газов различна. Работа ионизации может быть произведена или за счет кинетической энергии каких-либо частиц, или за счет энергии лучей, о которых только что говорилось. В частности, ничтожное число ионов, которое всегда присутствует в окружающем воздухе, образуется под действием излучений радиоактивных веществ, всегда имеющихся, хотя и в ничтожно малых количествах, в почве, в стенах зданий и т. д. Положительные и отрицательные ионы могут при соударениях нейтрализовать друг друга, образуя обычные молекулы (этот процесс называется *р е к о м б и н а ц и е й*).

При установившемся состоянии газа ионизация и рекомбинация уравниваются друг друга: число пар ионов, появляющихся вследствие ионизации, равно числу ионов, исчезающих за то же время вследствие рекомбинации. Легко понять, что чем больше число пар ионов, появляющихся за единицу времени, тем большей должна быть концентрация ионов в газе, чтобы ионизация и рекомбинация взаимно уравнивались. При обычных условиях число пар ионов, появляющихся в 1 см^3 газа на 1 сек , мало (7—8), а потому незначительно и число пар ионов в газах (примерно 1000 в см^3).

Итак, для ионизации газа необходимо, чтобы число пар ионов, появляющихся в нем за единицу времени, было велико. При высокой температуре газа в нем имеется достаточное число молекул, которые движутся со столь большими скоростями, что за счет их кинетической энергии может быть произведена работа ионизации. В случае облучения газов работа ионизации производится за счет энергии, переносимой лучами.

§ 341. Самостоятельная ионизация газа. В предыдущем параграфе мы рассмотрели те случаи ионизации газа, когда работа ионизации производится за счет притока энергии извне (приток теплоты от пламени, перенос энергии разного рода лучами). Перейдем к случаю, когда работа ионизации производится за счет энергии электрического поля, в котором находится газ. Такая ионизация называется самостоятельной, а обусловленный ею ток в газе — самостоятельным током. Это название подчеркивает то обстоятельство, что поддержание газа в ионизованном состоянии производится без притока энергии извне.

Ионизация за счет энергии поля обнаруживается на опыте следующим образом. Если постепенно увеличивать напряжение между электродами, помещенными в газ, то при некотором напряжении электропроводность газа начнет быстро увеличиваться. Электроны, которые в незначительном количестве всегда имеются в газе, при наличии электрического поля движутся ускоренно. Пролетев некоторое расстояние, они сталкиваются с молекулами газа. Если скорость электронов мала, то после соударения состояние молекул, на которые налетели при своем движении электроны, оказывается таким же, каким оно было до столкновения (такой удар называется упругим). Если же скорость электронов велика, то соударение с молекулой может повести к изменению ее внутреннего состояния (неупругий удар); в этом случае последствия удара могут быть различными: 1) молекула газа, оставаясь нейтральной, может перейти в «возбужденное» состояние, при котором ее внутренняя энергия больше, чем внутренняя энергия невозбужденной молекулы; 2) молекула будет ионизована (это можно рассматривать как крайнюю степень «возбуждения»). Если напряженность электрического поля, в котором находится газ, мала, то от одного столкновения до

другого электрон не успеет приобрести достаточной скорости, удар будет упругим, в молекулах не произойдет никаких изменений и электропроводность газа останется малой. Если же напряженность поля велика, то при том же пробеге электрон приобретет большую скорость, удар окажется неупругим и молекула сможет быть ионизована (ударная ионизация) или «возбуждена». Электроны, оторвавшиеся при ионизации от молекул, в свою очередь могут под действием поля получить скорость, достаточную для ионизации. Вследствие этого концентрация ионов, а вместе с ней и электропроводность газов сильно возрастают.

Отметим, что при рекомбинации и при возвращении молекул из «возбужденного» состояния в нормальное происходит выделение энергии в том или ином виде. В частности, при этих процессах часто происходит излучение видимого света. Этим и объясняется свечение газов, часто наблюдаемое при прохождении сквозь них тока.

§ 342. Зависимость тока в газах от напряжения. Для металлов и электролитов зависимость тока от напряжения выражается законом Ома. Суть закона Ома состоит в том, что сопротивление проводника не зависит ни от тока, ни от напряжения. При увеличении напряжения U в несколько раз во столько же раз увеличивается и ток, а потому сопротивление $R = \frac{U}{I}$ остается неизменным. Это можно объяснить тем, что концентрация (число в 1 см^3) носителей зарядов (электронов в металлах, ионов в электролитах) практически не зависит от того, находится проводник в электрическом поле или нет.

Иное положение имеет место в газах. В них при увеличении напряжения ток сперва растет пропорционально напряжению (участок OK на рис. 460); затем этот рост замедляется и, наконец, прекращается (участок AB — так называемый ток насыщения). Дальнейшее повышение напряжения снова приводит к резкому увеличению тока (участок BC). Чем объяснить такой ход графика?

Ослабление, а затем прекращение роста тока при повышении напряжения объясняется тем, что при наличии тока не все образующиеся в газе ионы рекомбинируют. Часть из них осаждается на электродах, отдает им свой заряд, превращаясь при этом в нейтральные молекулы. Поэтому число рекомбинирующих ионов по мере роста тока все уменьшается. Наконец, когда все появляющиеся между электродами ионы осаждаются на электродах, не рекомбини-

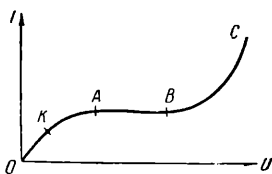


Рис. 460. График зависимости тока в газе I от напряжения U .

руя, дальнейшее повышение напряжения не ведет к росту тока (участок AB на рис. 460). Участок BC на том же графике соответствует самостоятельной ионизации газа.

§ 343. Разряд с острия. Ударная ионизация может происходить при разном приложенном напряжении. Если электроды имеют форму больших шаров, то ударная ионизация получается лишь при большом напряжении. Если же хотя бы один из электродов имеет вид острия, то ионизация ударом происходит при том же расстоянии между электродами уже при небольшом напряжении.

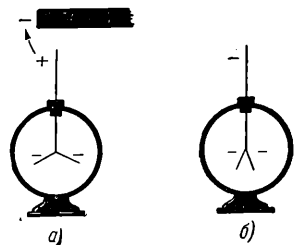


Рис. 461. а) К электроскопу с острием поднесена отрицательно заряженная палочка; б) по удалении палочки электроскоп остался отрицательно заряженным.

Это легко обнаружить. Поднесем к шару на верхнем конце незаряженного электроскопа заряженную палочку. На шарике и на листочках образуются, как мы знаем (§ 222), два разноименных заряда (см. рис. 301). Заряд на шарике притягивается к заряду на палочке, но так как воздух — плохой проводник, то этот заряд остается на шарике; при удалении палочки он соединяется с зарядом на листочках (листочки сходятся); в результате электроскоп остается незаряженным. Если же повторить опыт, заменив шарик иглой (рис. 461, а), то по удалении заряженной палочки листочки электроскопа не сойдутся (рис. 461, б). Это означает, что заряд, получившийся вследствие электризации через влияние на игле, соединился через воздух с зарядом на палочке, т. е. произошел разряд с острия. Следовательно, воздух вблизи острия при приближении палочки стал проводить электричество.

Как объяснить разряд с острия? Мы знаем (§ 221), что на заряженных телах заряды располагаются преимущественно на выдающихся частях, в особенности на остриях. Поэтому вблизи острия получается особенно сильное электрическое поле. Это поле вызывает ударную ионизацию, и воздух вблизи заряженного острия становится хорошим проводником.

Чтобы избежать разряда с острия, в технике высоких напряжений стараются избегать острых углов, тонких проволок и т. п. В устройствах, служащих для предохранения от удара молнии (грозозащита), действие острия, наоборот, является полезным. Для этого над зданием укрепляется металлическое острие, от которого отходит толстый провод, соединенный с металлической пластиной, закопанной в землю (молниеотвод, рис. 462). Если над молниеотводом проходит заряженное облако, то благодаря

стеканию зарядов с молниеотвода поле в воздухе возле него ослабляется и молния не ударяет. Если же молния все-таки ударит, то заряд пройдет по проводу в почву, минуя здание.

§ 344. Искра. Если присоединить один конец проволоки к наружной обкладке заряженной лейденской банки, а другой приблизить к стержню, соединенному с внутренней обкладкой банки, то произойдет разряд в виде искры. Искра — чрезвычайно кратковременный разряд (она длится сотысячные доли секунды) происходящий в узком канале, заполненном раскаленными газами. Кратковременность искры можно обнаружить, освещая ею быстро движущийся предмет: он кажется неподвижным.

В течение ничтожного времени образования искры происходят очень сложные и пока еще не полностью изученные процессы. Сначала ток быстро увеличивается, образуя узкий канал, заполненный накалившимися газами. Потом, когда заряды, которые образовали поле, вызвавшее искру, исчезнут, ток начнет убывать, а накопленная в канале энергия быстро рассеется в окружающем пространстве в виде света и звука.

Искра, получаемая в лабораторных условиях, имеет некоторое сходство с молнией — разрядом между двумя разноименно заряженными облаками или между облаком и Землей. Появление зарядов на облаках вызывается движением воздуха с находящимися в нем заряженными капельками или снежинками. Это движение отдалает друг от друга капельки, заряженные разноименными зарядами (крупные капли заряжены разноименно с мелкими), и этим создает громадные разности потенциалов между облаками (обычно нижняя часть грозового облака заряжена отрицательно, верхняя — положительно).

При проскакивании искры между металлическими электродами наблюдается перенос металла от отрицательного электрода к положительному. Это явилось основой электроискровой обработки металлов, которая заключается в удалении металла с изделия посредством образования искры между электродом нужной формы и изделием. Электроискровая обработка дает возможность делать отверстия и каналы любой формы с большой точностью, причем таким способом можно обрабатывать изделия из столь твердых металлов, которые с трудом поддаются иной обработке.

§ 345. Электрическая дуга. Одним из наиболее важных проявлений теплового действия тока является выделение теплоты при особом виде электрического тока в газе — электрической дуге. Электрическая дуга была открыта русским физиком В. В. Петровым в 1802 г. Она возникает, например, при следующих условиях. На два угольных стержня (электрода) подают напряжение 35—40 в и приводят их в соприкосновение. Через место соприкосновения электродов идет сильный ток, и оно быстро накаливается добела. Затем электроды раздвигают, но ток продолжает идти по разделяющему их газу.

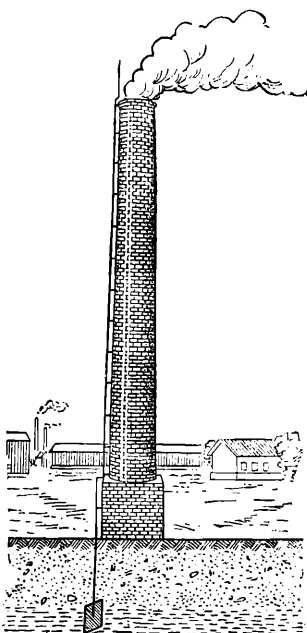


Рис. 462. Молниеотвод.

Концы электродов раскаляются, особенно положительный электрод (анод), температура которого поднимается до 4000°C . Оба электрода постепенно испаряются (анод быстрее). Пространство между ними заполнено накаливаемыми парами материала электродов и воздухом, принимающими вид светящейся дуги (рис. 463). При высокой температуре газы уже хорошо проводят ток.

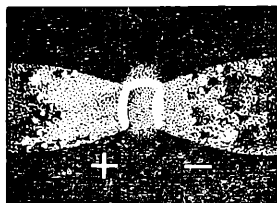


Рис. 463. Дуга Петрова между угольными электродами.

рубильника и сопровождается бесполезной тратой энергии. Поэтому во всех цепях, по которым идут сильные токи, принимаются меры к быстрому устранению дуги, возникающей в местах разрыва цепи.

Дуга между угольными электродами употребляется в качестве сильного источника света (маяки, прожекторы, киноаппараты).

Дуга между металлическими электродами широко используется для сварки металлических конструкций, например труб. В показанном на рис. 464 способе

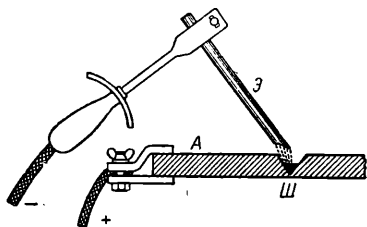


Рис. 464. Дуговая сварка.

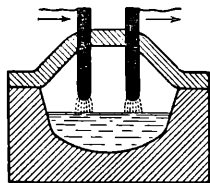


Рис. 465. Дуговая печь для плавки металлов.

сварки одним из электродов служит свариваемый металл *А*, другим — тонкий металлический стержень *Э*, плавящийся в дуге; металл стекает в шов *Ш* и заполняет его. Далее, большое распространение имеют дуговые печи, в которых расплавление металлов производится электрической дугой между толстыми угольными стержнями и металлом (рис. 465).

§ 346. Электрический ток в разреженных газах. Мы видели, что ударная ионизация легко происходит вблизи острий. Другим обстоятельством, облегчающим ионизацию ударом в газе, является его разрежение. Это можно обнаружить при помощи следующего опыта (рис. 466). В стеклянную трубку *М* впаивают два электрода *А* и *К*, соединенные с источником высокого напряжения (например,

с электрофорной машиной, § 212). Из трубки можно откачивать воздух. При атмосферном давлении ток через трубку почти не идет. Если же воздух в трубке разредить, в трубке появляется ток, т. е. электропроводность воздуха в ней увеличивается.

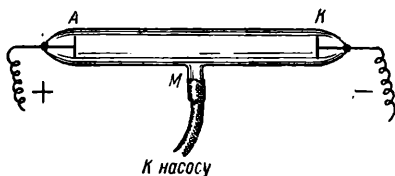


Рис. 466. Если в трубке *М* находится воздух при атмосферном давлении, то ток через нее не идет. Если воздух разрежен, то ток идет.

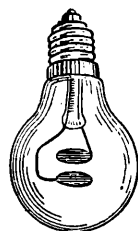


Рис. 467. Неоновая лампа.

Прохождение тока по разреженному газу сопровождается свечением его, причем газ остается холодным. Цвет и форма свечения зависят от природы газа и от степени его разрежения.



Рис. 468. Полярное сияние.

При некотором определенном давлении (около 1 мм рт. ст.) электропроводность газов достигает наибольшего значения. Затем, при дальнейшем разрежении газа, электропроводность начинает уменьшаться, и при высоком разрежении ток снова прекращается. Электропроводность очень разреженного газа близка к нулю.

Изменение электропроводности газа при уменьшении его плотности объясняется так. В разреженном газе электроны реже сталкиваются с молекулами. Поэтому они и в более слабом поле успевают приобрести скорость, достаточную для ионизации ударом. Но если разрежение слишком велико, электроны на своем пути встречают совсем мало молекул. Поэтому появляется мало новых ионов и электропроводность газа уменьшается.

Свечение газов при прохождении электрического тока часто используется в осветительной технике (газосветные лампы и трубки). На рис. 467 показана газосветная лампа, работающая при напряжении 110—220 в, в которой светится красным светом наполняющий ее газ неон. Свечение газа при прохождении сквозь него электрического тока используется также в так называемых люминесцентных лампах, о которых будет идти речь в разделе «Оптика».

В высоких географических широтах часто наблюдается свечение верхних слоев атмосферы (полярные сияния, рис. 468). Оно вызывается потоками заряженных частиц, проходящих от Солнца.

§ 347. Катодные лучи. Продолжая выкачивать воздух из трубки, показанной на рис. 466 мы заметим, что свечение газа прекращается. Это является следствием того, что газ из трубки почти полностью откачан. Вместе с тем мы увидим, что стенка стеклянной трубки,

расположенная против катода, начинает светиться зеленоватым светом. Если между катодом и противоположной ему стенкой поместить металлическое тело, то на стенке образуется «тень» (рис. 469). Это дало повод считать, что катодом в хорошо откачанной трубке испускаются лучи, которые получили название к а т о д н ы х.

В настоящее время установлено, что катодные лучи представляют собой поток электронов, летящих от катода.

Электрическая природа катодных лучей может быть доказана отклонением лучей магнитом (тень смещается). Имея большую скорость (порядка 10^{10} см/сек), электроны катодных лучей обладают большой энергией. Что заставляет электроны вылетать из катода? Оказывается, они выбиваются из катода ударами положительных ионов, которые имеются в небольшом количестве газа, оставшегося

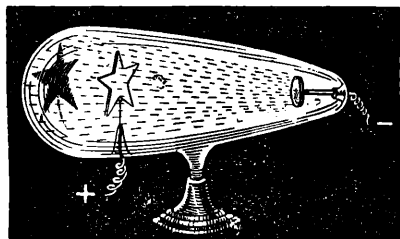


Рис. 469. Катодные лучи, падая на стекло, вызывают его свечение. Позади металлической «звезды» стекло не светится.

в трубке. Положительные ионы, двигаясь в сильном электрическом поле вблизи катода, приобретают громадные скорости и, ударяя в катод, выбивают из него электроны. Далее мы познакомимся с другими явлениями, при которых тоже происходит вылет электронов из металлов.

§ 348. Электронная лампа. В современной технике, в особенности в радиотехнике, огромное значение имеют электронные трубки, или, как их иначе называют, электронные лампы. Простейшая электронная лампа представляет собой стеклянную колбу, из которой очень тщательно откачан воздух. Внутри лампы впаяны два электрода: тонкая металлическая нить, накаливаемая током, и расположенный вокруг нее металлический цилиндр (рис. 470). Между нитью и цилиндром создается напряжение (например, при помощи батареи элементов). Пока нить холодная, ток между нитью и цилиндром не идет. При накаленной нити, если цилиндр соединен с положительным, а нить — с отрицательным полюсом батареи, появляется ток. Значит, накаленная нить испускает электроны.

Это объясняется так. Электроны, которые свободно движутся внутри холодного (например, комнатной температуры) металла, не могут выйти за его пределы, так как на границе металл — вакуум имеется поле, задерживающее электроны (см. § 276), а энергия свободных электронов внутри металла, вообще говоря, слишком мала, чтобы за ее счет могла быть произведена работа выхода. При высокой температуре число электронов, энергия которых достаточна для совершения работы выхода, гораздо больше, чем при низкой температуре, и вылет их за пределы металла легко обнаруживается.

Измеряя ток в анодной цепи и напряжение между анодом и катодом (рис. 470), мы найдем, что при увеличении напряжения ток сперва растет медленно, затем быстрее, а при еще более высоком напряжении рост его замедляется (рис. 471) и, наконец, прекращается. Получается ток насыщения. Чем объясняется такая зависимость между напряжением и силой тока, совсем непохожая на закон Ома (ср. рис. 334)? При отсутствии или при малой величине напряжения между цилиндром и нитью вокруг накаленной нити образуется «облако» электронов, затрудняющее дальнейший

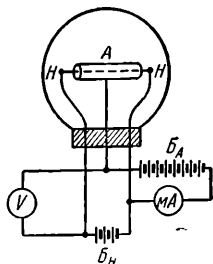


Рис. 470. Схема включения электронной лампы с двумя электродами.

НН — нить накала (катод); *А* — металлический цилиндр (анод); *БН* — источник тока для накала нити; батарея *БА* создает напряжение между анодом и катодом; *mA* — амперметр для измерения анодного тока; *V* — вольтметр для измерения напряжения между анодом и катодом.

вылет электронов из нити и отталкивающее их обратно к нити. По мере увеличения напряжения электроны быстрее уходят к цилиндру, «облако» электронов рассасывается и число электронов, вылетающих из нити и приходящих на анод (цилиндр), увеличивается. Наконец, при некотором определенном напряжении все вылетевшие из нити электроны приходят на анод. Дальнейшее увеличение напряжения при данном накале (температуре) нити не увеличивает числа электронов, попадающих на анод (ток насыщения), увеличивается лишь скорость, с которой они достигают анода. Но, повысив накал нити, мы, конечно,

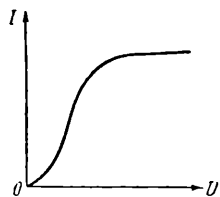


Рис. 471. График зависимости анодного тока I в электронной лампе от напряжения U .

увеличим число электронов, вылетающих из нити, и ток увеличится.

У п р а ж н е н и е

444. При токе насыщения температура накала нити электронной лампы заметно ниже, чем в отсутствие анодного тока или при малой его величине. Объясните, почему.

§ 349. **Кенотрон.** Если нить накала в электронной лампе присоединить к положительному полюсу источника тока (B_A на рис. 470), а цилиндр соединить с отрицательным полюсом того же источника, то ток по электронной лампе не пойдет даже в том случае, когда нить накалена и испускает электроны. При таком включении лампы электроны, вылетевшие из нити, отталкиваются полем обратно. Спустя ничтожное время после включения лампы устанавливается подвижное равновесие: число электронов, возвращающихся на нить, равно числу электронов, вылетающих с нити за то же время. Электронная лампа, таким образом, обладает односторонней проводимостью, с которой мы встретимся, изучая полупроводники. Поэтому электронные лампы часто используются в качестве выпрямителей переменного тока (кенотронов).

§ 350. **Трехэлектродная электронная лампа.** В радиотехнике электронные лампы, описанные в § 348, имеют широчайшее применение. Мы указывали, что в электронной лампе имеются катод, накаленный и вследствие этого испускающий электроны, и анод в виде цилиндра, охватывающего катод. В трехэлектродных лампах (т р о д а х) это устройство дополнено введением третьего электрода — сетки. Сетка обычно представляет собой спираль C , располагаемую между нитью накала K и анодом A (рис. 472). Заряжая сетку положительно относительно катода, мы увеличиваем анодный ток. Наоборот, заряжая сетку относительно катода отри-

цательно, мы ослабляем или даже совсем прекращаем анодный ток, так как при этом сетка отталкивает электроны обратно к катоду.

На рис. 473 представлены х а р а к т е р и с т и к и одного из триодов — графики, показывающие, как изменяется при разных анодных напряжениях анодный ток в зависимости от напряжения на сетке.

Итак, изменяя напряжение между сеткой и нитью накала, можно управлять движением электронов от нити к аноду (анодным током).

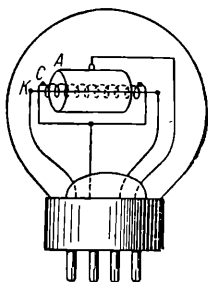


Рис. 472. Устройство трехэлектродной электронной трубки.

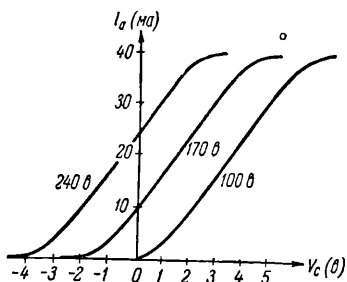


Рис. 473. Графики зависимости анодного тока I_a от напряжения V_c между сеткой и катодом при разных напряжениях между анодом и катодом.

При этом можно добиться того, что колебания напряжения на сетке, требующие затраты ничтожной мощности, будут вызывать значительно более мощные колебания анодного тока.

Увеличение энергии колебаний происходит, очевидно, за счет работы источника тока, создающего напряжение между нитью накала и анодом. Таким образом, триод может служить для усиления колебаний (у с и л и т е л ь н а я л а м п а).

У п р а ж н е н и е

445. Пользуясь рис. 473, найдите изменение мощности анодного тока (анодной батареи) при изменении напряжения между сеткой и катодом от 0 до 2 в, если анодное напряжение равно 170 в.

§ 351. Электронно-лучевая трубка. Одним из самых распространенных современных электронных приборов является электронно-лучевая трубка. Она входит как обязательная составная часть в устройство телевизоров, электронных осциллографов и многих приборов автоматики.

Электронно-лучевая трубка представляет собой удлиненную колбу, откачанную до высокого вакуума (рис. 474). Дно колбы покрыто изнутри тонким слоем вещества, способного светиться

под ударами электронов. С узкого конца колбы в нее монтируется катод, накаливаемый током до $1\,500\text{--}2000^\circ\text{C}$. Раскаленный катод (электронная пушка) испускает электроны, которые устремляются к аноду, состоящему обычно из двух цилиндров с диафрагмами. Между катодом и анодом прикладывается разность потенциалов в несколько сотен или тысяч вольт. Возникшее сильное электрическое поле

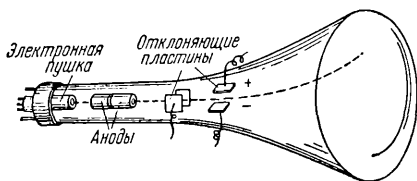


Рис. 474. Схематическое изображение электронно-лучевой трубки.

ускоряет электроны настолько, что они пролетают сквозь диафрагмы анода и летят дальше с огромной постоянной скоростью к экрану (дну колбы). Ударяя в экран, они вызывают свечение его в виде яркого пятнышка в центре экрана (рис. 475, а).

Поток электронов на пути от катода до экрана проходит еще между двумя парами пластин — вертикальных и горизонтальных.

Если подать на пару вертикальных пластин напряжение от специального вмонтированного в осциллограф лампового «генератора развертки», то поток электронов отклоняется в горизонтальном направлении и пятнышко на экране сместится пропорционально приложенному напряжению. Но так как это напряжение переменное, то пятно на экране будет перемещаться с большой скоростью слева направо и обратно. При большой частоте переменного напряжения развертки глаз видит не отдельные положения пятнышка, а горизонтальную светящуюся полосу (рис. 475, б).

Если выключить развертку, то пятнышко возвратится в центр экрана. Подача испытуемого переменного напряжения, например напряжения осветительной сети на горизонтальную пару пластин, даст на экране вертикальную полосу (рис. 475, в).

Если же включить и развертку, и сеть, то на экране появляется застывшая, неподвижная синусоида — осциллограмма исследуемого переменного напряжения (рис. 475, г).

Так как электроны имеют ничтожную массу, то электронный поток почти не обладает инерцией и осциллограмма почти мгновенно следует за малейшими отклонениями напряжения и очень быстрыми

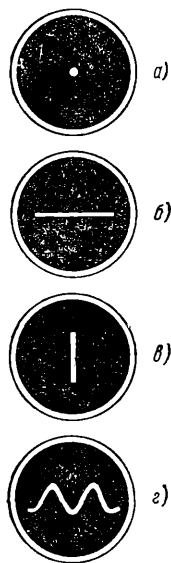


Рис. 475. Картины на экране осциллографа: а) включена трубка; б) включена развертка; в) включена сеть; г) включены развертка и сеть.

колебаниями — порядка миллионов герц. В этом заключается основное преимущество электронного осциллографа перед приборами других систем.

Электронный осциллограф находит самое широкое применение в современных промышленных и научных лабораториях при исследовании электрических, механических колебаний, деформаций и других периодических изменений во времени.

§ 352. Понятие о плазме. Магнитно-гидродинамический генератор. Кратко можно дать такое определение: плазмой называется состояние вещества, характеризующееся высокой степенью ионизации. В предыдущих параграфах мы познакомились с такого рода состоянием, например, в электрической дуге, молнии, электрической искре, в газосветных трубках. Плазменное состояние, необычное и редкое в земных условиях, является наиболее распространенным во Вселенной. Основная масса вещества во Вселенной (звезды, Солнце, межзвездная среда) находится в состоянии плазмы. В главе об энергии атомного ядра будет рассказано об огромных запасах энергии, которые можно будет получить, когда человек научится управлять реакциями, протекающими в высокотемпературной плазме.

Свойства плазмы настолько отличны от свойств известных свойств вещества в твердом, жидком и газообразном состоянии, что плазму иногда называют четвертым состоянием вещества.

Несмотря на наличие в плазме заряженных частиц, плазма электрически нейтральна или почти нейтральна; сумма отрицательных зарядов электронов равна сумме положительных зарядов ионов.

Под действием электрического поля скорость и, следовательно, кинетическая энергия электронов становится очень большой, что соответствует температурам в десятки, сотни тысяч и миллионы градусов. При этом энергия хаотического движения электронов плазмы может значительно превосходить энергию движения ионов и нейтральных атомов. По отношению к плазме в этом случае нельзя говорить об одной общей температуре, а приходится различать электронную, ионную и атомную температуру.

Различие электронной, ионной и атомной температур и неполная ионизация характерны для газоразрядной плазмы.

В астрофизических условиях (например, в недрах звезд) ионизация приближается к 100%, нет также (в большинстве случаев) каких-либо причин для большого отличия температур электронов от температуры ионов.

Изучение плазменного состояния вещества весьма существенно для электротехники, радиотехники и проблемы управляемой термоядерной реакции.

Остановимся еще на одном возможном применении плазмы в технике ближайшего будущего — на так называемом магнитно-гидродинамическом генераторе электрической энергии (МГД генераторе).

Идея МГД генератора очень проста. Она заключается в возможности преобразования энергии топлива непосредственно в электрическую энергию, минуя промежуточную ступень получения механической энергии турбины, вращающей ротор обычного генератора. Вращающийся в магнитном поле ротор заменен в МГД генераторе струей ионизированного газа (плазмы), направляемой поперек магнитного поля. Рис. 476 показывает схему магнитно-гидродинамического процесса получения электроэнергии.

Плазменная струя выбрасывается из сопла 1 со скоростью v в направлении поперек магнитного поля (H — напряженность поля). При пересечении магнитных силовых линий в электропроводящей плазменной струе возникает эдс индукции (E — напряженность электрического поля), подобно тому, как она возникает в обычном металлическом проводнике при движении поперек магнитного поля. Находящиеся в контакте с плазмой электроды 2 служат как бы щетками генератора и отводят ток к потребителю 3.

Несмотря на всю заманчивость идеи подобного безмашинного способа преобразования энергии топлива в электрическую, практическое осуществление ее встречается с рядом технических и теоретических трудностей. Высокая температура хорошо электропроводящей плазмы (около 2000°K) требует

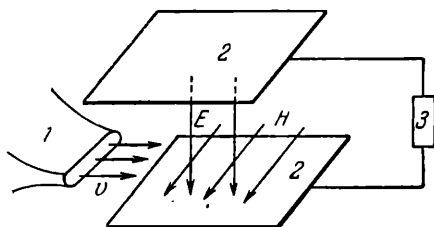


Рис. 476. Магнитно-гидродинамический генератор (схема).

применения особо жаростойких материалов для стенок камеры сгорания и самого генератора, равно как и для контактов. Для обеспечения хорошей электропроводности струи приходится прибегать к присадке легко ионизирующихся веществ (пары щелочных металлов). Теоретический вопрос тоже оказывается не столь простым, как мы были вынуждены изложить его в элементарном учебнике.

Тем не менее, отсутствие вращающихся частей, а также исключение из процесса тепловой машины с ее низким КПД делает метод магнитно-гидродинамического генерирования электроэнергии весьма перспективным и позволяет надеяться, что он в недалеком будущем займет подобающее ему место в промышленной энергетике.

СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

§ 353. Ток в полупроводниках. Среди громадного разнообразия окружающих нас веществ наиболее распространенными являются полупроводники, т. е. вещества, занимающие в отношении электропроводности промежуточное положение между хорошими проводниками и хорошими изоляторами. Полупроводниками могут быть и химические элементы, и их соединения. Удельные сопротивления полупроводников могут отличаться между собой в миллиарды раз (примерно от 10^{-3} до 10^8 ом · м). Природа носителей тока в разных полупроводниках различна: в некоторых из них, так же как и в электролитах, носителями зарядов являются ионы; в других носителями зарядов являются электроны. Наибольший интерес представляют кристаллические полупроводники, в которых носителями являются электроны. В дальнейшем, говоря о полупроводниках, мы будем иметь в виду именно такие вещества.

Наиболее характерным свойством полупроводников являются резкие изменения сопротивления под влиянием внешних воздействий. Перечислим некоторые из них.

1) Во много раз значительнее, чем в металлах и электролитах, сопротивление полупроводников меняется при изменении температуры. Повышение температуры уменьшает сопротивление полупроводников (несколько процентов на 1°C). Это обстоятельство используется для создания электрических термометров или сигнализаторов повышения температуры; полупроводниковый термометр (так называемый термистор) показан на рис. 477.

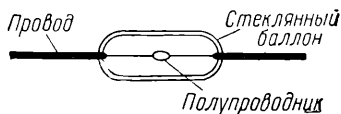


Рис. 477. Устройство термистора.

2) Сопротивление полупроводников обычно меняется при освещении. У одного из полупроводниковых элементов — селена — это свойство было обнаружено еще в прошлом веке. Изменение сопротивления полупроводников может быть вызвано видимым светом, невидимыми инфракрасными или ультрафиолетовыми лучами, рентгеновыми лучами и др. Это обстоятельство может быть использовано

для создания разного рода сигнализационных устройств (например, для контроля за уровнем жидкости в баках, управления движением каких-либо механизмов и т. п.).

3) Чрезвычайно резкое сопротивление полупроводников зависит от наличия в них примесей. В отличие от металлов примеси *уменьшают* сопротивление полупроводников. Например, добавка к чистому кремнию ничтожного количества фосфора может уменьшить его сопротивление в миллионы раз.

Весьма интересным свойством полупроводников представляются гораздо более резкие, чем в металлах, контактные, в частности термоэлектрические, явления. Именно на полупроводниковых термопарах можно как показывают исследования, построить удобные и экономичные генераторы электрического тока, работающие за счет энергии солнечных лучей. Ведутся также работы по созданию полупроводниковых холодильников и экономичных отопительных устройств путем использования эффекта поглощения и выделения энергии в контактах между двумя разнородными полупроводниками, по которым идет ток (см. § 275).

Далее мы познакомимся еще с другими важными применениями полупроводников.

§ 354. Носители зарядов в полупроводниках. В металлах носителями зарядов являются, как мы знаем, те электроны, которые могут свободно перемещаться по всему объему металла. Число «свободных» электронов в металле близко к числу атомов в нем, т. е. очень велико (примерно 10^{22} см^{-3}). Вследствие того, что от каждого атома отделился один (или более) электрон, кристаллическая решетка металла оказывается состоящей из положительных ионов, сохраняющих свои места в решетке. Электрический ток в металлах состоит в том, что свободные электроны продолжая свое беспорядочное движение, кроме того, всем «облаком» перемещаются в одном направлении. Положительные ионы в решетке и при наличии тока продолжают тепловые колебания около своих устойчивых положений.

Представим себе теперь, что число свободных электронов значительно меньше числа атомов, из которых состоит кристаллическая решетка. Это будет иметь место в том случае, если для «освобождения» электрона от связи с атомом требуется работа, для совершения которой энергии теплового движения при данной температуре у подавляющего числа атомов недостаточно; только небольшое число электронов отрывается от атомов и становится носителями зарядов. При этом ионами станут только некоторые из атомов в решетке. Кристаллическая решетка будет состоять из атомов, среди которых в разных местах находятся ионы (рис. 478, а). Так как ионы отличаются от атомов тем, что у них не хватает одного электрона, то те узлы решетки, где вместо атомов находятся ионы, получили название дырок.

Тепловое движение вызывает перескок электрона из соседнего атома в дырку. Результатом такого перескока будет исчезновение дырки там, где она была, и появление ее в том месте, где только что был нейтральный атом. Дырка как бы переместилась с одного места на соседнее (рис. 478, б). Если электрическое поле отсутствует, перемещения дырок носят совершенно беспорядочный характер. При наличии поля перескоки электронов будут более частыми в том направлении, в котором на электроны действует поле, т. е. против поля. Поэтому дырки будут перемещаться в направлении поля. Получится такой же результат, как будто в направлении поля перемещаются положительные заряды. Проводимость, связанная с перемещением дырок внутри кристаллической решетки, получила название дырочной проводимости.

Представим себе кристалл, в котором при комнатной температуре нет ни свободных электронов, ни дырок (так будет в том случае, если работа отделения электронов от атомов велика). В таком кристалле наличие электрического поля не вызовет никакого

тока. Это — изолятор. Будем повышать температуру кристалла. При некоторой температуре энергия теплового движения делается достаточной, чтобы часть электронов оторвалась от атомов и появились дырки. Тогда кристалл сразу приобретает две проводимости — дырочную и электронную. Такие полупроводники называются собственными полупроводниками. Из сказанного ясно, почему сопротивление полупроводников резко уменьшается при повышении температуры.

Гораздо больший интерес представляют примесные полупроводники. Примесными полупроводниками называются кристаллы, которые превращаются из изоляторов в полупроводники при наличии в них примесей. Примеси могут быть двух родов. Одни из них, называемые акцепторами, отнимают от атомов кристалла электроны и прочно удерживают их. Тогда в кристалле появляются дырки и он приобретает дырочную проводимость. При этом, в отличие от собственного полупроводника, электронная проводимость отсутствует.

Другие примеси, так называемые доноры, наоборот, легко отдают электроны. При введении таких примесей в кристалл изолятора он приобретает электронную проводимость, но не имеет дырочной.

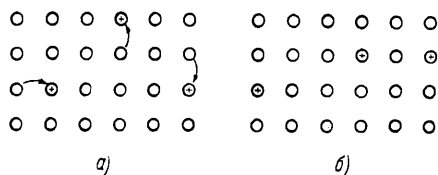
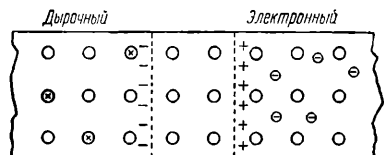


Рис. 478. а) Кристаллическая решетка, в которой часть атомов потеряла электроны, превратившись в «дырки». Стрелки показывают, что электрон соседнего атома переходит в «дырку»; б) после ухода электронов состояние «дырки» переходит на другие атомы.

Одно и то же вещество можно сделать и дырочным, и электронным полупроводником, смотря по тому, какой примеси в нем больше: донора или акцептора. Например, при отсутствии примесей закись меди (Cu_2O) является хорошим изолятором; при избытке атомов меди (донор) закись меди является электронным полупроводником; при избытке кислорода (акцептор) закись меди становится дырочным полупроводником.

В настоящее время наибольшее значение для производства дырочных и электронных полупроводников приобрели химические элементы кремний и германий.



Для получения нужных свойств их тщательно очищают, после чего добавляют к ним нужные примеси.

§ 355. Односторонняя проводимость. Полупроводниковые выпрямители. Термоэлементы. Холодильники. Фотоэлементы. Если в цепь последовательно соединены два полупроводника, один с электронной, а другой с дырочной проводимостью, то такая система обладает различной проводимостью в зависимости от

Рис. 479. Граница между полупроводником с дырочной (слева) и электронной проводимостями.

Переходный слой отмечен пунктирными линиями. При проходном направлении поле в переходном слое ослаблено, при запорном — усилено.

направления тока: ток в одном направлении идет (проходное направление), а в другом при том же напряжении практически отсутствует (запорное направление). Это явление называется односторонней проводимостью.

Объясняется это явление так. На границе между дырочным и электронным полупроводниками вследствие взаимной диффузии дырок и электронов образуется переходный слой, где нет ни электронов, ни дырок: они нейтрализуют друг друга. Вместе с тем в переходном слое, так же как и на границе между двумя металлами, возникает электрическое поле, имеющее направление от электронного проводника к дырочному (рис. 479). Это поле препятствует движению сквозь переходный слой и электронов, и дырок. Если приложить к этой системе напряжение такого знака, чтобы задерживающее поле в переходном слое ослабилось или совсем уничтожилось, то и дырки, и электроны смогут проходить сквозь слой и по системе пойдет ток (проходное направление). Если же подать напряжение противоположного знака, то поле в переходном слое будет усилено и ток не пойдет (запорное направление).

Такого рода приборы широко применяются в электротехнике для выпрямления переменного тока, т. е. для превращения тока, много раз в секунду меняющего свое направление, в ток, идущий

по одному направлению. В качестве примера рассмотрим устройство купроксного выпрямителя. На медной пластинке посредством окисления создается слой закиси меди, который со стороны, прилегающей к меди, имеет электронную проводимость, а с другой стороны — дырочную проводимость (рис. 480). На границе между ними и образуется тончайший переходный слой, обеспечивающий выпрямляющее действие.

Большое применение (например, для питания электромоторов постоянного тока от сети переменного тока на железнодорожном транспорте) получили кремниевые выпрямители (рис. 481, а: виден собранный выпрямитель и основная его деталь — пластинка из кремния, особо очищенного и обогащенного для создания дырочной и электронной проводимости фосфором и бором). Небольшая пластинка выпрямляет ток мощностью в сотни киловатт!

Полупроводники, включающие области дырочной и электронной проводимости, представляют интерес и в ряде других отношений.

Они часто обладают очень большой термоэлектродвижущей силой, что делает возможным использование их в качестве источника тока для питания радиоаппаратуры и для других целей (рис. 481, б).

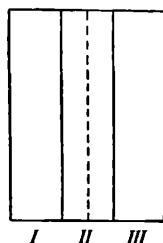


Рис. 480. Схема чередования слоев в купроксном выпрямителе.

I — медь; II — слой закиси меди, обогащенный слева медью, справа — кислородом; пунктиром показан переходный слой; III — мягкий металл, прижатый к закиси меди (свинец). На схеме все слои показаны имеющими одинаковую толщину; на деле слой II много тоньше обонх краинх.

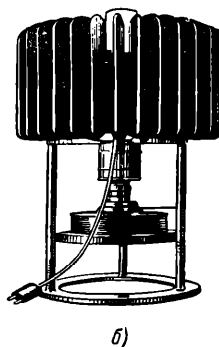
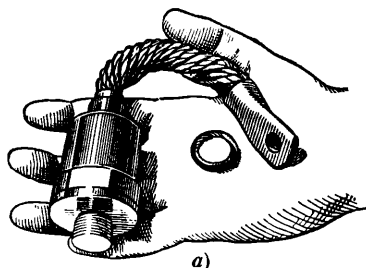


Рис. 481. а) Силовой полупроводниковый выпрямитель; б) батарея полупроводниковых термоэлементов надета в виде кольца на стекло керосиновой лампы и используется для питания радиоприемника.

Используя эффект охлаждения границы между областью дырочной и электронной проводимости при пропускании постоянного

(выпрямленного) тока, удалось сконструировать экономичные бытовые холодильники.

На искусственных спутниках Земли и на других космических аппаратах широко применяются полупроводниковые приборы, в которых энергия солнечного излучения превращается в электроэнергию (полупроводниковые фотоэлементы).

Инициатором ряда важных работ по использованию полупроводников явился выдающийся советский ученый А. Ф. Иоффе.

§ 356. Полупроводниковые усилители. Мы познакомились с устройством и действием электронных усилителей (§ 350). В последние годы широкое распространение получили усилители, действие которых основано на особых свойствах полупроводников. Напомним, что в переходном слое между электронным и дырочным полупроводниками имеется электрическое поле, мешающее движению и электронам, и дырок (см. § 355). Что будет, если каким-либо способом ввести в электронный полупроводник некоторое количество дырок настолько близко к переходному слою, чтобы они успели проникнуть в переходный слой ранее, чем их нейтрализуют электроны? Поле в переходном слое задерживает дырки, когда они движутся из дырочного слоя в электронный, но движение их в обратном направлении, наоборот, облегчает. Поэтому дырки легко проходят сквозь переходный слой.

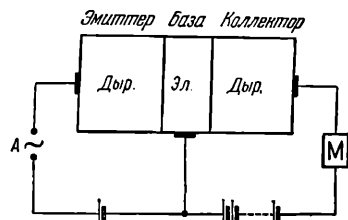


Рис. 482. Схема полупроводникового усилителя.

Этот эффект и используется в полупроводниковых усилителях. Полупроводниковый усилитель, схема которого показана на рис. 482 состоит из двух дырочных полупроводников, разделенных тонким слоем электронного полупроводника. Крайние полупроводники называются э м и т т е р о м и к о л л е к т о р о м, а промежуточный полупроводник — б а з о й. В схеме имеются два контура. Один из них (на рис. 482 левый) состоит из эмиттера, базы и источника небольшого напряжения, облегчающего движение зарядов по переходному слою между эмиттером и базой. Кроме того, в этом контуре включен прибор, воспринимающий внешние с и г н а л ы в виде переменного напряжения (что показано волнистой линией).

При наличии сигнала в левом контуре возникают колебания, и эмиттер периодически доставляет сквозь левый переходный слой в базу некоторое количество дырок. Часть этих дырок нейтрализуется в базе электронами (база — электронный полупроводник), но другая часть успевает, как было сказано, проникнуть сквозь правый переходный слой во второй дырочный полупроводник, ко-

торый собирает перешедшие из базы дырки. Коллектор, вместе с батареей высокого напряжения, прибором M , служащим для приема сигналов, и базой образует второй контур. Заряд, перенесенный дырками из базы, возвращается на базу «кружным путем» по второму контуру, причем благодаря наличию батареи высокого напряжения слабые сигналы, воспринимаемые A , проходят в прибор M значительно усиленными.

Полупроводниковые усилители во многих отношениях имеют преимущества перед электронными лампами (меньшие вес и размеры, большие сроки службы).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ
И ВОЛНЫ

§ 357. **Электромагнитные колебания.** В основе одного из самых поразительных достижений XX в. — радио — лежит использование электромагнитных колебаний и волн.

Электромагнитные колебания — явления, связанные с колебательным движением зарядов (электронов). Мы уже частично познакомились с электромагнитными колебаниями при рассмотрении свойств переменного тока (гл. XXIV). Однако тогда мы изучали колебания, вызываемые переменным напряжением, создаваемым генераторами тока. Период переменного тока, создаваемого генераторами, зависит от их устройства и скорости вращения.

В электрических лампах, электромоторах и других приборах, питаемых переменным током, происходят вынужденные электромагнитные колебания (см. § 128).

Частота переменного тока, вырабатываемого современными электростанциями, относительно мала: 50 гц. В радиотехнике используются электромагнитные колебания гораздо более высоких частот — порядка сотен тысяч и миллионов герц. Свойства таких колебаний резко отличаются от свойств переменного тока частотой 50 гц. В частности, приобретают особое значение явления резонанса и электромагнитного излучения, которые на низких частотах совсем незаметны.

§ 358. **Колебательный контур.** Колебательным контуром называется система, состоящая из конденсатора (емкость) и соединенной с ним катушки (индуктивность).

Что происходит в контуре при электромагнитных колебаниях? Пусть по какой-либо причине в катушке возникло движение электронов — электрический ток (рис. 483, а). Вследствие этого на одной из обкладок конденсатора будет получаться избыток электронов, а на другой — недостаток их; конденсатор зарядится, и в катушке возникнет напряжение, замедляющее движение электронов. Это напряжение вскоре остановит движение электронов (рис. 483, б),

а затем направит их в обратную сторону. В некоторый момент конденсатор разрядится, а ток в этот момент достигнет наибольшей величины (рис. 483, в). После этого благодаря самоиндукции контура (§ 304) движение электронов будет продолжаться еще некоторое время. Конденсатор вновь зарядится, но знаки на его обкладках поменяются местами (рис. 483, г). Электроны опять начнут двигаться в первоначальном направлении, и весь процесс повторится снова. Так будет продолжаться до тех пор, пока не будет израсходована вся энергия колебаний.

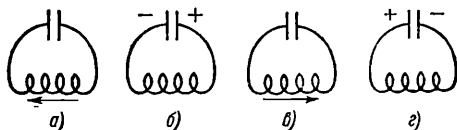


Рис. 483. Электромагнитные колебания. Стрелки показывают направления движения электронов.

Обратим внимание, что при электромагнитных колебаниях поочередно появляются то магнитное поле в катушке (наибольшее, когда ток достигает наибольшей величины), то электрическое поле в конденсаторе (наибольшее, когда ток прекращается).

Энергия магнитного поля обусловлена движением зарядов и поэтому является кинетической энергией. Энергия электрического поля обусловлена расположением зарядов и поэтому является потенциальной энергией. Значит, при электромагнитных колебаниях, как и при всех других видах колебаний, происходит попеременный переход кинетической энергии в потенциальную и обратно.

У п р а ж н е н и я

446. Пусть в контуре, изображенном на рис. 483, сопротивление отсутствует. Докажите, что при этом эдс самоиндукции в катушке в любой момент времени равна напряжению на конденсаторе и имеет противоположный ему знак.

447. В контуре, описанном в упражнении 446, емкость конденсатора равна 2 мкф , а максимальное напряжение на нем 5 в . Найдите: а) максимальную энергию магнитного поля в катушке; б) энергию магнитного поля в тот момент, когда напряжение на конденсаторе равно 3 в .

448. Чем отличаются процессы в колебательном контуре, имеющем большое сопротивление, от процессов в контуре без сопротивления? Остаются ли в силе утверждения: а) максимальная энергия магнитного поля в катушке равна максимальной энергии электрического поля в конденсаторе; б) когда ток в катушке имеет максимальное значение, напряжение на конденсаторе равно нулю; в) когда ток в катушке равен нулю, напряжение на конденсаторе равно эдс самоиндукции?

§ 359. Период электромагнитных колебаний. В различных контурах период колебаний получается разный. Это зависит от емкости конденсатора и от индуктивности катушки. Чем больше емкость конденсатора, тем больше понадобится времени, чтобы его зарядить и разрядить. Чем больше индуктивность катушки, тем медленнее

нарастает и убывает ток в ней. Значит, *период электромагнитных колебаний тем больше, чем больше емкость и индуктивность контура.*

Период электромагнитных колебаний T выражается формулой Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Если L — индуктивность контура в $гн$, а C — емкость в $ф$, то период T выразится в $сек$. Например, если катушка имеет индуктивность $0,001 гн$, а емкость конденсатора равна $10 мкф = 10^{-5} ф$, то период колебаний равен

$$T = 2\pi\sqrt{10^{-3} \cdot 10^{-5}} \text{ сек} = 6,3 \cdot 10^{-4} \text{ сек}.$$

Из сказанного следует, что изменить период колебаний в контуре можно двумя способами: меняя индуктивность катушки или меняя емкость конденсатора. В радиотехнике используются оба эти способа.

У п р а ж н е н и я

449. Каков период колебаний в контуре с индуктивностью $9 \cdot 10^{-5} гн$ и емкостью $0,004 мкф$?

450. Какую емкость надо взять, чтобы она вместе с катушкой индуктивностью $3 гн$ составила колебательный контур на частоте $50 гц$?

§ 360. **Получение электромагнитных колебаний.** Проще всего возбудить электромагнитные колебания с помощью электрической искры. Несмотря на то, что искра при разряде конденсатора длится

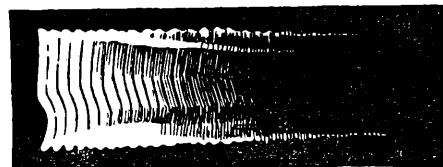


Рис. 484. Вид искры, рассматриваемой во вращающемся зеркале.

ничтожную долю секунды, она представляет собой целый ряд колебаний. Обкладки конденсатора несколько раз перезаряжаются, пока не израсходуется вся запасенная в нем энергия. Это можно обнаружить, если сфотографировать искру с помощью чрезвычайно быстро вращающегося зеркала. При этом видна не сплошная полоса (как было бы если бы разряд не имел вида колебаний), а ряд перемежающихся полос (рис. 484).

В этом случае колебательный контур состоит из емкости конденсатора и индуктивности провода, соединяющего его обкладки. Так как емкость и, в особенности, индуктивность в этом случае очень малы, то период колебаний получается очень малым.

Искра в течение долгого времени была единственным способом получения электромагнитных колебаний. Но такие колебания очень

быстро затухают, причем значительная доля энергии тратится на нагревание воздуха, т. е. превращается в его внутреннюю энергию.

В настоящее время для целей радиопередачи пользуются незатухающими колебаниями. Для поддержания колебаний необходимо к колебательному контуру все время подводить энергию.

Это производится почти всегда посредством электронных ламп. На рис. 485 изображена схема простейшего источника (генератора) незатухающих электромагнитных колебаний. Катушка L_2 и конденсатор C составляют контур, в котором поддерживаются незатухающие колебания. Батарея B является источником энергии для этого контура (она играет здесь роль, аналогичную роли пружины или гири в стенных часах). Триод и катушка L_1 играют роль, аналогичную роли зубчатого колеса и анкера в механизме часов. При колебаниях в контуре L_2C в катушке L_1 благодаря индукции создается переменная эдс, и сетка заряжается попеременно положительно и отрицательно. Когда сетка заряжена положительно, батарея B подзаряжает конденсатор C . Когда сетка заряжена отрицательно, конденсатор C разряжается по катушке L_2 .

Ясно, что катушка должна быть включена так, чтобы на сетке образовался положительный заряд в нужный момент, а именно тогда, когда левая пластина конденсатора заряжена положительно (в противном случае батарея не подзарядит, а, наоборот, разрядит конденсатор).

Вследствие периодической подзарядки конденсатора C колебания в контуре L_2C не затухают.

Очевидно, что период колебаний, генерируемых таким устройством, зависит от емкости C и индуктивности L_2 .

Рассмотренная схема может быть применена не только для генерации колебаний, но и для усиления уже существующих колебаний. Это очень часто делается в радиоприемниках.

§ 361. Излучение. Каковы причины затухания электромагнитных колебаний? Этих причин две: во-первых, часть энергии колебаний тратится на нагревание проводов; во-вторых, энергия расходуется на излучение. Электромагнитные колебания создают электромагнитные волны, которые в свою очередь вызывают колебания в таких же проводниках, до которых они доходят.

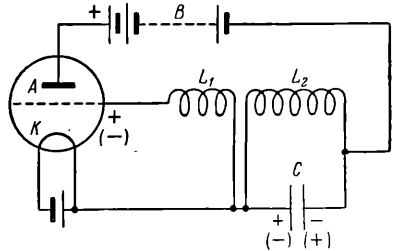


Рис. 485. Одна из схем генератора незатухающих колебаний.

Колебательный контур, имеющий форму, показанную на рис. 486, *а*, излучает очень слабо. Дело в том, что в таком контуре электрическое и магнитное поля пространственно разделены: электрическое поле сосредоточено в основном между пластинами конденсатора, а магнитное поле — внутри катушки. В таком случае при колебаниях происходит превращение энергии электрического поля

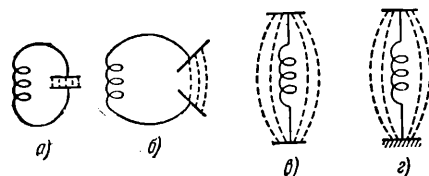


Рис. 486. Постепенный переход от слабо излучающего контура к контуру типа антенны.

в энергию магнитного поля и наоборот, но нет передачи энергии в окружающее пространство. Как мы узнаем далее (§ 362), только совмещение в пространстве одновременно меняющихся электрического и магнитных полей (электромагнитное поле) ведет к излучению.

Опыт показывает, что для получения электромагнитного поля и усиления излучения надо увеличить пространство между пластинами конденсатора. Рис. 486, *а* — *г* показывает, как, постепенно раздвигая пластины конденсатора, мы все увеличиваем пространство, охваченное электрическими силовыми линиями. Заменяя верхнюю пластину проволоками, протянутыми над землей, а нижнюю — землей (рис. 486, *г*), мы приходим к форме колебательного

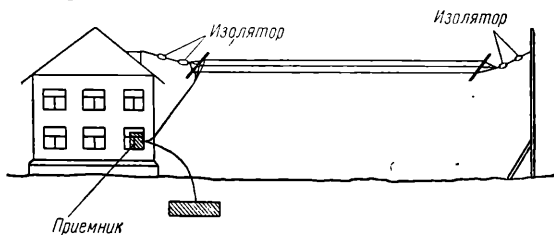


Рис. 487. Антенна.

контура, называемого в радиотехнике *антенной* (рис. 487). Антенна излучает и поглощает волны очень сильно.

Отметим, что кусок прямого провода тоже можно рассматривать как колебательный контур, только с очень малым периодом. В нем и емкость и индуктивность очень малы.

§ 362. Электромагнитные волны. Рассмотрим, как образуются электромагнитные волны вокруг контура типа антенны. Пусть в некоторый момент электрическое поле вокруг него направлено сверху вниз (рис. 488, *а*). Через четверть периода это поле исчезнет (рис. 488, *б*). Но изменение электрического поля равносильно

перемещению электрических зарядов, т. е. электрическому току. Поэтому при изменении электрического поля, так же как и при движении зарядов, в окружающем пространстве образуется переменное магнитное поле*). В свою очередь изменение магнитного поля

вызывает, как мы знаем, электромагнитную индукцию, т. е. появление электрического поля. Итак, колебания электрического поля связаны с колебаниями магнитного поля. А колебания магнитного поля вызывают в окружающем пространстве колебания электрического поля. Поэтому электромагнитные колебания передаются в пространстве от одного места к соседнему. Связанные друг с другом переменные магнитное и электрическое поля образуют электромагнитное поле, которое перемещается в направлении, перпендикулярном и к электрическому, и к магнитному полям, с громадной скоростью в виде волн (электромагнитные волны).

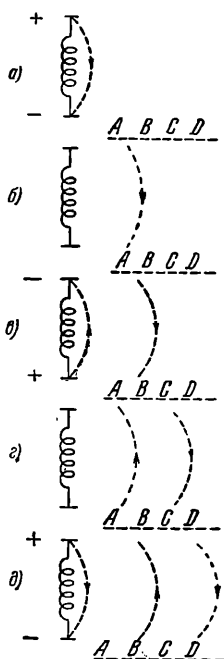


Рис. 488. Образование электромагнитных волн. Пунктирные стрелки показывают направление электрического поля.

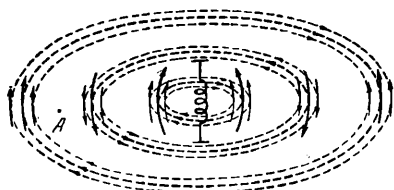


Рис. 489. Распространение электромагнитных волн.

Сплошные стрелки показывают направления электрического поля. Пунктирные линии показывают направления магнитного поля.

На рис. 488 ради упрощения показано только электрическое поле (направление распространения электромагнитных волн — слева направо). В то время как электрическое поле вблизи контура исчезло, в точке *A* поле направлено сверху вниз (рис. 488, б), а в точке *B* только начинает появляться. Затем вблизи контура появилось электрическое поле, направленное снизу вверх. В это время в точке *A* оно исчезло, в точке *B* оно направлено сверху вниз, а в точке *C* только начинает появляться (рис. 488, в) и т. д.

*) Математические уравнения, описывающие образование магнитного поля переменным электрическим полем, впервые вывел выдающийся английский физик К. Максвелл.

На рис. 489 показано направление электрических и магнитных полей распространяющихся электромагнитных волн. Видно, что максимумы магнитного (пунктирные линии) и электрического (стрелки) полей совпадают. Почему это так? Посредине между максимумами (например, в точке *A*) напряженности электрического и магнитных полей, меняясь от наибольшего положительного до наибольшего отрицательного значений (или обратно), проходят через значение, равное нулю. В этот момент они меняются особенно быстро. Значит, точка *A* на рис. 489 соответствует наиболее быстрым изменениям электрического и магнитного полей. Изменение электрического поля достигается, как мы знаем, перенесением зарядов. Поэтому изменение электрического поля равносильно перенесению зарядов, т. е. электрическому току. А электрический ток окружен магнитным полем. Значит, точка *A*, соответствующая максимуму

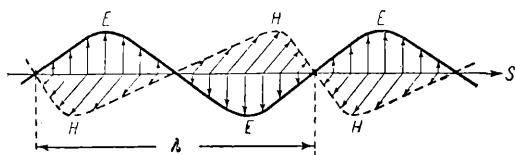


Рис. 490. Структура электромагнитной волны.

E — векторы напряженности электрического поля; *H* — векторы напряженности магнитного поля, направленные перпендикулярно к векторам *E*; *S* — направление движения волны; λ — длина электромагнитной волны.

тока, должна быть окружена магнитным полем. Этим объясняется, почему максимумы магнитного поля совпадают с максимумами электрического поля.

Итак, бегущие электромагнитные волны суть перемещающиеся в пространстве взаимно-перпендикулярные электрические и магнитные поля. Напряженности электрического и магнитного полей в какой-нибудь точке пространства, где бегут электромагнитные волны, одновременно растут, одновременно достигают максимума и одновременно убывают. Эти изменения взаимосвязаны: изменения электрического поля связаны с наличием в окружающем пространстве магнитного поля, а изменения магнитного поля связаны с наличием в окружающем пространстве электрического поля.

Точно так же как и для механических волн, для электромагнитных волн можно ввести понятие длины (рис. 490).

Наложение двух бегущих навстречу электромагнитных волн одинаковой длины ведет к образованию стоячей волны, в которой максимумы напряженностей магнитного и электрического полей образуются в разных местах и чередуются во времени, причем энергия электрического поля превращается в энергию магнитного поля и обратно; по сути дела, стоячие электромагнитные волны являются электромагнитными колебаниями. И наоборот, колебания

в контурах можно рассматривать как стоячие волны. Вспомним, что подобное же различие между бегущими и стоячими волнами мы установили в случае волн на веревке (§ 127).

Электромагнитное поле является одним из видов материи, а электромагнитные волны — одним из видов движения; о них мы говорили в начале книги. Вместе с электромагнитным полем перемещаются присущие ему, так же как и любому другому виду материи, энергия и масса (об этом мы будем говорить более подробно позже).

Мы узнаем далее, что во всей Вселенной никогда и нигде не прекращается распространение во всевозможных направлениях электромагнитных волн самых различных длин.

Электромагнитные волны впервые получил и исследовал немецкий физик Герц (в 1888 г.). Как показал опыт, электромагнитные волны в вакууме движутся со скоростью около $300\,000 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$. Как мы увидим далее, такова же скорость света.

У п р а ж н е н и я

451. Какова длина волн, соответствующих частотам: а) 10^6 гц? б) 50 гц?

452. Какова длина волны, соответствующая колебаниям контура в упражнении 449?

§ 363. Электрический резонанс. В случае электромагнитных колебаний, как и для всех других видов колебаний, наблюдается явление резонанса. Если до колебательного контура доходят электромагнитные волны, период которых совпадает с периодом собственных колебаний контура, то вынужденные колебания в контуре достигают наибольшей силы (электрический резонанс).

Это легко наблюдать, если в одном из колебательных контуров поддерживать колебания (например, посредством разряда искры), а во втором — менять емкость конденсатора (рис. 491). При некоторой определенной емкости во втором контуре возбуждаются сильные колебания, что можно обнаружить, например, по зажиганию неоновой лампы (§ 346), включенной параллельно конденсатору.

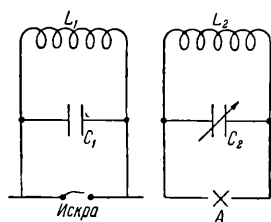


Рис. 491. Схема опыта по электрическому резонансу.

В контуре, состоящем из емкости C_1 и катушки L_1 , посредством искры возбуждаются электрические колебания. При изменении емкости конденсатора C_1 неоновая лампочка A_1 , включенная параллельно контуру L_2C_2 , вспыхивает, а затем снова гаснет.

У п р а ж н е н и е

453. Какую индуктивность должна иметь катушка, чтобы вместе с емкостью $0,005 \text{ мкф}$ составить контур, резонирующий на электромагнитные волны длиной 500 м?

§ 364. Радиопередача. Родиной радиотехники является Россия. Каждый год в День радио наша страна отмечает знаменательную дату — 7 мая 1895 г. В этот день великий русский изобретатель А. С. Попов сообщил научной общественности Петербурга о своих первых успехах по передаче сигналов электромагнитными волнами.

Вскоре после этого А. С. Попов впервые в мире осуществил радиосвязь на значительные расстояния. Сконструированные им приборы явились первыми радиопередатчиком и радиоприемником. А. С. Попов также изобрел антенну (§ 361).

За протекание с тех пор несколько десятилетий радиотехника достигла изумительных успехов: дальность радиосвязи увеличилась настолько, что стала возможна связь с космическими ракетами (сотни тысяч километров); стала возможной передача человеческой речи и музыки.

Общая схема радиопередачи такова. В антенне передающей станции ламповый генератор возбуждает сильные электромагнитные колебания (рис. 492, б). Устройство генератора таково, что амплитуда этих колебаний зависит от тока, проходящего по микрофону, перед

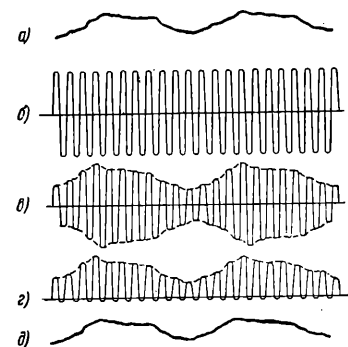


Рис. 492. а) График колебаний мембраны микрофона; б) незатухающие колебания, излучаемые передающей станцией при отсутствии звука; в) модулированные колебания (на станции и в приемнике); г) детектированные колебания; д) колебания мембраны телефона, одинаковые с колебаниями а).

которым говорит диктор станции или исполняется музыкальное произведение (рис. 492, а). Периодическое — в такт звуковым колебаниям — изменение амплитуды колебаний называется м о д у л я ц и е й колебаний (рис. 492, в). Антенна излучает в пространство модулированные электромагнитные волны.

Электромагнитные волны улавливаются посредством приемных антенн. Но колебания в антеннах, возбуждаемые приходящими волнами, при значительных расстояниях от передающей станции крайне слабы. Поэтому в радиоприемниках эти колебания надо подвергнуть значительному усилению.

Частота электромагнитных колебаний, употребляемых в радио, очень высока (миллионы герц). Чтобы они могли вызвать колебания мембраны телефона и действовать на наш слух, нужно вместо модулированных колебаний высокой частоты получить колебания низкой частоты, соответствующие колебаниям микрофона на передающей станции. Это называется д е т е к т и р о в а н и е м колебаний. Детектирование колебаний состоит в таком их изменении, что амплитуда колебаний в одну сторону делается значительно меньше амплитуды колебаний в другую сторону (рис. 492, г). Когда такие колебания проходят по обмотке телефона, они вызывают в мембране, притягиваемой сердечником с переменной силой, механические колебания, происходящие в такт

с изменениями тока. В результате мембрана телефона воспроизводит те звуковые колебания, которые вызвали колебания мембраны микрофона (рис. 492, д).

§ 365. Радиоприемник. В чем состоит назначение радиоприемника? Во-первых, приемник должен выделить из многих колебаний, возбуждаемых в его антенне волнами от разных передающих станций, те колебания, которые приносятся волнами станции, интересующей слушателя. Это достигается настройкой в резонанс колебательного контура приемника (средством изменения емкости или индуктивности контура) с колебательным контуром передающей станции.

Во-вторых, пришедшие колебания нуждаются в усилении. Это требует применения в приемниках электронных или полупроводниковых усилителей.

В-третьих, необходимо произвести детектирование колебаний. Это может быть сделано посредством кристаллического детектора или электронной лампы.

В кристаллическом детекторе используется односторонняя проводимость некоторых полупроводников (например,

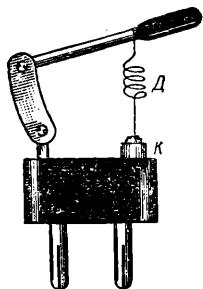


Рис. 493. Кристаллический детектор.

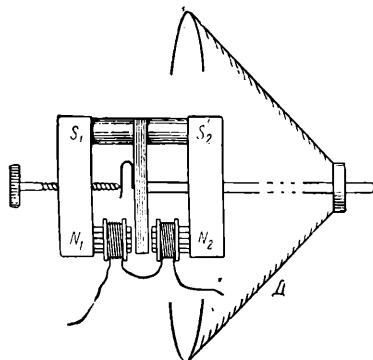


Рис. 494. Устройство одного из типов репродуктора.

«свинцового блеска»). Точечный контакт такого кристалла с острием проволоки (например, стальной) или с другим кристаллом имеет различное сопротивление в зависимости от того, каково направление тока. Поэтому, если приложенное к детектору напряжение меняется так, как на рис. 492, в, то график тока будет выглядеть, как на рис. 492, г, т. е. достигается детектирование.

Один из типов кристаллических детекторов показан на рис. 493. При пользовании им нужно время от времени переставлять стальную проволочку *Д* на другое место кристалла *К*. Существуют также типы детекторов с постоянным местом контакта.

Кроме того, детектирование может быть произведено посредством электронных ламп. Для этого используется следующее их свойство. Если сетка трехэлектродной лампы заряжена отрицательно по отношению к нити накала и если заряд на ней немного колеблется, то это вызывает неодинаковые изменения анодного тока. При увеличении отрицательного заряда сетки анодный ток меняется мало, а при уменьшении — сильно. Вследствие этого колебания тока в лампе приобретают такой же характер, как на рис. 492, г, т. е. детектируются.

В приемниках детектированные колебания обычно подвергаются усилению (усиление низкой частоты).

Наконец, полученные колебания звуковой частоты надо передать слушателю. В приемниках с кристаллическим детектором (детекторных) это делается

посредством телефонов, прикладываемых к уху. В ламповых приемниках для этого употребляются репродукторы. Устройство репродуктора (рис. 494) сходно с устройством телефона. Железная пластинка (якорь) помещена между двумя постоянными магнитами N_1S_1 и N_2S_2 . К полюсам магнитов присоединены два железных стержня с обмоткой. При отсутствии тока в обмотке пластинка

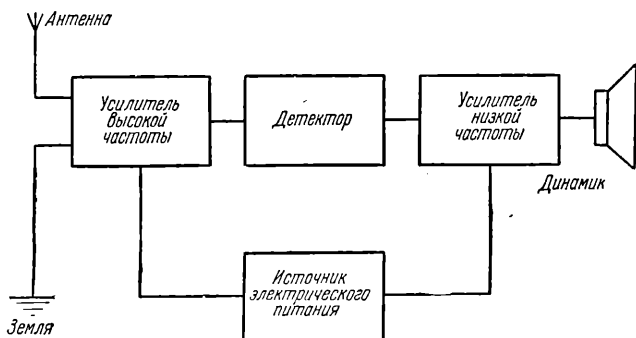


Рис. 495. Блок-схема радиоприемника.

остается в покое, так как ее одинаково притягивают оба полюса. Если же по обмотке идет ток, то притяжение одним из полюсов усиливается, а другим — ослабляется. При переменном токе пластинка колеблется в такт с изменениями тока. Колебания пластинки передаются при помощи стерженька бумажному конусу — д и ф у з о р у *Д*, играющему роль излучателя звука. Блок-схема (рис. 495) является иллюстрацией ко всему описанию этого параграфа.

§ 366. Применения радио. Кроме передачи речи и музыки, радио применяется в самых разнообразных областях техники. Упомянем о некоторых из них.

В навигации (кораблевождение) и в авионавигации (самолето-вождение) радио применяется для п е л е н г о в а н и я (определения местонахождения).

Для этого используется возможность определения направления, по которому распространяется принятый сигнал, посредством поворота рамочной антенны (рис. 496). Если магнитные силовые линии распространяющихся волн перпендикулярны к плоскости витков рамки, то прием сигнала наиболее силен. Если же магнитные силовые линии не пронизывают витков антенны, то прием отсутствует.

За последние годы громадное значение приобрела радиолокация — определение посредством посылки и приема радиоволн местонахождения самолетов, кораблей и других тел, отражающих доходящие до них радиоволны.

Радиолокация стала возможной благодаря созданию передатчиков радиоволн с очень короткой длиной (порядка нескольких сантиметров). Такие короткие волны с помощью антенн особой формы

удается посылать в определенном направлении (получать радиолучи). Для целей радиолокации необходимо посылать сигналы чрезвычайно малой продолжительности (импульсы). Радиосигналы отражаются, например, от самолетов, возвращаются обратно в установку и могут быть восприняты чувствительным приемником*). Особое устройство позволяет определить промежуток времени, прошедший между моментом отправления и моментом возвращения сигнала. Это дает возможность определить расстояние от самолета до установки, так как скорость распространения электромагнитных волн в воздухе известна. Так как, кроме того, легко определить и направление радиолуча, то местонахождение самолета становится известным.

Кроме обнаружения самолетов, радиолокация применяется и в навигации. При помощи радиолокации также исследуются сильно ионизованные слои атмосферы, отражающие радиоволны.

Упомянем еще о новой науке — радиоастрономии. Оказалось, что из глубин Вселенной к Земле непрерывно приходят радиоволны, свидетельствующие о происходящих в космосе электромагнитных процессах. Изучая радиоволны, приходящие из космического пространства (их направление, длины волн, энергию), можно получать интересные сведения о строении Вселенной, и притом на больших расстояниях от Земли, чем это возможно при помощи оптических телескопов.

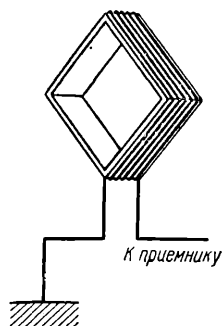


Рис. 496. Рамочная антенна.

*) Отметим, что впервые отражение радиоволн от кораблей было обнаружено А. С. Поповым.

РАЗДЕЛ IV

ОПТИКА

ГЛАВА XXX

ИСТОЧНИКИ СВЕТА. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА

§ 367. **Природа света.** Оптикой называется раздел физики, изучающий световые явления.

Ньютон высказал воззрение на свет как на поток мельчайших частиц, которые вылетают из источника света, отражаются от тел и, попадая в глаз, вызывают зрительные ощущения. Однако Гюйгенс и некоторые другие физики, среди которых был и М. В. Ломоносов, считали, что такое представление о свете неправильно и что свет подобно звуку имеет волновую природу.

Световые явления, действительно, во многом схожи со звуковыми, волновая природа которых очевидна. Так же как и звук, свет отражается от тел, причем по закону, справедливому для любых волн: угол отражения равен углу падения. Далее, отметим, что различные звуки разнятся по высоте, а различные световые волны — по цвету. В начале XIX в. стало ясно, что правы приверженцы волновой природы света. Позже английский физик Максвелл сделал новый шаг вперед, показав, что *световые волны являются электромагнитными волнами*. В этом убеждает нас, прежде всего, равенство скоростей электромагнитных и световых волн — $300\,000 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$.

Позже мы рассмотрим явление испускания электронов металлами при освещении их (фотоэффект). Так как на электроны могут действовать только электрические и магнитные поля, то ясно, что в световых волнах существует электромагнитное поле. В пользу электромагнитной природы света говорит и тот факт, что свет испускается веществом при процессах, происходящих внутри атомов и молекул, а эти процессы связаны, как мы знаем, с движением внутри атомов заряженных частиц, т. е. с изменениями электрических и магнитных полей внутри атомов. Этот вопрос мы рассмотрим более подробно в разделе V.

§ 368. **Источники света.** В каких случаях мы видим окружающие нас предметы? Пламя, накаленный волосок электролампочки, на-

гретый докрасна кусок металла видны независимо от того, светло кругом или темно. Но гораздо чаще мы видим предметы только при освещении их Солнцем или другими источниками света.

Тела, которые можно видеть независимо от освещения и которые сами создают освещение окружающих тел, называются и с т о ч - н и к а м и с в е т а.

1. Наиболее распространенными источниками света являются накалинные тела: звезды, наружные оболочки которых имеют температуры в несколько тысяч градусов (в частности, Солнце), горячие газы в пламенах, волоски электрических ламп и т. п.

2. В § 341 мы указали, что газы, по которым идет электрический ток, иногда светятся и при низкой температуре (полярные сияния, газосветные лампы).

3. Свечение иногда сопровождается химические реакции. Оно обычно очень слабо и обнаруживается лишь чувствительными приборами. Но в некоторых случаях оно заметно на глаз (свечение при окислении желтого фосфора). Свечение некоторых насекомых, растений, рыб тоже происходит при окислении особого органического вещества.

4. Иногда свечение наблюдается при раздавливании или разрывании тел, например свечение сахара при раскалывании, заметное в темноте.

5. Особый случай представляет свечение, вызываемое поглощением света другого цвета или невидимых лучей (см. далее).

Во всех этих случаях испускание света сопровождается уменьшением энергии излучающих тел: накалившееся тело охлаждается, в пламени происходит уменьшение химической энергии сгорающих веществ и т. д.

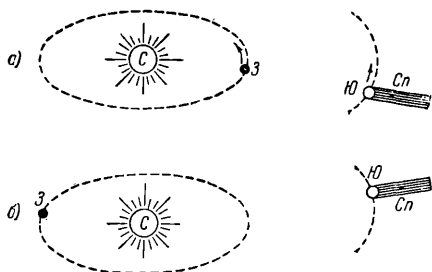
§ 369. Лучи света. Распространение света есть перемещение энергии от источника света. Геометрические линии, направления которых в любой точке пространства совпадают с направлениями перемещения энергии, называются л у ч а м и с в е т а.

Наблюдения показывают, что *в прозрачных однородных веществах лучи света являются прямыми линиями.* Это, например, видно по освещению пылинок в воздухе комнаты лучами Солнца, проникающими сквозь окно. О том же говорит образование теней за непрозрачными для света телами.

Впоследствии мы увидим, что лучи света не всегда прямолинейны.

§ 370. Скорость света. Впервые скорость света была измерена в XVII в. датским астрономом Рёмером. Рёмер составил таблицы затмений спутников Юпитера, т. е. таблицы моментов времени, когда спутники Юпитера попадали в тень, образованную Юпитером в лучах Солнца. Рёмер сделал это для моментов, когда Земля находилась по ту же сторону от Солнца, что и Юпитер (рис. 497, а).

Через полгода оказалось, что затмения запаздывают против составленной таблицы приблизительно на 16 минут. Рёмер объяснил это тем, что за это время Земля, двигаясь вокруг Солнца, отдалась от Юпитера еще приблизительно на 300 млн. км и что свет проходит это расстояние за 16 минут. Отсюда Рёмер вычислил скорость света. Впоследствии скорость света определялась разными учеными и разными методами. Опишем идею определения скорости света в воздухе американским ученым Майкельсоном (1929 г.).



Опыт Майкельсона проводился в земных условиях между двумя горами — Антонио и Вильсон в Калифорнии. На вершине горы Вильсон был установлен сильный источник света S (рис. 498). Свет от источника падал на восьмигранную призму A и после отражения от ее грани шел к горе Антонио, на вершине которой было расположено вогнутое зеркало. Отразившись от вогнутого зеркала, пучок света попадал на плоское зеркало m , расположенное в фокусе вогнутого, и после отражения снова падал на вогнутое зеркало, а от него возвращался к горе Вильсон. Здесь он попадал на грань призмы A и от нее в глаз наблюдателя.

Рис. 497. К определению скорости света Рёмером.

C — Солнце; $З$ — Земля; $Ю$ — Юпитер; $Сп$ — спутник Юпитера.

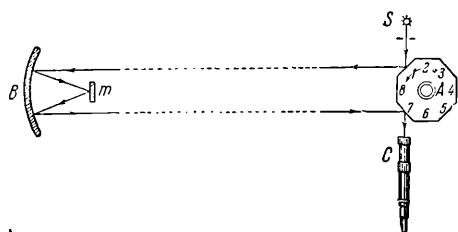


Рис. 498. Схема опыта Майкельсона по определению скорости света.

Здесь он попадал на грань призмы A и от нее в глаз наблюдателя. Расстояние между призмой и вогнутым зеркалом было точно измерено: путь света туда и обратно составлял 70,853 км.

Призма приводилась в быстрое вращение. Ясно, что свет мог попадать в глаз наблюдателя только при положении восьмигранной призмы, аналогичном показанному на рисунке. Это положение повторялось при повороте призмы на $1/8$ оборота, когда грань 2 займет положение грани 1. К этому моменту свет должен успеть пройти расстояние между горами и обратно. Регулируя скорость вращения призмы, при некоторой ее величине (равной в опыте 535 об/сек) экспериментатор добивался появления света в наблюдательной трубе C .

Зная число оборотов призмы в секунду, можно найти продолжительность $\frac{1}{8}$ оборота, а отсюда определить скорость света.

Из опыта Майкельсона, неоднократно повторенного, скорость света (пересчитанная для вакуума) оказалась равной 299796 км/сек, или почти $300\,000\text{ км/сек} = 3 \cdot 10^{10}\text{ см/сек} = 3 \cdot 10^8\text{ м/сек}$.

Когда свет идет в вакууме (например, от отдаленных небесных тел до границ земной атмосферы), скорость света не зависит ни от яркости источника, ни от его цвета, ни от его движения.

В прозрачных жидких и твердых телах скорость света меньше, чем в вакууме. В воздухе она почти равна скорости света в вакууме.

Так как скорость света чрезвычайно велика, то в земных условиях вполне возможно пренебрегать отрезком времени, в течение которого свет распространяется от источника до наблюдателя. Но для небесных светил этот промежуток может быть значителен. Глядя на некоторые звезды, мы видим свет, излученный ими много тысяч лет тому назад.

У п р а ж н е н и е

454. Сколько времени идет свет от Луны до Земли (расстояние 384 000 км)?

§ 371. Световой поток. Сила света. Электромагнитные волны несут по всем направлениям от источника света потоки энергии. Однако для освещения представляет интерес только часть потока энергии, а именно те электромагнитные волны, которые, попадая в глаз человека, вызывают зрительное ощущение. Эта часть называется световым потоком. Итак, световой поток есть мощность потока электромагнитных волн, оцениваемая по зрительному ощущению.

Единица светового потока называется люмен (лм). Как устанавливается эта единица, мы скажем немного далее. Пока укажем, что обычная свеча дает световой поток 10—15 люменов. Электрические лампы дают световые потоки в сотни и тысячи люменов. Световой поток Солнца выражается громадным числом: 10^{28} люменов.

Световые потоки почти никогда не излучаются источниками света по всем направлениям в равной мере. Например, пламя свечи дает больше света в горизонтальном направлении, чем в вертикальном. Электрическая лампа, подвешенная к потоку, дает больше света вниз, меньше — по сторонам и совсем мало — вверх (рис. 499, а). Если ее снабдить отражателем (абажуром с белой поверхностью, обращенной к лампе, рис. 499, б), то отражатель резко увеличит световой поток вниз и уменьшит поток по остальным направлениям.

Чтобы охарактеризовать источник в отношении количества света, излучаемого им по определенному направлению, вводится понятие

силы света. Выделим мысленно в световом потоке часть, идущую внутри узкого конуса (рис. 500)*). Так как конус узок, то мы можем считать, что направление светового потока внутри конуса определяется его осью SA . Силой света по направлению оси конуса называется отношение светового потока, идущего внутри конуса, к величине телесного угла при его вершине. За единицу силы света в системе СИ принята свеча ($св$). К вопросу об ее установлении мы скоро возвратимся; пока укажем, что сила света обычной свечи в горизонтальном направлении приблизительно равна 1 $св$.

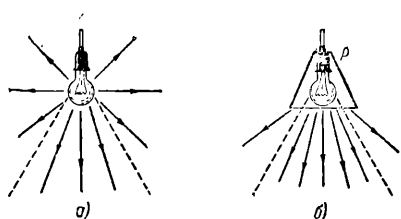


Рис. 499. а) Лампа без отражателя; световой поток внутри телесного угла, показанного пунктиром, мал; б) та же лампа с отражателем P ; световой поток в том же телесном угле велик.

Обозначив силу света I , световой поток F , а телесный угол при вершине конуса Ω («омега»), можем написать:

$$I = \frac{F}{\Omega}.$$

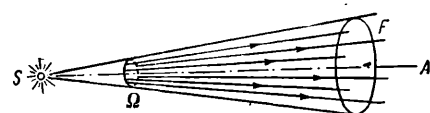


Рис. 500. К определению понятия силы света.

Например, если внутри конуса с телесным углом $0,1$ стерадиана идет световой поток 4 люмена, то сила света равна

$$I = \frac{4}{0,1} \text{ св} = 40 \text{ св}.$$

*) Часть пространства, ограниченная конической поверхностью, называется телесным углом. Мерой телесного угла считается стерадиан. Стерадианом называется центральный телесный угол, вырезающий из шаровой поверхности

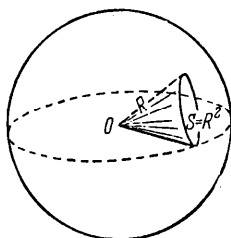


Рис. 501. Стерадиан.

площадь, равную квадрату радиуса (рис. 501). Поскольку полная поверхность шара равна $4\pi R^2$, то в пространстве, заключенном внутри шаровой поверхности радиуса R содержится 4π стерадиан.

Возвратимся к вопросу об установлении световых единиц. Так как единицы светового потока (люмен) и силы света (свеча) связаны между собой, то достаточно установить эталон только для одной из них. Практически оказалось более удобным создать эталон для свечи. Он осуществляется в виде сложного устройства, в котором свет излучается поверхностью, имеющей температуру, равную температуре платины в тот момент, когда она из расплавленного состояния переходит в твердое. Установив по эталону единицу силы света — свечу, — мы одновременно устанавливаем единицу светового потока — люмен. Из сказанного ранее следует, что люмен есть световой поток в конусе с телесным углом при вершине в 1стерадиан, если сила света в нем равна одной свече.

У п р а ж н е н и я

455. Световой поток 300 лм идет внутри конуса с телесным углом 4стерадиана. Какова сила света?

456. Сила света лампы в среднем равна 25 св. Каков полный световой поток лампы? (Из геометрии известно, что полный телесный угол вокруг точки равен 4л.)

§ 372. Освещенность. Один и тот же источник света, например лампа, может освещать и сильно, и слабо. От чего это зависит?

Во-первых, от расстояния от источника света до освещаемой поверхности. Вблизи лампы световой поток распределяется по малой площади и на единицу площади падает много света. Вдали от лампы тот же световой поток приходится на большую площадь и на единицу площади падает мало света. Кроме расстояния от источника света, имеет значение угол между направлением лучей и перпендикуляром к освещаемой поверхности (этот угол называется углом падения). При перпендикулярном падении лучей (угол падения равен нулю) световой поток распределяется на меньшую площадь, чем при наклонном падении лучей.

Отношение светового потока к площади, на которую он падает, называется о с в е щ е н н о с т ь ю. За единицу освещенности принимается люкс (лк). Люкс есть освещенность, создаваемая световым потоком в 1 лм на площади 1 м². Выведем формулу для расчета освещенности при заданных силе света, расстоянии освещаемой поверхности от источника света малых размеров и угле падения лучей. Сперва рассмотрим случай перпендикулярного падения лучей (угол падения $\alpha = 0$). Пусть освещаемая поверхность является частью сферы радиуса R , в центре которой находится источник света S (рис. 502). Обозначим освещаемую площадь через σ_0 , а телесный угол, который соответствует этой площади при точке S , через Ω . В курсах математики доказывается, что

$$\sigma_0 = \Omega R^2.$$

Согласно определению освещенность равна световому потоку F , деленному на освещаемую площадь. Обозначая освещенность при перпендикулярном падении лучей E_0 , имеем:

$$E_0 = \frac{F}{\sigma_0} = \frac{F}{\Omega R^2} = \frac{I}{R^2}.$$

Эта формула относится к случаю $\alpha = 0$. Если световой поток падает на поверхность косо ($\alpha \neq 0$), то освещенность при тех же условиях будет меньшей. Рассмотрим световой поток, идущий внутри цилиндра (рис. 503). Если этот поток рас-

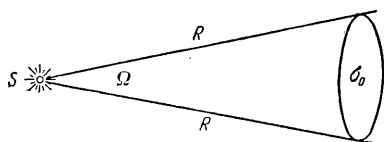


Рис. 502. К выводу формулы освещенности.

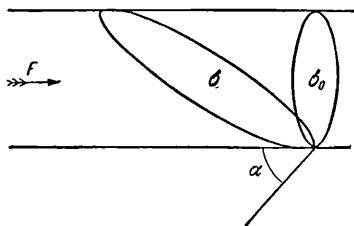


Рис. 503. К зависимости освещенности от угла падения лучей α на площадь σ .

пределяется на площади σ_0 , перпендикулярной к направлению лучей, то освещенность равна

$$E_0 = \frac{F}{\sigma_0}.$$

При наклонном падении лучей освещенность равна

$$E = \frac{F}{\sigma}.$$

В курсах математики доказывается, что

$$\sigma_0 = \sigma \cos \alpha.$$

Отсюда

$$E = E_0 \cos \alpha.$$

Принимая во внимание формулу $E_0 = \frac{I}{R^2}$, имеем

$$E = \frac{I \cos \alpha}{R^2}.$$

Как видно, освещенность поверхности пропорциональна силе света, косинусу угла падения лучей и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника света. Напомним, что эта формула выведена в предположении, что источник света имеет малые размеры по сравнению с расстоянием до освещаемой поверхности. Кроме того, предполагается, что вблизи источника нет поверхностей, отражающих свет, и что среда, в которой идет свет, совершенно прозрачна.

У п р а ж н е н и я

457. Какую освещенность создает лампа в 50 св на расстоянии 2 м? 0,5 м? (Угол падения лучей равен нулю.)

458. Какая требуется сила света, чтобы на расстоянии 1,5 м создать освещенность в 20 лк? (Угол падения лучей равен 60°.)

459. Над серединой круглого стола на высоте 1 м висит лампа 75 св; диаметр стола 1,5 м. Определите освещенность книги на краю стола.

460. На рабочую площадь 400 м² 10 светильников направляют световые потоки по 1200 лм каждый. Какова средняя освещенность рабочей площади?

§ 373. Сравнение сил света двух источников *). Как определить, во сколько раз сила света одного источника разнится от силы света другого? Пусть источники, силы света которых равны I_1 и I_2 , создают одинаковую освещенность некоторой поверхности. Если расстояния источников до этой поверхности равны R_1 и R_2 , то освещенности поверхности первым и вторым источниками равны

$$E_1 = \frac{I_1}{R_1^2}; \quad E_2 = \frac{I_2}{R_2^2}.$$

Так как $E_1 = E_2$, то

$$\frac{I_1}{R_1^2} = \frac{I_2}{R_2^2},$$

откуда

$$I_1 = I_2 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2.$$

Это соотношение позволяет, зная силу света первого источника и измерив расстояния источников света от освещаемой поверхности, определить силу света другого.

Определить без приборов, дают ли два источника света одинаковую освещенность какой-нибудь поверхности, трудно. Для сравнения сил света источников служат особые приборы, называемые фотометрами. Один из типов фотометров изображен на рис. 504. В светонепроницаемой коробке C находится окрашенный белой краской клин K . Сквозь окна A и B в коробке грани клина освещаются двумя источниками света S_1 и S_2 . Через окно D наблюдатель может одновременно видеть обе грани клина K . Меняя расстояния источников света от фотометра, можно добиться, чтобы граница между гранями клина не была видна. В таком случае освещенности граней одинаковы.

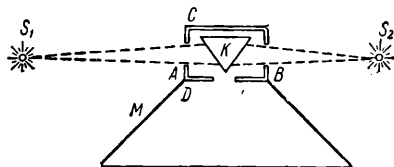


Рис. 504. Схема устройства простого фотометра.

M — ширма, защищающая глаза наблюдателя от непосредственного попадания света от источников.

У п р а ж н е н и е

461. Какова сила света лампы, если расстояние фотометра от нее 65 см, а от лампы в 25 св — 84 см и освещенности обеих граней клина фотометра равны?

§ 374. Некоторые сведения о гигиене освещения. Нашим глазам приходится приспособляться к весьма различным освещением. Освещенность на открытом месте в яркий солнечный день измеряется десятками тысяч люксов, в комнате днем — несколькими люксами, при свете луны — сотыми долями люкса.

*) Описанный опыт составляет содержание программной лабораторной работы.

Глаз приспособляется к изменению освещенности, во-первых, изменением размеров зрачка (рис. 505, во-вторых (и это главное), в глазу имеются два рода нервных окончаний, воспринимающих свет — колбочки и палочки: первые служат для зрения при ярком освещении, вторые — для зрения при тусклом. Приспособление глаза к перемене освещения (адаптация) требует некоторого времени, и быстрые изменения освещения вредны.



Рис. 505. а) Вид зрачка при ярком освещении; б) при слабом освещении.

Поэтому освещение должно быть равномерным, без миганий; не должно быть резких теней («мягкое» освещение). Освещенность места работы не должна быть меньше 20 люксов и больше 200 люксов. Большая яркость искусственного освещения вредна, так как глаз слишком нагревается. При солнечном свете возможна значительно большая яркость (до 10 000 люксов). Чтобы свет от ярких источников света не попадал прямо в глаза, нужно или помещать источники достаточно высоко, или рассеивать свет матовым абажуром.

За единицу яркости принимается яркость поверхности, квадратный метр которой дает силу света в 1 свечу. Такая единица называется нит (*nit*).

За единицу яркости принимается яркость поверхности, квадратный метр которой дает силу света в 1 свечу. Такая единица называется нит (*nit*).

§ 375. Люксметр. Для быстрого определения освещенности применяется прибор, называемый люксметром. На рис. 506 изображен простейший школьный люксметр. Он состоит из небольшого ящика, в одном конце которого помещена электрическая лампочка, горящая при определенном напряжении. Сверху

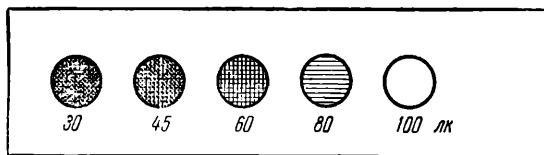
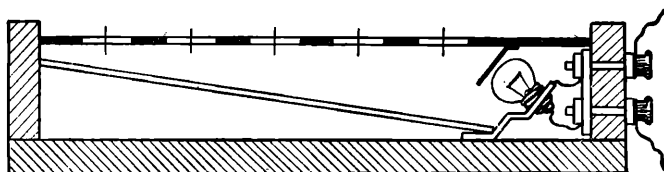


Рис. 506. Простейший школьный люксметр.

ящик закрыт белым картоном с пробитыми в нем отверстиями, заклеенными папиросной бумагой. Свет от лампочки отражается полоской белого картона, помещенного наклонно внутри люксметра.

Люксметр устанавливается на поверхности, освещенность которой желают измерить. Заклеенные папиросной бумагой отверстия освещаются с двух сторон: равномерно сверху внешним источником света и изнутри с постепенным ослаблением освещенности при удалении от лампочки. Отверстия, освещенные сильнее сверху, кажутся темнее, а освещенные сильнее снизу (ближе к лампочке) кажутся светлее фона картона. Отверстия, для которых освещенности сверху и изнутри равны, сольются с фоном картона. Предварительно люксметр гра-

дуируется при помощи, например, лампочки в 100 *вт* (в качестве внешнего источника света), дающей освещенность около 100 *лк* на расстоянии 1 м. Другие значения освещенности рассчитываются по закону освещения для разных расстояний от лампочки до люксметра. Эти значения и проставляются против соответствующих отверстий.

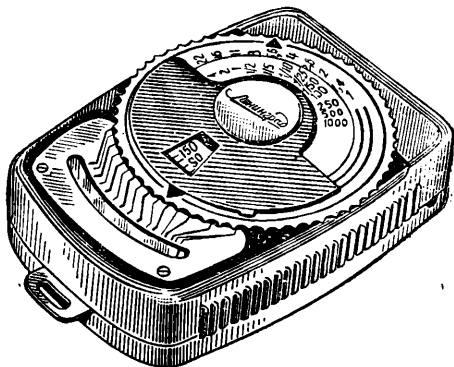


Рис. 507. Фотоэкспонометр «Ленинград».

Более объективными, не зависящими от индивидуальных особенностей светового восприятия наблюдателя представляются люксметры с фотоэлементами. К таким люксметрам относится, например, применяемый фотографами для определения экспозиции фотоэкспонометр (рис. 507).

Г Л А В А XXXI ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА *)

§ 376. Правильное и рассеянное отражение света. Напомним некоторые сведения, известные из курса физики общеобразовательной школы.

Отражение света от гладких тел происходит иначе, чем от шероховатых. Если поставить зеркало на пути солнечного света, прошедшего сквозь узкое отверстие в ставне, то луч света отразится от зеркала по одному определенному направлению, образуя «зайчик».

Это — **п р а в и л ь н о е**, или **з е р к а л ь н о е**, отражение.

Если же вместо зеркала поместить на пути света кусок белой ваты или бумаги, зайчика не получится, но все окружающие вату предметы будут освещены. В этом случае лучи отражаются по всем направлениям.

Это — **р а с с е я н н о е** отражение.

Легко понять, что для зрения особое значение имеет рассеянное отражение. Оно позволяет отовсюду видеть освещаемые предметы. При зеркальном отражении тело блестит и рассмотреть его трудно. Например, нельзя рассмотреть, что написано на классной доске, когда она «отсвечивает».

У п р а ж н е н и е

462. Что мы увидели бы, если бы в кинотеатре вместо белого матового экрана было поставлено зеркало?

§ 377. Законы отражения света. Напомним законы отражения света. Если угол между падающим лучом AO и перпендикуляром BO к зеркалу MM , восстановленным из точки падения, называть **у г л о м п а д е н и я** (рис. 508), а угол между перпендикуляром и отраженным лучом OC — **у г л о м о т р а ж е н и я**, то 1) *плоскость, в которой лежат падающие и отраженные лучи, всегда перпендикулярна к плоскости зеркала*; 2) *угол отражения равен углу падения*.

*) В порядке повторения.

Из законов отражения следует, что при отражении света имеет место **о б р а т н о с т ь** лучей. Если, например, свет шел по направлению AO (рис. 508) и после отражения от зеркала MM в точке O пошел по направлению OC , то луч, идущий по направлению CO , после отражения в точке O пойдет по направлению OA .

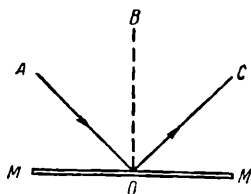


Рис. 508. Отражение света.

У п р а ж н е н и я

463. При каком угле падения падающий и отраженный лучи составляют прямой угол? угол в 60° ? совпадают?

464. Если один человек видит в зеркале глаза другого человека, то этот второй человек может видеть в зеркале первого. Поясните это чертежом.

465. Высота Солнца такова, что его лучи составляют с горизонтом угол 40° . Как следует расположить зеркало, чтобы осветить «зайчиком» дно глубокого колодца?

466. На вращающееся с угловой скоростью $3 \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$ зеркало падает луч света. С какой скоростью вращается отраженный луч?

§ 378. **Плоское зеркало.** Когда мы смотрим в обыкновенное (плоское) зеркало, то нам кажется, что предметы, на самом деле

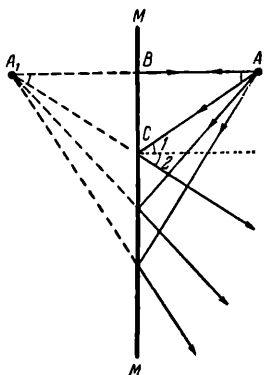


Рис. 509. Лучи, расходящиеся из точки A и отражающиеся от зеркала MM , кажутся расходящимися из точки A_1 за зеркалом.

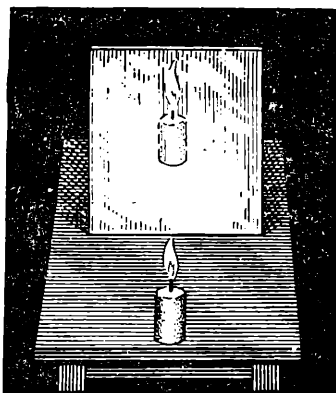


Рис. 510. Если зажечь свечу перед стеклом, то свеча за стеклом кажется горящей.

находящиеся перед зеркалом, находятся за ним. Это объясняется тем, что лучи, расходящиеся от какой-либо точки предмета A , после отражения в зеркале MM идут так, что представляются нам расходящимися из какой-либо точки A_1 за зеркалом (рис. 509).

Эта точка называется и з о б р а ж е н и е м соответствующей точки предмета.

Где находится изображение, даваемое плоским зеркалом? Поставим на столе вертикально кусок ровного оконного стекла, а по обе стороны его — две свечи (рис. 510). Зажжем ближнюю свечу. Мы увидим ее изображение в стекле, как в зеркале. Сдвинем ее так,

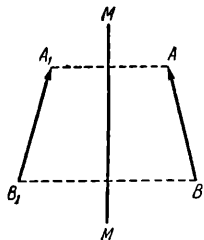


Рис. 511. Предмет AB и его изображение A_1B_1 в плоском зеркале MM' равны по величине.

и углы при A и A_1 равны друг другу ($\angle A_1 = \angle 2$; $\angle A = \angle 1$ и $\angle 1 = \angle 2$ как углы падения и отражения). Поэтому $\triangle ABC = \triangle A_1BC$ и $AB = BA_1$.

Итак, точка и ее изображение, даваемое плоским зеркалом, находятся на одинаковых расстояниях от зеркала и на одном и том же перпендикуляре к нему (с и м м е т р и ч н о). Построим изображения в плоском зеркале двух крайних точек какого-нибудь предмета. Из рис. 511 видно, что размеры предмета и его изображения в плоском зеркале одинаковы.

чтобы нам казалось, что вторая свеча тоже горит. Это значит, что изображение первой свечи совпало со второй. Отметим положения свечей и прочертим линию вдоль стекла. При этом окажется, что линия, соединяющая положения свечей, перпендикулярна к зеркалу и делится им пополам.

Легко понять, почему это так. Чтобы найти положение изображения точки, надо найти точку пересечения продолжений каких-нибудь двух отраженных лучей. Пусть это будут лучи AC и AB (рис. 509). Луч AB , как перпендикулярный к зеркалу, отразится обратно по тому же направлению. Следовательно, треугольники ABC и A_1BC прямоугольны. У них общий катет BC ,

У п р а ж н е н и я

467. Человек находится на расстоянии 1,5 м от зеркала. На каком расстоянии от человека отстоит его изображение в зеркале?

468. Какой минимальной высоты должно быть вертикально поставленное плоское зеркало, чтобы человек ростом 1,72 м мог видеть себя во весь рост? Поясните ответ чертежом.

469. Между двумя плоскими зеркалами, расположенными параллельно друг другу на расстоянии 20 см, помещена свеча. Каково расстояние между первыми изображениями свечи в зеркалах? Между вторыми изображениями?

470. Почему, наблюдая изображение свечи в зеркале из толстого стекла, мы видим рядом с ярким изображением свечи несколько более бледных?

§ 379. **Вогнутые и выпуклые зеркала.** В технике, кроме плоских, часто пользуются кривыми зеркалами — вогнутыми или выпуклыми. Обычно им придают шарообразную форму (с ф е р и ч е с к и е зеркала).

В чем разница между плоскими и сферическими зеркалами? Если несколько параллельных лучей упадут на плоское зеркало, то они после отражения останутся параллельными. Если же параллельные лучи упадут на вогнутое сферическое зеркало, то, отразившись от него, они соберутся в одном месте (рис. 512, а). Поэтому вогнутое зеркало называют **с о б и р а ю щ и м**.

Если направить параллельные лучи на выпуклое зеркало, то они после отражения направятся в разные стороны — рассеются (рис. 512, б). Поэтому выпук-

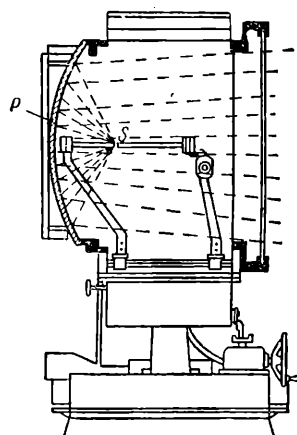


Рис. 513. Устройство прожектора.

S — электрическая дуга; P — рефлектор.

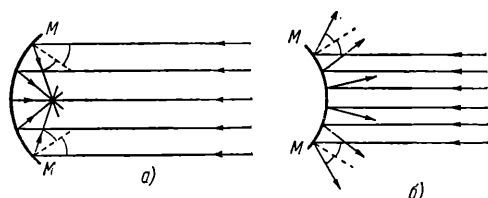


Рис. 512. а) Вогнутое зеркало MM собирает лучи света; б) выпуклое зеркало MM рассеивает лучи света.

лое зеркало называют **р а с с е и в а ю щ и м**. (На рис. 512, а, б для крайних лучей показаны углы падения и отражения.)

Свойством вогнутых зеркал собирать лучи часто пользуются для получения параллельных или слабо расходящихся пучков лучей. Это делается, например, в прожекторах, которые применяются для освещения далеких целей, в автомобильных фарах и т. п. (рис. 513). Для этого позади источника света — дуги S — устанавливают рефлектор P — вогнутое зеркало, направляющее лучи в одну сторону.

Изображения, даваемые кривыми зеркалами, не похожи на изображения в плоском зеркале. Они искажены, увеличены или уменьшены и могут получаться как за зеркалом, так и перед зеркалом. Рассматривать их мы не будем.

У п р а ж н е н и е

471. Как изменится освещение экрана MM , если сзади источника света малых размеров S поместить вогнутое зеркало P в виде полусферы так, чтобы источник света находился в его центре (рис. 514)?

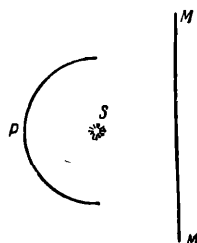


Рис. 514.

ГЛАВА XXXII

ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

§ 380. **Связь отражения и преломления.** Напомним, что преломлением, или рефракцией, света называется изменение направления лучей света, происходящее при переходе лучей из одной прозрачной среды в другую (например, из воздуха в воду или обратно). Вследствие преломления угол между преломленным лучом и перпендикуляром к границе, разделяющей среды (угол преломления), делается меньшим или большим, чем угол падения на границу (рис. 515).

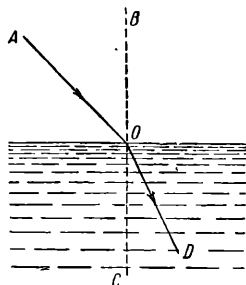


Рис. 515. Преломление света. $\angle AOB$ — угол падения; $\angle COD$ — угол преломления.

Так же как и при отражении света, при преломлении имеет место *обратимость* лучей. Если луч света идет до преломления по направлению AO и, преломившись в точке O , идет дальше по направлению OD , то, наоборот, луч, идущий из точки D в точку O , после преломления пойдет по направлению OA .

При преломлении света на матовых поверхностях, как и при отражении, получается рассеивание света. Этим пользуются в технике освещения. Окружая источник света матовым или молочным стеклом, освещение делают более «мягким» и устраняют прямое попадание слишком яркого света в глаза.

Напомним, что преломление света сопровождается отражением. При этом отраженный луч ярк только тогда, когда угол падения велик.

У п р а ж н е н и я

472. Почему трудно попасть из ружья в рыбу?

473. Находясь близко к поверхности водоема, мы плохо видим дно, а с большой высоты дно видно ясно (именно поэтому розыски больших косяков рыбы удобно производить с самолета). Объясните, почему.

474. Если лист тонкой белой бумаги плотно приложен к странице книги, то сквозь него можно разобрать печать. Если же его немного поднять, то разобрать печать нельзя. Почему?

§ 381. Законы преломления света. Измеряя углы падения и преломления, можно установить следующие законы преломления света: 1) *плоскость, в которой лежат падающий и преломленный лучи, перпендикулярна к поверхности раздела двух сред*; 2) *отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная*; она называется показателем (коэффициентом) преломления света при переходе из первой среды во вторую (n).

Обозначив угол падения α и угол преломления β , можем написать

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n.$$

Для разных сред показатели преломления различны. Приведем показатели преломления для перехода света из воздуха в данную среду:

Стекло	1,5
Вода	1,33
Спирт этиловый	1,36
Алмаз	2,4

Так как лучи света обратимы (§ 377) и при обратном переходе углы α и β меняются местами, то показатель преломления для обратного перехода (из данной среды в воздух) равен $\frac{1}{n}$. Например, для перехода из стекла в воздух показатель преломления равен $\frac{1}{1,5} = 0,67$.

Отметим, что для лучей разного цвета показатели преломления в одной и той же среде несколько отличаются. Мы рассмотрим этот вопрос в § 418.

Почему меняется направление лучей света при переходе из одной среды в другую? Ответ на это дает волновая теория распространения света.

§ 382. Объяснение явлений преломления и отражения света с точки зрения волновой теории. Явление распространения, отражения и преломления света получают хорошее объяснение на основе принципа Гюйгенса — Френеля *).

Согласно принципу Гюйгенса световая волна, распространяясь все расширяющимися шаровыми поверхностями, приводит в колебания точки среды, которые сами становятся центрами новых

*) Христиан Гюйгенс (1629—1695 гг.) — голландский физик, современник Ньютона, изложивший теорию света как волнообразного процесса. Огюст Френель (1788—1827 гг.) — французский физик, своими работами по интерференции и дифракции света много способствовавший торжеству волновой теории света в ее борьбе с корпускулярной теорией Ньютона.

вторичных сферических волн (рис. 516). Огибающая эти волны поверхность образует новый фронт волны, точки которого порождают в свою очередь элементарные волны, и процесс распространения света продолжается дальше. Радиус, проведенный из источника света к какой-нибудь точке фронта, есть луч. По свойству радиуса он всегда перпендикулярен к касательной в соответствующей точке волнового фронта.

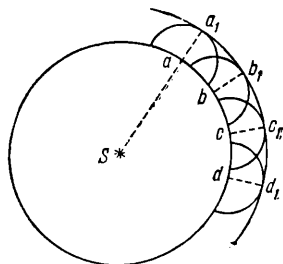


Рис. 516. Принцип Гюйгенса.

Если источник очень удаленный и лучи практически можно считать параллельными, то фронт будет плоскостью, перпендикулярной к лучам. Однако почему свет распространяется все дальше и дальше от источника и почему элементарные волны, представляющие собой шаровые поверхности, не рассеиваются в среде? Объяснение поступательного движения волны и распространения света надо искать, как показал Френель, в интерференции *) вторичных волн: в боковых направлениях элементарные, вторичные волны взаимно интерферируют и гасят друг друга, и лишь в первоначальном направлении они усиливаются, почему свет и распространяется прямолинейно (уточнение будет дано впоследствии).

Отметим, что понятие «луча», которым мы пользуемся в оптике, есть понятие геометрическое, означающее геометрическую прямую, направление распространения света. К нему лишь приближается очень узкий «пучок» света, вырезанный в виде конуса с вершиной в источнике света, а основанием — на поверхности волнового фронта. Физическое понятие — это пучок света, луч же просто выражение для обозначения направления распространения света.

Рассмотрим теперь, как волновая теория объясняет явление преломления света.

Пусть на границу раздела двух сред падает пучок света (рис. 517). Проведем три направления распространения пучка света, три луча SA , SB и SC . Когда луч SA достигнет границы раздела, фронт

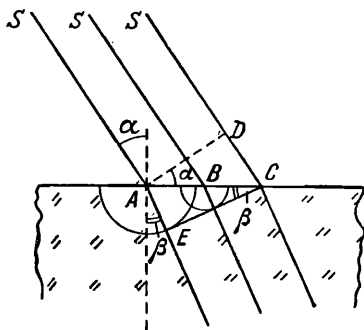


Рис. 517. К объяснению преломления света по волновой теории.

*) Напомним (см. § 125), что интерференцией называется алгебраическое сложение амплитуд волн одинаковой частоты.

волны (перпендикулярный к лучам) даст в пересечении с плоскостью чертежа след AD . Какое положение займет фронт к моменту, когда луч SC достигнет поверхности раздела сред. Если свет во второй среде распространяется с меньшей скоростью, то такая среда называется более оптически плотной. Допустим, что вторая среда — стекло, скорость распространения света в котором v_2 в 1,5 раза меньше, чем в воздухе v (первая среда). Тогда для получения элементарной волны из точки A опишем сферическую поверхность радиусом, в полтора раза меньшим, чем расстояние, какое надо пройти волне в воздухе от D до C . Фронт в момент достижения луча SC границы раздела получим, проведя касательную из точки k элементарной волне за то же время из точки C .

Из $\triangle ADC$ и $\triangle ACE$ найдем соотношение между путями, пройденными светом в воздухе и в стекле за одинаковый промежуток времени, т. е. отношение DC к AE :

$$\frac{DC}{AE} = \frac{AC \sin \alpha}{AC \sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}.$$

Отношение путей за одинаковый промежуток времени есть отношение скоростей $\frac{DC}{AE} = \frac{v_2}{v_1} = n$. Следовательно, отношение синуса

угла падения к синусу угла преломления, о котором говорится в законе преломления света, равно отношению скоростей света, или, иначе, показатель преломления n имеет определенный физический смысл: он равен отношению скоростей света в первой среде к скорости света во второй. Показатель преломления для стекла 1,5 показывает,

что свет в стекле распространяется в полтора раза медленнее, чем в воздухе (или в вакууме): в стекле скорость света равна

$$300\,000 \frac{\text{км}}{\text{сек}} : 1,5 = 200\,000 \frac{\text{км}}{\text{сек}}.$$

Аналогичным способом можно рассмотреть явление и закон отражения света при помощи волновой теории.

Пусть на поверхность зеркала падает пучок света (рис. 518). Точки A , B и C последовательно становятся центрами вторичных сферических волн, распространяющихся обратно от зеркала. В этом случае, однако, скорость отраженной волны, поскольку среда одна и та же, равна скорости падающей на зеркало волны.

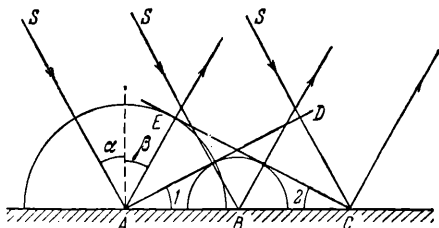


Рис. 518. К объяснению отражения света по волновой теории.

Положение фронта в момент достижения зеркала лучом SA показано линией AD , в момент прихода на зеркало луча SC — линией CE , касательной к поверхности элементарной волны, описанной радиусом $AE = DC$.

Из равенства $\triangle ADC$ и $\triangle AEC$ следует равенство $\angle 1$ и $\angle 2$. Отсюда равенство углов β и α (углов отражения и падения) вследствие перпендикулярности сторон

$$\angle \beta = \angle 2, \quad \angle \alpha = \angle 1.$$

Следовательно, угол отражения равен углу падения:

$$\angle \beta = \angle \alpha.$$

У п р а ж н е н и я

475. Каков показатель преломления при переходе из воды в воздух?

476. Какова скорость света в воде?

477. Будет ли преломляться луч, упавший перпендикулярно к границе раздела двух сред?

478. Луч света входит в стекло, образуя с поверхностью стекла угол 30° . Начертите его путь в стекло.

§ 383. Полное отражение света. Мы уже видели, что преломление света всегда сопровождается его отражением. Особое значение имеет случай, когда луч света выходит из стекла, воды и других плотных сред в воздух. Воспользуемся установкой,

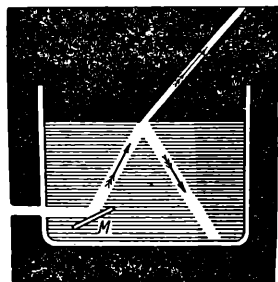


Рис. 519. Преломление света при выходе из воды в воздух. Поворачивая зеркало M , можно менять угол падения луча.

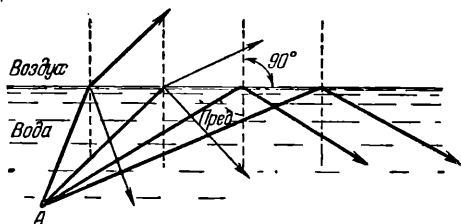


Рис. 520. Если угол падения луча мал, луч света выходит из воды в воздух. При большом угле падения наблюдается полное отражение.

показанной на рис. 519. Если увеличивать угол, под которым луч света падает на границу вода — воздух, то мы увидим, что преломленный луч будет приближаться к поверхности воды и делаться все бледнее, а отраженный луч — все ярче. При некотором определенном угле падения преломленный луч ложится на поверхность воды и совсем ослабевает, а отраженный луч делается столь же ярким, как и падающий.

Соответствующий этому случаю угол падения называется **предельным**. При дальнейшем увеличении угла падения преломленный луч отсутствует, и наблюдается только отраженный луч (полное отражение, рис. 520).

Предельный угол легко определить из опыта или вычислить, если известен показатель преломления вещества. Пусть угол падения равен предельному (α_0). В таком случае угол преломления равен 90° ; показатель преломления равен $\frac{1}{n}$ (см. § 382). Тогда имеем:

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}; \quad \sin \alpha_0 = \frac{1}{n}.$$

Полученное соотношение показывает, что предельный угол у сильно преломляющих веществ (большой показатель преломления) мал. У воды предельный угол 48° , у стекла 42° .

У п р а ж н е н и я

479. Каков предельный угол у алмаза?

480. Во многих оптических приборах (например, в перископах) для получения отражения пользуются вместо зеркал призмами с основанием в виде равнобедренного прямоугольного треугольника. Начертите ход луча, падающего перпендикулярно на меньшую грань; на большую грань. Каковы преимущества такой призмы перед зеркалом?

481. На шоссе знаки, обозначающие поворот дороги, сделаны из пластинок, форма сечения которых показана на рис. 521. Ночью свет от фар автомобиля, падая на такие пластинки, отражается к автомобилю и привлекает внимание водителя к дорожному знаку. Объясните действие пластинок.

482. Для исследования внутренних органов (желудка и т. п.) используют зонды с «волоконной оптикой». Свет от маленькой лампочки рассеивается стенкой желудка. Изображение участка стенки передается по ряду параллельных гибких волокон из прозрачной пластмассы. Объясните действие прибора.

§ 384. Рассеивание света в неоднородных средах. Белая бумага, вата, белые порошки и краски, фарфор состоят из мелких прозрачных частичек (кристаллики, капельки). Такое строение белых тел легко обнаружить, если рассматривать их под микроскопом. Пена состоит из прозрачных пленок и воздуха, туман — из мелких капель воды в воздухе. Почему все подобные среды мало прозрачны или совсем непрозрачны?

Рассмотрим рис. 522, показывающий ход луча света в телах, состоящих из прозрачных крупинок или пленок. Луч испытывает в

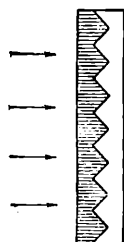


Рис. 521.

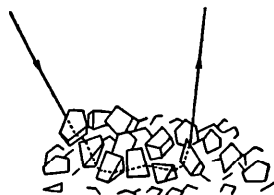


Рис. 522. Путь луча в среде, состоящей из мелких прозрачных крупинок.

таких телах ряд преломлений и полных отражений. Вследствие этого он меняет направление и выходит обратно из тела. Чем мельче крупинки и чем больше показатели преломления крупинок относительно окружающей среды, тем меньше глубина, на которую входят в тело лучи, тем в большей мере происходит рассеянное отражение света. По тем же причинам сильно уменьшают прозрачность воздуха взвешенные в нем частички дыма или мелкие водяные капельки (туман, облака).

У п р а ж н е н и я

483. Почему почва, картон, дерево и т. п. кажутся более темными, если их смочить?

484. Какая масляная краска будет крыть (т. е. делать невидимой грунтовку) лучше: у которой взвешенные в масле зернышки краски преломляют в иной степени, чем масло, или почти так же, как масло?

485. Простейший фотометр можно изготовить из листа белой бумаги, сделав на ней масляное пятно. Поставьте такой лист посередине между двумя неравными источниками света (лампой и свечой). Смотрите на лист бумаги попеременно со стороны сильного и слабого источников. Объясните разницу в виде масляного пятна в этих случаях. Передвигая лист бумаги от свечи к лампе и обратно, найдите положение, при котором масляное пятно будет наименее отличаться от непромасленной бумаги. Что можно сказать об освещенностях бумаги свечой и лампой при таком положении бумаги? Изготовьте такой фотометр и сравните силы света лампы и свечи.

§ 385. Плоскопараллельная пластинка. Плоскопараллельной пластинкой в оптике называют пластинку, ограниченную параллельными плоскостями. Пример такой пластинки представляет хорошее оконное стекло.

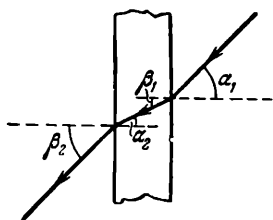


Рис. 523. Ход луча света сквозь плоскопараллельную пластинку.

Входя в пластинку с одной стороны, луч света приближается к перпендикуляру, а выходя с другой, снова в такой же мере отдалется от него. Таким образом, пройдя сквозь плоскопараллельную пластинку, луч света остается параллельным своему первоначальному направлению и только немного смещается. Если стекло тонкое, то смещение мало. Действительно, смотря сквозь оконное стекло, мы не замечаем изменений в расположении и форме предметов. Ход луча через пластинку с параллельными гранями можно пояснить с помощью простых формул. Действительно, при переходе луча из воздуха в пластинку

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = n;$$

при обратном переходе из более оптически плотной среды в среду менее плотную закон преломления надо записать в виде

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2} = \frac{1}{n}.$$

Перемножая эти два равенства почленно, получим

$$\frac{\sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2}{\sin \beta_1 \cdot \sin \beta_2} = 1$$

или после сокращения синусов равных углов β_1 и α_2 :

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_2} = 1,$$

откуда $\alpha_1 = \beta_2$, что и доказывает параллельность падающего и выходящего лучей.

У п р а ж н е н и я

486. При каком угле падения луч света не смещается в пластинке?

487. Начертите ход луча сквозь две одинаковые пластинки, расположенные под прямым углом друг к другу. Угол падения на первую пластинку равен 45° .

§ 386. Лабораторная работа № 21. Определение показателя преломления стекла.

Значение работы. Работа помогает лучшему уяснению закона преломления света и хода преломленных лучей.

Принадлежности. Кусок толстого стекла с параллельными гранями (из школьного набора по оптике), листы картона и белой бумаги, булавки, линейка, угольник, транспортир, карандаш, таблицы тригонометрических функций.

Выполнение работы. Положите на стол лист бумаги с подложенным под него листом картона. На бумагу положите стеклянную пластинку и острым карандашом очертите границы параллельных граней пластинки. Расположив глаз на уровне стола и глядя сквозь стекло, воткните последовательно одну за другой четыре булавки (две за стеклом, две перед стеклом) так, чтобы они казались расположенными на одной прямой (рис. 524). Если теперь снять кусок стекла с бумаги и соединить точки, в которых воткнуты булавки, прямыми линиями, то получится ломаная линия, изображающая ход луча через пластинку с параллельными гранями. В точках перехода луча из одной среды в другую проведите перпендикуляры к границам двух сред. Измерив углы падения и преломления и найдя по таблицам тригонометрических функций значения синусов этих углов, определите показатель преломления луча при переходе из воздуха в стекло.

Направив падающий луч под другим углом и повторяя опыт, убедитесь в постоянстве показателя преломления для данных двух сред. Вспомните физический смысл показателя преломления.

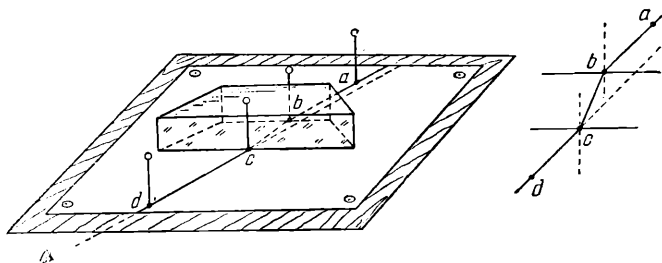
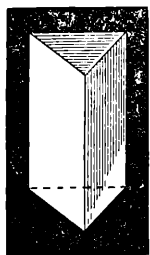
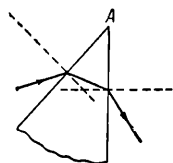


Рис. 524.

§ 387. Призма. В оптике часто приходится иметь дело с прохождением света сквозь клиновидные тела, ограниченные непараллельными плоскостями (рис. 525, а). Стекланные клинья называются в оптике *призмами*. Угол между гранями, через которые проходит луч, называется *преломляющим углом* призмы. Опыт показывает, что, проходя сквозь призму, луч отклоняется в сторону ее более широкой части. Пояснение этого приведено на рис. 525, б. Отметим, что угол отклонения луча зависит от угла падения. Производя



а)



б)

Рис. 525. а) Призма; б) ход луча света сквозь призму. *A* — преломляющий угол призмы.

опыты с разными призмами, легко убедиться, что отклонение луча тем больше, чем больше их преломляющий угол.

Упражнения

488. Останутся ли параллельными два луча после прохождения сквозь призму?

489. Налейте в стакан немного воды и посмотрите сверху сквозь воду на предметы, наклоняя стакан в ту или другую сторону. Почему предметы кажутся смещенными?

ЛИНЗЫ

§ 388. **Формы линз.** Наиболее существенной частью почти всех оптических приборов являются линзы — прозрачные, чаще всего стеклянные тела, ограниченные сферическими поверхностями. Раз-

ные формы линз показаны на рис. 526. Первая слева линза называется двояковыпуклой, четвертая — двояковогнутой.

Третья и последняя линзы с одной стороны выпуклые, с другой — вогнутые, называются менисковыми линзами, или просто менисками.

Три левые линзы толще посередине, чем по краям, три правые, наоборот, толще у краев. Три левые линзы (рис. 526, а) называются собирающими, так как они, подобно вогнутому зеркалу, собирают лучи. Три правые (рис. 526, б) являются рассеивающими линзами.

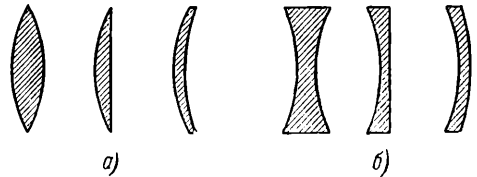


Рис. 526. а) Собирающие линзы; б) рассеивающие линзы.

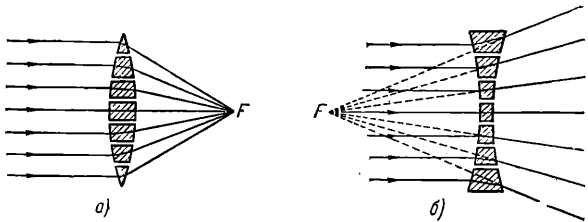


Рис. 527. Чертежи, поясняющие действие линз.

Рис. 527 поясняет действие собирающих и рассеивающих линз. Собирающую линзу (рис. 527, а) можно представить как собрание большого числа призм, расширяющихся к середине, а рассеивающую (рис. 527, б) — как собрание призм, расширяющихся к краям.

Так как призмы отклоняют лучи в сторону расширения, то ясно, что линзы, более толстые посередине, отклоняют лучи к середине, т. е. собирают их, а более толстые у краев — отклоняют лучи к краям, т. е. рассеивают. Середина линзы действует как плоскопараллельная пластинка. Она не отклоняет лучей ни в собирающей, ни в рассеивающей линзе.

§ 389. Собирающая линза. Рассмотрим действие тонких собирающих линз. Если собирающую линзу расположить перед свечой (или перед электрической лампой), а за линзой поместить белый картон (экран), то, меняя расстояние между свечой и линзой или между линзой и экраном, мы можем получить на экране более или менее отчетливое перевернутое (обратное) изображение свечи. Это означает, что лучи, исходящие из какой-либо точки A свечи, пройдя

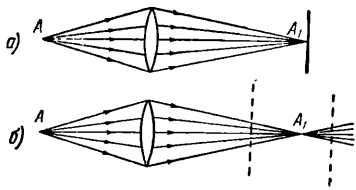


Рис. 528. а) Лучи, исходящие из точки A , после преломления в линзе собираются в точке A_1 (изображение точки A); б) если поместить экран ближе или дальше, вместо резкого изображения точки A получится светлый кружок.

сквозь линзу, снова собираются в одну точку A_1 и притом как раз на экране (рис. 528, а). Поместив экран в одно из положений, показанных на рис. 528, б пунктиром, мы не получим отчетливого изображения, потому что лучи еще не

сойдутся в одну точку или, наоборот, уже разойдутся. Если, не меняя положения линзы, поместить свечу там, где находился экран, а экран — на место свечи, мы снова получим изображение свечи. Это является следствием обратимости преломленных лучей (§ 381).

Если лучи из точки A , пройдя сквозь линзу, собираются в точке A_1 , т. е. если точка A_1 служит изображением точки A , то и наоборот, точка A будет являться изображением, если из точки A_1 будут исходить лучи, проходящие сквозь линзу. Такие точки называются сопряженными.

Производя опыты, легко заметить, что для получения изображений очень удаленных предметов нужно ставить экран недалеко от линзы (рис. 529). Если приблизить предмет, например свечу, к линзе, то для получения изображения экран придется отодвинуть, причем получится изображение больших размеров (рис. 530).

Прямая, проходящая через центры сферических поверхностей C_1 и C_2 , ограничивающих линзу, называется оптической

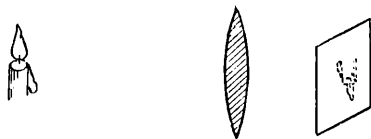


Рис. 529. Свеча находится далеко от линзы, уменьшенное изображение ее получается близко к линзе.

о сью линзы OO (рис. 531). Точка, в которой пересекаются лучи, шедшие до линзы пучком, параллельным оптической оси, называется фокусом линзы, а плоскость, проходящая сквозь фокус и перпендикулярная к оптической оси, — фокальной плоскостью. В случае собирающей линзы лучи действительно собираются в фокусе (поэтому он называется действительным). В случае рассеивающей линзы в фокусе пересекаются продолжения лучей, а не сами лучи (мнимый фокус). Расстояние от линзы до фокуса называется фокусным расстоянием линзы.

Так как лучи, идущие от очень удаленных предметов, можно считать параллельными, то их изображения получаются в фокальной плоскости линзы.

Повернув линзу другой стороной, снова можно получить изображение далеких предметов. Таким образом, каждая линза имеет два фокуса по разные стороны от линзы. Измерив расстояние от экрана до линзы, мы увидим, что оба фокуса тонкой линзы находятся приблизительно на равных расстояниях от нее.

Что получится, если поставить свечу между фокусом и самой линзой? В этом случае никакого изображения на экране получить нельзя. Это значит, что лучи, расходящиеся из какой-нибудь точки свечи, уже не собираются линзой в одну точку, а идут после нее тоже расходящимся пучком. Приблизив глаз к линзе, мы увидим сквозь нее свечу. Она представится нам в прямом увеличенном виде, и притом дальше, чем она находится на самом деле. В этом случае там, где, как нам кажется при наблюдении

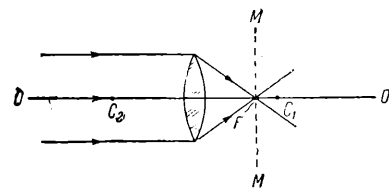


Рис. 531. Оптическая ось линзы; C_1 и C_2 — центры поверхностей линзы, MM — фокальная плоскость линзы.

сквозь линзу, находится свеча, пересекаются не сами лучи, а лишь их продолжения, однако и в этом случае говорят об изображении, только в отличие от действительного его называют мнимым.

Итак, собирающая линза дает действительное обратное изображение предмета, если он находится дальше фокуса, и мнимое прямое изображение, если предмет ближе фокуса.

§ 390. Оптическая сила линзы. Легко убедиться, что фокусные расстояния разных линз различны. Они зависят от сорта стекла, из

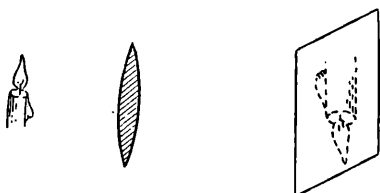


Рис. 530. Свеча находится близко от линзы, увеличенное изображение ее далеко.

которого сделана линза, и от

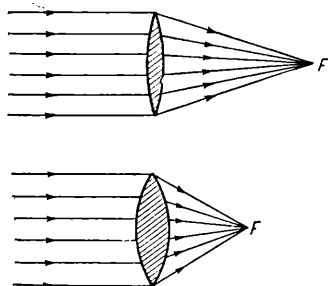


Рис. 532. Более выпуклая линза собирает лучи ближе.

формы линзы. В случае двояковыпуклой линзы фокусное расстояние линзы тем меньше, чем меньше радиусы сферических поверхностей, ограничивающих линзу (рис. 532). Чем меньше фокусное расстояние линзы, тем сильнее она собирает или рассеивает лучи. Величина, обратная фокусному расстоянию линзы, называется ее оптической силой. Оптическая сила линзы с фокусным расстоянием в 1 м принимается за единицу и называется диоптрией (сокращенно *дп*). Если, например, фокусное расстояние линзы равно $25\text{ см} = 0,25\text{ м}$, то ее оптическая сила равна $1 : 0,25 = 4$ диоптриям.

У п р а ж н е н и я

490. Какова оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 5 см? 2 м?
 491. Каково фокусное расстояние линзы с оптической силой 2,5 дп?
 492. Увеличится или уменьшится оптическая сила стеклянной линзы, если ее опустить в воду?

§ 391. Построение изображений, даваемых линзой. Если известны положения линзы, ее фокусов и точки, из которой расходятся лучи, то можно найти положение изображения точки. Для этого достаточно провести только два луча. Точка их пересечения

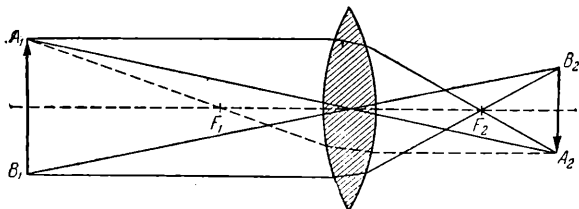


Рис. 533. Построение изображения, даваемого собирающей линзой. Предмет находится далеко от линзы.

и будет изображением; все остальные лучи тоже пройдут через нее. В качестве таких лучей можно взять: 1) луч, идущий от крайней точки предмета (A_1 или B_1) параллельно оптической оси (рис. 533); после линзы этот луч пройдет через фокус F_2 ; 2) луч от крайней точки предмета через середину линзы; этот луч, проходя сквозь линзу, не отклонится, так как средняя часть линзы действует так же, как и плос-

копараллельная пластинка, т. е. лишь немного смещает луч. Ввиду тонкости линзы мы можем пренебречь смещением и провести луч прямо. Точка A_2 пересечения обоих лучей является изображением точки A_1 .

Таким же образом можно построить изображение любой другой точки предмета A_1B_1 . Для наших целей достаточно построить

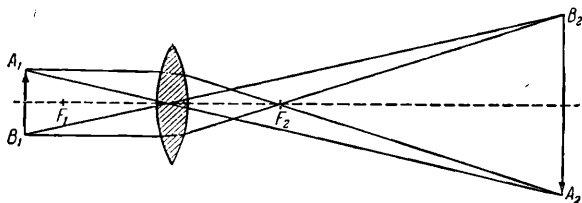


Рис. 534. Построение изображения предмета, находящегося несколько далее фокуса собирающей линзы.

изображение двух крайних точек предмета A_1B_1 , так как они определяют положение всего изображения A_2B_2 .

Заметим, что имеется еще один луч, направление которого после линзы известно. Это — луч, проходящий через фокус F_1 перед линзой. После линзы этот луч пойдет параллельно оптической оси (показан на рис. 533 пунктиром).

Мы построили изображение предмета, находящегося далеко от линзы. В согласии с опытом (§ 389) оно получилось действительное, уменьшенное и обратное.

На рис. 534 построено изображение A_2B_2 предмета A_1B_1 , находящегося несколько далее фокуса F_1 . В согласии с опытом оно действительное, увеличенное и обратное.

Если поместить предмет A_1B_1 ближе фокуса F_1 (рис. 535), то выбранные нами лучи после преломления в линзе разойдутся и действительного изображения не получится. Продолжив лучи до их пересечения, мы получим мнимое изображение A_2B_2 . В согласии с опытом оно получается дальше предмета и является увеличенным и прямым.

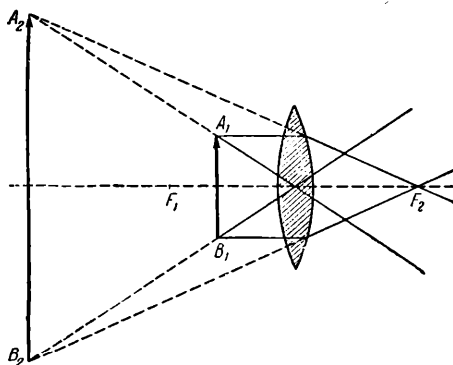


Рис. 535. Построение изображения предмета, находящегося между линзой и ее фокусом.

У п р а ж н е н и е

493. Постройте изображение предмета, отстоящего от линзы на расстоянии: а) вдвое больше фокусного; б) вдвое меньше фокусного.

§ 392. **Размер изображения.** Мы указали, что размеры изображений, получаемых на экране, зависят от расстояний экрана и предмета от линзы. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Пусть на

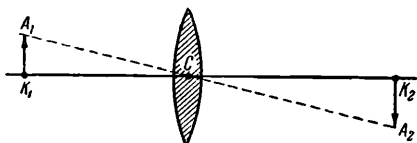


рис. 536 A_1K_1 и A_2K_2 — предмет и его изображение. Пусть линия K_1K_2 совпадает с оптической осью линзы. Из подобия треугольников A_1K_1C и A_2K_2C следует соотношение

Рис. 536. К выводу соотношения между размерами изображения и предмета.

$$\frac{A_2K_2}{A_1K_1} = \frac{K_2C}{K_1C}.$$

Размер изображения так относится к размеру предмета, как расстояние от линзы до изображения относится к расстоянию от линзы до предмета.

У п р а ж н е н и е

494. При помощи линзы получено изображение волоска лампочки на экране, отстоящем на расстоянии 90 см от волоска. Каково расстояние волоска от линзы, если длина изображения волоска в 3,5 раза больше длины волоска?

§ 393. **Формула линзы.** Если известно фокусное расстояние линзы f и расстояние предмета от линзы d_1 , то расстояние изображения от линзы d_2 можно рассчитать. Для этого служит формула линзы, которую мы сейчас выведем. На рис. 537 MN — схематическое изображение собирающей линзы; A_1B_1 и A_2B_2 — предмет и его изображение; $A_1F_1DA_2$ и $A_1CF_2A_2$ — два луча, проходящие сквозь фокусы F_1 и F_2 .

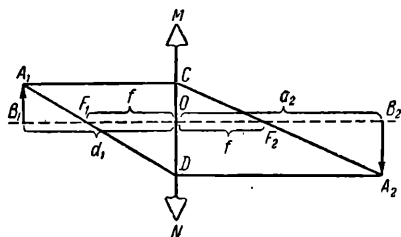


Рис. 537. К выводу формулы линзы.

Из подобия треугольников $A_1B_1F_1$ и F_1OD , а также COF_2 и $F_2B_2A_2$ следуют пропорции

$$\frac{A_1B_1}{B_1F_1} = \frac{OD}{F_1O};$$

$$\frac{CO}{OF_2} = \frac{B_2A_2}{B_2F_2}.$$

Разделив эти равенства почленно и приняв во внимание, что $A_1B_1 = CO$ и $OD = A_2B_2$, получим:

$$\frac{OF_2}{B_1F_1} = \frac{B_2F_2}{OF_1}.$$

Но

$$OF_1 = OF_2 = f; \quad B_1F_1 = d_1 - f; \quad B_2F_2 = d_2 - f.$$

Таким образом,

$$\frac{f}{d_1 - f} = \frac{d_2 - f}{f}.$$

Освобождаясь от знаменателей и разделив обе части равенства на $d_1 d_2 f$, находим:

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{f}.$$

Это и есть формула линзы.

У п р а ж н е н и я

495. На каком расстоянии от собирающей линзы с фокусным расстоянием 24 см получится изображение предмета, отстоящего от линзы на расстоянии: а) 60 см? б) 20 см?

496. Каково фокусное расстояние линзы, если изображение предмета, отстоящего от линзы на 52 см, получилось на расстоянии 14 см от линзы?

497. Полученное при помощи линзы изображение предмета на экране в пять раз больше предмета. Расстояние между предметом и экраном равно 150 см. Определите оптическую силу линзы.

498. Лучи, исходящие из точечного источника света, проходят сквозь линзу с фокусным расстоянием 20 см, отстоящую от источника на 30 см. Что видно на белом экране, поставленном за линзой на расстоянии 40 см? Диаметр линзы 6 см.

§ 394. Лабораторная работа № 22. Определение фокусного расстояния собирающей линзы.

Значение работы. Умение определять фокусное расстояние линзы позволяет находить увеличение, даваемое оптическими приборами (лупой, зрительной трубой и др.), а также определять оптическую силу (номер) очков.

Принадлежности: линзы, линейка (или сантиметровая лента), экран, свеча или лампочка от карманного фонарика.

Выполнение работы. Расположив на одной прямой предмет (свечу, лампочку), линзу и экран, добейтесь получения четкого изображения предмета на экране. Измерьте расстояния от линзы до предмета и до экрана. Из формулы собирающей линзы найдите величину фокусного расстояния. Определите оптическую силу линзы.

Проделайте также приблизительное определение фокуса, не требующее никаких приспособлений. Для этого направьте линзу на какой-нибудь удаленный предмет, например за окном (не на

оконный переплет) и получите четкое изображение его на стене. Измерьте расстояние полученного изображения от линзы. Объясните, почему можно его принять приблизительно равным фокусному расстоянию линзы. Проверьте таким способом номер (оптическую силу) очков для дальновзорких.

§ 395. Сферическая аберрация. Рассматривая изображения, даваемые собирающими линзами, легко заметить, что они часто бывают нечеткими.

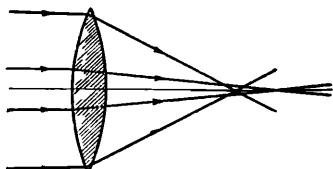


Рис. 538. Край линзы собирают лучи в большей мере, чем середина.

Выясним одну из причин нечеткости изображений. Мы принимали до сих пор, что лучи, вышедшие из какой-либо точки, после прохождения сквозь линзу сходятся в одной точке, образуя изображение. При более тщательном изучении линз выясняется неточность этого предположения. Оказывается, что средняя часть линзы в меньшей степени собирает лучи, чем края, и лучи, прошедшие близко к середине линзы, собираются дальше, чем лучи, прошедшие близко к краям линзы (рис. 538). В этом легко

убедиться. Закроем середину линзы непрозрачной бумагой и измерим фокусное расстояние линзы. Повторим опыт, закрыв, наоборот, края линзы, собираются ближе к краям линзы (рис. 538). В этом легко убедиться, что фокусное расстояние в первом случае заметно меньше, чем во втором.

Различие оптической силы середины и краев линзы называется сферической аберрацией. Для уничтожения сферической аберрации и связанной с ней нечеткости изображения обычно устраняют крайние лучи, устанавливая на их пути диафрагму (непрозрачную пластинку с круглым отверстием в середине). Чем меньше отверстие диафрагмы, тем более четким получается изображение.

§ 396. Рассеивающая линза. Рассеивающая линза ни при каком положении предмета не дает действительного изображения. Смотря сквозь нее, мы во всех случаях видим мнимое уменьшенное изображение. Это происходит потому, что для получения действительного изображения лучи должны сгруппироваться, а не рассеиваться.

Если параллельные лучи падают на рассеивающую линзу, то после нее они идут так, словно расходятся из некоторой точки, лежащей перед линзой (см. рис. 527). Эта точка — фокус рассеивающей линзы — мнимая. Фокусное расстояние рассеивающей линзы и ее оптическая сила считаются отрицательными величинами.

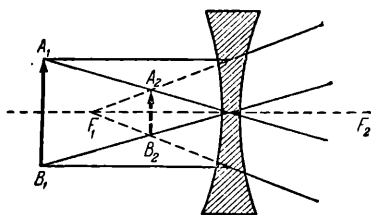


Рис. 539. Построение изображения, даваемого рассеивающей линзой.

A_1B_1 — предмет; F_1F_2 — фокусы линзы; A_2B_2 — мнимое уменьшенное изображение предмета.

На рис. 539 показано построение изображения, даваемого рассеивающей линзой.

У п р а ж н е н и я

499. Покажите, что вывод § 393 относится и к рассеивающей линзе.

500. Постройте изображение предмета, расположенного на расстоянии, вдвое большем фокусного, от рассеивающей линзы.

501. Солнечные лучи падают на рассеивающую линзу с фокусным расстоянием — 60 см. Сзади линзы на расстоянии 40 см помещен экран. Диаметр линзы 6 см. Что видно на экране?

§ 397. Проекционный фонарь. Свойство собирающих линз давать действительное изображение используется во многих оптических приборах. Рассмотрим проекционный фонарь, при помощи которого получают изображения на экране (например, в кинотеатре). Главной его принадлежностью является часть, создающая действительное изображение, — объектив. Объектив может состоять из одной собирающей линзы. Однако одна линза дает

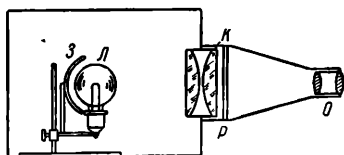


Рис. 540. Устройство небольшого проекционного фонаря.

недостаточно резкое и, кроме того, искаженное изображение. Эти недостатки можно устранить в большей или меньшей мере, если составить объектив из нескольких надлежащим образом подобранных линз.

На рис. 540 показано устройство небольшого проекционного фонаря. В металлическом ящике помещается сильный источник (лампа L с отражателем Z). Посредством конденсора K , т. е. двух собирающих линз, расположенных в передней стенке ящика, поток света собирается в сходящийся пучок. Перед конденсором помещают прозрачную картинку P (диапозитив). Далее находится объектив O . Перемещая объектив взад и вперед, добиваются получения на экране четкого увеличенного изображения картинку.

У п р а ж н е н и я

502. Как надо помещать диапозитив в проекционный фонарь — в прямом или перевернутом виде?

503. Какой объектив даст большее изображение на экране — длиннофокусный или короткофокусный?

§ 398. Фотографический аппарат. Основной частью фотоаппарата, как и проекционного фонаря, является объектив. Внешний вид и устройство одного из типов фотоаппаратов показаны на рис. 541 и 542. Это — плоский, зачерненный внутри ящик (камера); передняя стенка его может отодвигаться от задней посредством меха — куска кожи, сложенной складками. В передней стенке укрепляется объектив. Такое устройство позволяет выдвигать объектив вперед для съемки и снова придвигать его к задней стенке при складывании аппарата. В задней стенке камеры помещается матовое стекло. Перемещая объектив, добиваются, чтобы на матовом стекле получилось резкое уменьшенное

изображение фотографируемого предмета (наводка на фокус). Затем матовое стекло заменяется кассетой — плоским ящичком с выдвигающейся крышкой. В кассете находится светочувствительная пластинка. Выдвинув

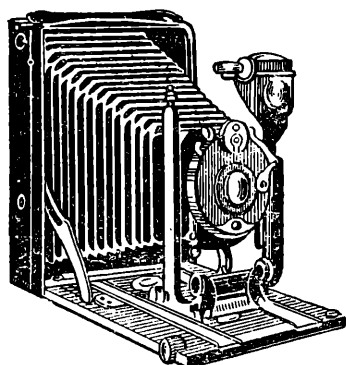


Рис. 541. Внешний вид одного из типов фотоаппарата.

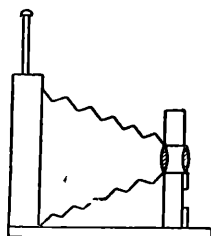


Рис. 542. Схема фотоаппарата, показанного на рис. 428.

крышку из кассеты, открывают на время объектив. При этом на пластинке получается изображение предмета, которое и воспринимается ею (об этом будет рассказано в § 419).

У п р а ж н е н и я

504. Объектив фотоаппарата имеет фокусное расстояние $12,5$ см. Вычислите расстояние светочувствительной пластинки от объектива при съемке портрета с человека, находящегося на расстоянии $112,5$ см перед объективом. Определите, во сколько раз изображение будет меньше натуры.

505. Фотоаппарат дает четкие изображения очень удаленных предметов, когда объектив отстоит на 12 см от светочувствительной пластинки. Как надо изменить это расстояние для съемки портрета человека, находящегося в 72 см от объектива?

506. Фокусное расстояние объектива фотоаппарата равно 5 см. Фотографируется конькобежец, движущийся на расстоянии 10 м от аппарата со скоростью 8 м/сек. Как отразится на четкости снимка движение конькобежца, если взята выдержка $1/25$ сек?

ЗРЕНИЕ. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

§ 399. **Устройство глаза.** Глаз человека своим устройством отчасти напоминает фотоаппарат. Горизонтальный разрез глаза представлен на рис. 543. Снаружи глаз закрыт плотной оболочкой, в передней части глаза — прозрачной, в остальной части глаза — белой. За прозрачной частью оболочки находится радужная оболочка с круглым отверстием посередине (зрачок), а за нею прозрачное тело, похожее по форме на собирающую линзу — хрусталик. Внутреннюю оболочку глаза составляет слой, содержащий мельчайшие разветвления зрительного нерва — сетчатка.

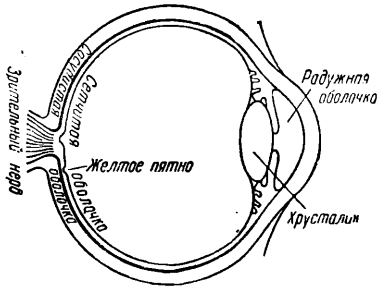


Рис. 543. Разрез глаза.

Благодаря преломлению света в передней поверхности глаза и в хрусталике на сетчатке образуется действительное изображение рассматриваемых предметов (рис. 544). Как и все действительные изображения, оно перевернуто.

Свет, падающий на окончания зрительного нерва, раздражает их. Эти раздражения передаются в головной мозг, и человек получает зрительное впечатление.

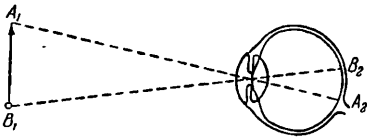


Рис. 544. На задней стенке глаза образуется действительное перевернутое изображение A_2B_2 предмета A_1B_1 .

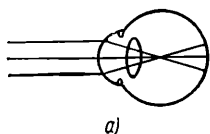
Место возле середины сетчатки — желтое пятно — особенно чувствительно к свету.

Направляя взгляд на что-нибудь, мы бессознательно делаем так, чтобы изображение попадало на желтое пятно. Прямая линия, соединяющая рассматриваемый предмет и желтое пятно, называется зрительной осью глаза.

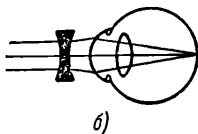
У п р а ж н е н и е

507. Слегка нажмите пальцем на веко у наружного края глаза (около кости). Это вызовет раздражение зрительного нерва; вы увидите светлое пятно. Почему оно появляется у внутреннего края глаза?

§ 400. **Аккомодация.** Способность глаза приспособляться к видению как на близком, так и на далеком расстояниях называется а к к о м о д а ц и е й глаза. При аккомодировании особые глазные



а)



б)

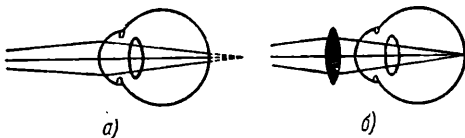
Рис. 545. Как идут лучи в близоруком глазе; а) без очков и б) с очками.

12 см до бесконечности. Близорукие люди видят отчетливо только близкие предметы. Этот недостаток вызван слишком удлиненной формой глаза. Вследствие этого лучи, идущие от далеких предметов, даже при наименее выпуклой форме хрусталика собираются ближе сетчатки (рис. 545, а). Очевидно, что оптическая сила близорукого глаза слишком велика. Чтобы исправить этот недостаток, надо поместить перед глазом линзу с отрицательной оптической силой — рассеивающую. Если оптическая сила линзы подобрана правильно, то изображение получается на самой сетчатке (рис. 545, б) и предмет виден отчетливо. *Очки для близоруких состоят из рассеивающих линз.*

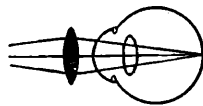
Дальнозоркие люди, наоборот, видят отчетливо только далекие предметы.

Это получается вследствие того, что глаз, даже при наиболее выпуклой форме хрусталика, имеет слишком малую оптическую силу, и лучи, исходящие из какой-либо точки рассматриваемого предмета, не собираются в одну точку на сетчатке (рис. 546, а). Чтобы исправить дальность зрения, надо поместить перед глазом линзу с положительной оптической силой — собирающую (рис. 546, б).

Очки для дальнорких состоят из собирающих линз.



а)



б)

Рис. 546. Как идут лучи в дальнорком глазе: а) без очков и б) с очками.

§ 401. **Длительность сохранения зрительного ощущения.** Если в темноте быстро пронести раскаленный уголек, то мы увидим на мгновение длинную светящуюся линию. Отчего это получается? Наш глаз сохраняет на некоторое время (около 0,1 секунды) полученное зрительное ощущение и видит уголек там, где его уже нет.

На сохранении зрительного ощущения основано кино. При помощи особого аппарата с движущихся объектов делают ряд быстро (15—20 раз в секунду) следующих друг за другом моментальных фотографий — фильм (рис. 547). При демонстрации фильма пленку перемещают перед проекционным фонарем. Механизм в проекторе перемещает пленку не непрерывно, а так, что каждая фотография (кадр) останавливается на очень короткое время. Перед объективом фонаря вращается диск с прорезями (обтюратор), закрывающий объектив фонаря на то время, когда один кадр сменяется другим. В результате на экране появляется ряд картин, в промежутках между которыми экран затемнен. Зритель, сохраняя ощущение от одной картины до появления другой, не замечает перерывов между ними. Картины сливаются в одно впечатление, и люди на экране кажутся движущимися.

§ 402. Зрение двумя глазами. Какие преимущества дает зрение двумя глазами по сравнению с одним? Во-первых, увеличивается поле зрения: двумя глазами мы видим значительно большее пространство. Во-вторых, и это более важно, при зрении двумя глазами гораздо легче оценить, на каком расстоянии находится наблюдаемый предмет.

В самом деле, закрыв один глаз и не двигая головой, трудно попасть острием пера в кончик другого пера, что легко удается, если открыты оба глаза. Объяснение этого явления связано с особенностями зрительного восприятия. При зрении двумя глазами на сетчатках правого и левого глаза получаются два различных изображения, причем различие между ними тем больше, чем предмет ближе. Два различных впечатления, получаемых в правом и левом глазах, сливаются в нашем сознании в одно. Это и дает ощущение различия в расстоянии предметов от нас (восприятие «глубины» поля зрения).



Рис. 547. Несколько кадров фильма.

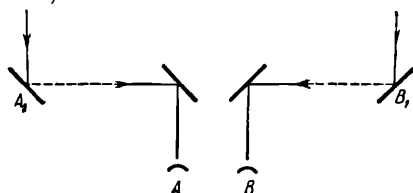


Рис. 548. Наблюдая при помощи системы зеркал, мы воспринимаем «глубину» у более далеких предметов, чем при наблюдении невооруженными глазами, находящимися в AB .

Ввиду незначительности расстояния между глазами человека он не может судить о расстоянии до предметов, если они находятся далеко (свыше 500 м). При рассмотрении далеких предметов восприятие «глубины» облегчается приспособлением, состоящим из системы зеркал или призм, показанным на рис. 548. Это приспособление как бы раздвигает наши глаза на расстояние A_1B_1 ,

значительно большее, чем действительное расстояние AB . Подобные приспособления в соединении с зрительными трубами часто встречаются в военной технике (стереотрубы). Существуют приборы для рассматривания двух фотографических снимков (или рисунков), воспроизводящих то, что видят порознь левый и правый глаза человека (стереоскопы). Схема одного из типов стереоскопов показана на рис. 549. Если посмотреть на картинки PP через половинки линз LL , то зрительные восприятия от двух картинок сливаются в одно P_1 , и зритель получает впечатление «глубины».

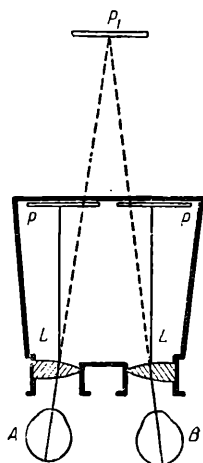


Рис. 549. Схема стереоскопа.

A и B — положения глаз наблюдателя.

§ 403. Назначение оптических приборов.

Чтобы рассмотреть подробнее какой-нибудь предмет, мы стараемся приблизиться к нему. При этом увеличивается угол зрения, под которым мы видим

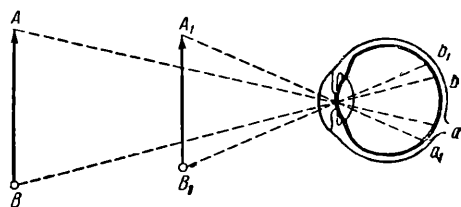


Рис. 550. Если предмет далек (AB), то угол, под которым он виден, и изображение его на сетчатке ab малы. Если предмет близок (A_1B_1), то угол зрения и изображение на сетчатке (a_1b_1) велики.

предмет, т. е. угол между лучами, идущими в наш глаз от крайних точек предмета (рис. 550). Вместе с тем увеличивается и изображение предмета на сетчатке глаза, раздражается большее число нервных окончаний, а это и позволяет рассмотреть подробности.

Однако не всегда можно приблизить предмет к глазу. Во-первых, нельзя без утомления и вреда для глаз рассматривать слишком близкие предметы. Самое близкое расстояние, на котором глаз может работать, не утомляясь, называется расстоянием наилучшего зрения (для нормального глаза оно составляет около 25 см). Если приближение предмета на это расстояние является недостаточным для его рассматривания, то надо вооружить глаз лупой или микроскопом. Во-вторых, иногда приблизиться к рассматриваемому предмету вообще нельзя (например, к небесным светилам) или трудно (например, во время войны к врагу). В таком случае следует вооружить глаз телескопом или зрительной трубой.

Итак, назначение вооружения глаза приборами (лупой, микроскопом, телескопом) — увеличение угла зрения по сравнению с тем углом зрения, под которым может быть произведено наблюдение невооруженным глазом.

Отношение тангенса угла зрения, под которым предмет виден сквозь прибор, к тангенсу угла зрения, под которым тот же предмет виден невооруженным глазом, называется *у в е л ч е н и е м* этого прибора. Обозначая увеличение N , угол зрения при наблюдении сквозь прибор α , а при наблюдении невооруженным глазом α_0 , имеем:

$$N = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha_0},$$

или, так как α и α_0 обычно малы:

$$N = \frac{\alpha}{\alpha_0}.$$

§ 404. Лупа. Лупой называется сильная собирающая линза, которой пользуются

при рассматривании мелких предметов. Для этого приставляют лупу к глазу и придвигают предмет к ней настолько, чтобы его можно было рассматривать без напряжения. Действие лупы совершенно сходно с действием очков для дальновзорких: она служит для увеличения оптической силы глаза, недостаточной для собирания на сетчатке лучей, которые исходят из точек предмета, находящихся на слишком малом расстоянии.

Под увеличением лупы подразумевают отношение тангенса угла зрения, под которым виден предмет сквозь лупу, к тангенсу угла зрения, под которым тот же предмет виден на расстоянии наилуч-

шего зрения (25 см). Выведем формулу увеличения лупы. В случае нормального глаза наименьшее напряжение глаза имеет место в том случае, когда лучи света, доходящие до глаза, являются параллельными, как если бы предмет находился в бесконечности. Поэтому при рассматривании предметов

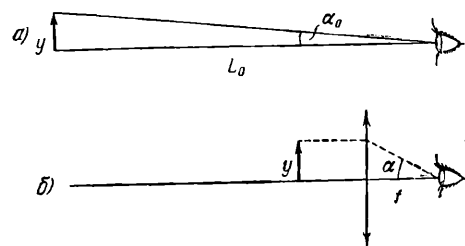


Рис. 552. К выводу формулы увеличения лупы.

сквозь лупу, чтобы добиться наименьшего напряжения глаза, человек с нормальным зрением помещает ее так, чтобы предмет находился в фокальной плоскости лупы (плоскость F на рис. 551). На таком же расстоянии от лупы наблюдатель располагает глаз; при этом видимое в лупу поле зрения велико, а искажения уменьшены. Из рис. 551 видно, что луч AD , параллельный оси до входа в лупу, пересекает ось в оптическом центре глаза. На рис. 552, а

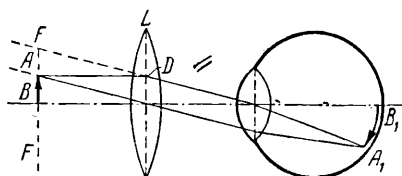


Рис. 551. Действие лупы L .

Пучок лучей, исходящих из точки A предмета AB , преобразуется в параллельный пучок, сводимый оптической системой глаза в точку A_1 сетчатки.

стрелка y показывает размер предмета (от верхнего края до середины, находящейся на оптической оси лупы). Видно,

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{y}{L_0}$$

(L_0 есть расстояние наилучшего зрения). Из рис. 552,б видно, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{f}.$$

Отсюда

$$N = \frac{L_0}{f}.$$

Увеличение лупы равно отношению расстояния наилучшего зрения к фокусному расстоянию лупы. Если фокусное расстояние лупы составляет 2,5 см, то увеличение лупы равно $\frac{25 \text{ см}}{2,5 \text{ см}} = 10$.

У п р а ж н е н и я

508. Найдите увеличения луп с фокусными расстояниями 10 см и 1 см.

509. Определите оптическую силу лупы, дающей четырехкратное увеличение.

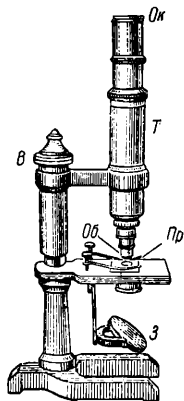


Рис. 553. Внешний вид микроскопа.

Ok — окуляр, Ob — объектив, Pr — рассматриваемый предмет, B — установочный винт, Z — зеркальце для освещения предмета.

§ 405. Микроскоп. В микроскопе сквозь лупу (называемую о к у л я р о м) рассматривают не сам предмет, а его действительное увеличенное изображение, получаемое при помощи о б ъ е к т и в а. Таким образом, микроскоп состоит из двух частей: объектива и окуляра. С целью получить более четкое, неискаженное изображение объектив и окуляр микроскопа составляют из нескольких линз.

На рис. 553 представлен внешний вид одного из типов микроскопа, имеющего простое устройство. Он состоит из трубки T (т у б у с а), на концах которой находятся окуляр Ok и объектив Ob . Рассматриваемый предмет Pr помещается на предметном столике. Установка на отчетливое видение производится посредством перемещения трубки винтом B в вертикальном направлении. Освещение рассматриваемого предмета осуществляется при помощи зеркальца, направляющего свет снизу сквозь предмет в объектив.

На рис. 554 показан ход лучей в микроскопе. Для упрощения чертежа показан только ход двух лучей от точки A предмета, лежащей на расстоянии y от оси микроскопа (от точки B). После объектива Ob лучи, исходящие из точки A , сходятся в точке A_1 , на рас-

стоянии y_1 от оси. Далее эти лучи проходят сквозь окуляр Ok . Поскольку окуляр действует как лупа и изображение A_1B_1 расположено в его фокальной плоскости, лучи параллельным пучком поступают в глаз. На сетчатке глаза образуется действительное изображение предмета A_2B_2 .

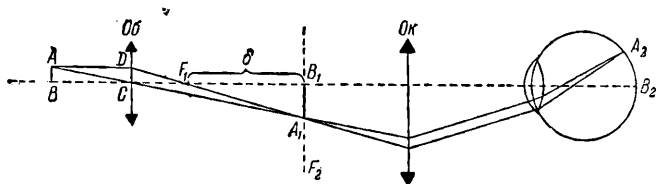


Рис. 554. Ход лучей в микроскопе.

Выведем формулу увеличения микроскопа. Рассматривая подобные треугольники F_1CD и $F_1B_1A_1$ с вершинами в фокусе объектива F_1 , найдем:

$$\frac{y_1}{y} = \frac{\delta}{f_1},$$

где δ есть расстояние между фокусами объектива и окуляра (напомним, что точка A_1 находится в фокальной плоскости окуляра). Полагая так же, как и при выводе формулы увеличения лупы,

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{y}{L_0},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y_1}{f_2} = \frac{y\delta}{f_1 f_2},$$

получим

$$N = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha_0} = \frac{yL_0\delta}{f_1 f_2 y} = \frac{L_0\delta}{f_1 f_2}.$$

Отсюда видно, что при неизменной длине тубуса микроскопа увеличение микроскопа обратно пропорционально фокусным расстояниям объектива и окуляра. Для получения возможно большего увеличения следует брать f_1 и f_2 возможно малыми. Однако, как увидим впоследствии, неограниченно уменьшать фокусные расстояния объектива и окуляра нельзя. Практический предел увеличения микроскопа равен примерно 2000 *).

У п р а ж н е н и я

510. Микроскоп, снабженный объективом с фокусным расстоянием 18 мм, дает увеличение 56. Какое он будет давать увеличение, если, не меняя окуляра и расстояния δ , заменить объектив другим, с фокусным расстоянием 4,3 мм?

) В упомянутом в § 142 электронном микроскопе для фотографирования очень мелких предметов используются не световые лучи, а потоки электронов. Электронный микроскоп может давать значительно большие увеличения, чем оптический микроскоп.

511. Если раздвинуть тубус микроскопа на 1 см, то увеличение микроскопа возрастет с 60 до 64. Какое получится увеличение, если тубус раздвинуть еще на 1 см?

§ 406. Труба Кеплера. Телескоп. Для рассматривания удаленных предметов применяются различные виды зрительных труб, находящихся применение в геодезических, военных, астрономических приборах. Рассмотрим сначала зрительную трубу, называемую трубой Кеплера. Она состоит из объектива и окуляра, которые мы будем схематически изображать как тонкие линзы

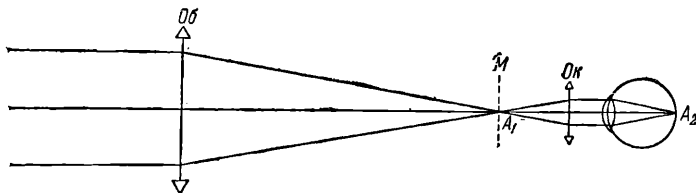


Рис. 555. Ход лучей в трубе Кеплера.

Параллельные лучи от удаленной точки (на рисунке не показана) проходят сквозь объектив *Об*, собираются в точке *A₁*, затем проходят сквозь окуляр *Ок*, от него идут параллельным пучком до глаза и образуют на его сетчатке действительное изображение *A₂*. *М* — стеклянная пластинка с перекрестом нитей.

(рис. 555). В качестве объектива берется длиннофокусная собирающая линза, окуляром служит короткофокусная собирающая линза. Для очень удаленных предметов, которые приходится рассматривать в трубу, в формуле линзы $\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{f}$ дробь $\frac{1}{d_1}$ очень мала по сравнению с другими членами, и ею можно пренебречь. Тогда $d_2 = f$. Это значит, что изображение, даваемое объективом, получается почти точно в фокальной плоскости F_1 объектива. В этом месте трубы обычно помещается «сетка нитей» — крестообразно пересекающиеся прямые линии, нарезанные на тонкой стеклянной пластинке. Полученное от объектива изображение и совмещающаяся с ним сетка нитей рассматриваются сквозь окуляр.

Так же как и в случае микроскопа, в трубе наиболее удобно, чтобы пучки света, направляемые в глаз, были параллельны. Поэтому окуляр располагается так, чтобы изображение, даваемое объективом, совпадало с фокальной плоскостью окуляра. Таким образом, в трубе Кеплера фокальные плоскости объектива и окуляра совпадают, и пучок света, исходящий из очень отдаленной точки и потому почти параллельный, преобразуется в трубе в параллельный пучок малого диаметра, направляемый в глаз (рис. 555).

Длина трубы Кеплера равна сумме фокусных расстояний объектива и окуляра. Из рисунка видно также, что широкий пучок лучей, входящих в объектив, по выходе из окуляра оказывается узким. Выведем формулу увеличения трубы Кеплера. Поскольку действи-

тельное изображение, даваемое объективом, практически находится в фокальной плоскости объектива, то на основании вывода § 392 можно написать:

$$\frac{y_1}{y} = \frac{f_1}{L}; \quad y_1 = \frac{yf_1}{L},$$

где y_1 и y — линейные размеры изображения и предмета, f_1 — фокусное расстояние объектива, L — расстояние от удаленного предмета до объектива. Поступая так же, как при выводе формулы увеличения микроскопа, пишем:

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{y}{L}, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{y_1}{f_2} = \frac{yf_1}{f_2L}.$$

Отсюда

$$N = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha_0} = \frac{f_1}{f_2}.$$

Увеличение трубы Кеплера равно отношению фокусного расстояния объектива к фокусному расстоянию окуляра.

Если нужно достигнуть большого увеличения (это относится в основном к приборам для астрономических наблюдений), то надо брать объективы с возможно большим фокусным расстоянием. Поэтому телескопы имеют очень длинные трубы (до 19 м).

Объектив телескопа должен иметь большой диаметр (до 1 м). Увеличение диаметра объектива связано с увеличением светового потока, попадающего от рассматриваемого объектива в глаз наблюдателя, что делает изображение на сетчатке глаза более ярким. Кроме того, при большом диаметре объектива возможно, как показывает теория, наблюдение более мелких деталей объекта.

Рассмотренный выше тип телескопа основан на преломлении света в линзах объектива, а потому называется **р е ф р а к т о р о м**. Другой тип телескопа — **р е ф л е к т о р** — был впервые построен Ньютоном. Объектив рефлектора представляет собой вогнутое сферическое зеркало, которое действует так же, как собирающая линза, и дает действительное изображение небесных тел, рассматриваемое сквозь окуляр. Телескопы-рефлекторы были значительно усовершенствованы советским ученым Д. Д. Максутовым, поставившим перед зеркалом менисковую линзу (§ 388).

У п р а ж н е н и я

512. Как следует изменить трубу Кеплера, чтобы с ее помощью можно было рассмотреть близкий предмет?

513. Что мы увидим, если повернем трубу Кеплера окуляром вдаль, а объективом — к глазу?

514. Как изменится картина, видимая в трубу, если половину объектива закрыть картоном?

515. Расстояние от объектива до сетки нитей зрительной трубы равно 24 см, окуляр имеет фокусное расстояние 1 см. Каково увеличение трубы?

516. Для изготовления самодельного телескопа взяты для объектива очковое стекло в 1,5 диоптрии (для дальнозорких), а для окуляра — лупа с двадцатикратным увеличением. Какое увеличение будет давать телескоп?

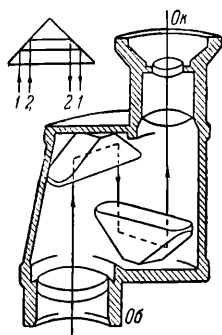


Рис. 556. Разрез трубки призмального бинокля. Вверху показано, как получается, что лучи меняются местами.

517. Труба имеет длину 30 см и увеличение 22. Определите фокусные расстояния объектива и окуляра.

§ 407. Бинокль. Телескоп дает перевернутые изображения. Так как для земных наблюдений это неудобно, то для этой цели употребляют зрительные трубы другого устройства. Их обычно соединяют парами, чтобы иметь возможность наблюдать обоими глазами. Такие приборы называются биноклями.

Каждая трубка призмального бинокля представляет собой трубу Кеплера, внутри которой поставлены две прямоугольные призмы. Лучи света испытывают в них, как показано на рис. 556, по два полных отражения. При отражении в одной из призм верхние лучи меняются местами с нижними, а при отражении в другой — правые с левыми. Поэтому изображение, которое без призмы получилось бы обратным, получается прямым.

Несколько иначе устроены зрительные трубы в театральном бинокле (трубы Галилея). Первая линза в трубах

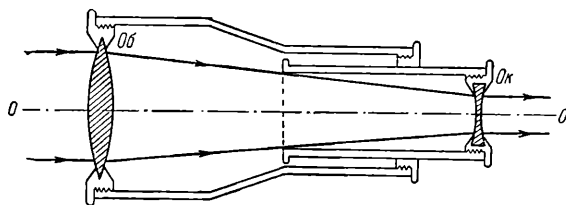


Рис. 557. Схема устройства трубы Галилея.

Галилея, как и все объективы, — собирающая. Но вторая линза (окуляр) поставлена ближе того места, где лучи могли бы дать действительное изображение, и является рассеивающей (рис. 557). Поэтому действительного изображения в трубах Галилея не получается, и лучи, собранные объективом, после прохождения сквозь окуляр входят в глаз параллельными пучками. Глаз, аккомодированный так же, как в случаях лупы, микроскопа и трубы Кеплера, на бесконечность, собирает эти параллельные пучки на сетчатке, образуя на ней действительное изображение.

ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

§ 408. **Интерференция света.** Изучая в разделе I волновые процессы, мы познакомились с явлением интерференции механических волн. Прежде чем перейти к изучению интерференции света, рассмотрим интерференцию механических волн более подробно. Смещения частиц среды в волновом поле могут быть как положительными, так и отрицательными, в зависимости от фазы колебаний. Поэтому при наложении волн, когда смещение частицы, вызываемое одной волной, складывается со смещением, вызываемым другой волной, суммарное смещение может быть и больше, и меньше смещений в налагающихся волнах.

Рассмотрим случай наложения волн с одинаковыми амплитудами. Если в некоторой точке колебания в налагающихся волнах имеют одинаковые фазы, то получается колебание с *удвоенной* амплитудой, а так как энергия колебаний пропорциональна квадрату амплитуды, то энергия в этой точке в четыре раза больше энергии каждой из волн в отдельности. В какой-то другой точке фазы колебаний будут противоположными. В этой точке амплитуда колебаний равна нулю, никакой энергии здесь нет.

Таким образом, при наложении волн происходит перераспределение потоков энергии: в одних местах волнового поля происходит увеличение энергии за счет других мест, в которых энергия уменьшается. Это и есть интерференция волн. Очевидно, что интерференция есть явление, присущее только волновым процессам. Поэтому интерференция света является убедительным доказательством его волновой природы. Она легко наблюдается.

Рассмотрим один из примеров. Опустим в мыльный раствор проволочное кольцо и вынем его. На нем останется мыльная пленка. Расположим эту пленку вертикально. Перед пленкой поместим зажженную спиртовку, в которой растворен хлористый натрий (поваренная соль). Пламя спиртовки при этом окрасится в желтый цвет. Будем рассматривать изображение пламени, образуемое пленкой, действующей как зеркало. Изображение кажется состоящим из ряда горизонтально расположенных светлых и темных полос (рис. 558).

Исходя из представления, что свет имеет волновую природу, это явление можно объяснить так: мыльная пленка под действием тяжести принимает клинообразную, утолщающуюся книзу форму (рис. 559). До глаза доходят световые волны, отраженные от задней и от передней поверхностей пленки.

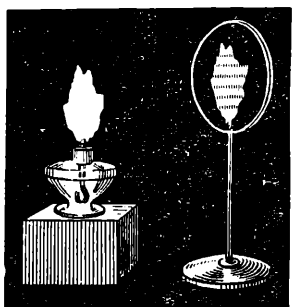


Рис. 558. Наблюдая на мыльной пленке изображение натриевого пламени, мы видим ряд пересекающих его темных горизонтальных полос.

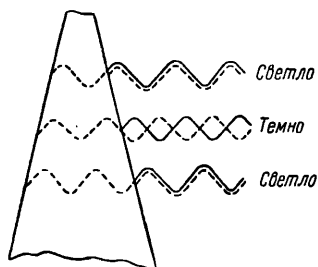


Рис. 559. К объяснению интерференционных полос на мыльной пленке.

Как видно из рис. 559, в некоторых местах световые волны, отраженные от задней и от передней поверхностей пленки, совпадают по фазам колебаний, а потому, налагаясь, усиливают друг друга. Здесь мы видим светлые полосы. В других местах световые волны имеют противоположные фазы колебаний и, налагаясь, ослабляют друг друга. Там мы видим темные полосы.

Продолжим наблюдения над мыльной пленкой. Если наблюдать в ней отражение белого (дневного) света, то пленка окажется окрашенной в разные цвета. Особенно интересно наблюдать за окраской пленки, выдувая мыльный пузырь. По мере утончения пленки ее окраска меняется: из красной становится зеленой, синей и т. д. Очевидно, что в пленке происходит усиление лучей одного цвета (например, зеленого) и ослабление лучей другого цвета (например, красного). При изменении толщины пленки усиливаются лучи уже другого цвета. Это можно объяснить только тем, что лучи разного цвета соответствуют световым волнам разной длины. Иными словами, *цвет лучей определяется длиной световых волн*. Явление ин-

терференции можно наблюдать не только на мыльных пленках, но и вообще в любых тонких прозрачных слоях.

Одно из первых наблюдений этого рода принадлежит И. Ньютону (кольца Ньютона). Положим на плоскую стеклянную пластинку пластинку со сферической поверхностью (например, часовое стекло или выпукло-плоскую линзу; рис. 560). При наблюдении в отраженном натриевом свете вблизи точки контакта наблюдаются интерференционные черно-желтые кольца Ньютона (рис. 561). Если свет белый, кольца окрашены (в этом случае наблюдаются одно-два кольца). Происхождение колец объясняется интерферен-

цией лучей, отраженных от двух поверхностей, ограничивающих воздушный зазор переменной толщины между плоской и сферической поверхностями (рис. 560).

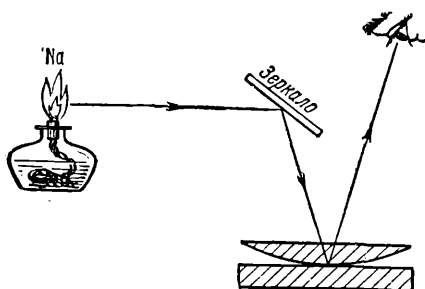


Рис. 560. Схема опыта по наблюдению колец Ньютона.

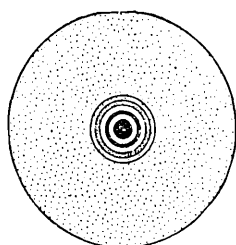


Рис. 561. Фотография колец Ньютона.

Несмотря на то, что Ньютон знал таким образом об интерференционных явлениях, он в основном придерживался корпускулярной теории света (считал свет потоком частиц). Волновую теорию света выдвинул современник Ньютона голландец Гюйгенс. В § 382 мы ознакомились с объяснением явления преломления света на основании «принципа Гюйгенса». Но эта точка зрения была принята большинством ученых лишь в начале XIX века, когда Юнг и Френель провели свои интерференционные опыты. На рис. 562 изображена схема одного из опытов Френеля. В этом опыте свет от точечного источника S проходит через стеклянное тело $БП$, составленное из двух преломляющих призм (бипризма Френеля) и падает на экран $Э$. Пучок лучей, прошедший через верхнюю призму, отклоняется вниз, а пучок лучей, прошедших через нижнюю призму, отклоняется вверх. На средней части экрана эти пучки налагаются друг на друга и возникают условия, способствующие интерференции.

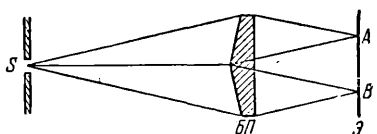


Рис. 562. Бипризма Френеля. AB — область перекрывающихся пучков на экране $Э$.

Упражнение

518. Капните на спокойную поверхность воды маслом, керосином и т. п. и наблюдайте явления интерференции на пленке, которая образуется растекшейся жидкостью на поверхности воды.

§ 409. Длины световых волн. На рис. 563 показаны две прямоугольные стеклянные пластинки; с одного края пластинки плотно

сжаты, на другом конце между ними проложена очень тонкая фольга (толщина фольги на рисунке сильно преувеличена). В результате между пластинками находится тонкий слой воздуха, имеющий, так же как и пленка на рис. 563, форму клина. Этот слой воздуха действует подобно мыльной пленке: в отраженном свете натриевого пламени видны полосы интерференции. Измерив расстояние между полосами интерференции, длину пластинок и толщину фольги, можно сделать приближенный подсчет длины волны натриевого света. Пусть, например, расстояние между полосами равно $0,3 \text{ см}$,

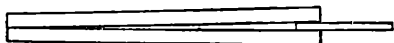


Рис. 563. К определению длины волны света с помощью интерференции.

толщина фольги $0,002 \text{ см}$ и длина пластинок 20 см . Угол между пластинками равен $\frac{0,002}{20} \text{ рад} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$. При переходе от одной полосы к другой толщина воздушного клина меняется на $0,3 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ см}$. Эта величина равна, как видно из рис. 559, половине длины волны. Значит, длина волны натриевого света равна $6 \cdot 10^{-5} \text{ см}$.

Аналогичный метод определения длины волны света возможен с использованием колец Ньютона.

Возможны и другие более точные способы определения длины световых волн.

С одним из этих способов, основанных на использовании дифракционной решетки, мы познакомимся немного позже.

Измерения показали, что красный цвет соответствует волнам длиной около $0,76 \text{ мк}$, зеленый — около $0,55 \text{ мк}$, а фиолетовый — около $0,4 \text{ мк}$. Эти данные относятся к вакууму (или к воздуху). В плотных прозрачных средах (вода, стекло, кварц и т. п.) длины волн для тех же цветов меньше, так как в этих средах меньше скорость света (§ 381). Например, в воде длина волны зеленого света равна $0,55 \text{ мк} : 1,33 = 0,41 \text{ мк}$.

Напомним, что $1 \text{ мк} = 10^{-6} \text{ м}$. В оптике также часто применяется другая единица: $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$ (читается: ангстрем — по имени шведского ученого).

У п р а ж н е н и я

519. Какова частота колебаний в лучах зеленого света?

520. Во сколько раз самая длинная из волн, воспринимаемых нашим зрением, больше самой короткой? Сравните полученный результат со звуковыми волнами.

521. Какова длина волны красного света в стекле? в воде?

522. Докажите следующую формулу для радиуса r_n n -го кольца Ньютона, где R — радиус сферической поверхности, λ — длина волны света:

$$r_n^2 = R\lambda n.$$

Осветите часовое стекло, положенное на плоскую пластинку, натриевым светом и светом от кварцевой лампы, пропущенным через зеленый светофильтр. В каком случае радиус колец больше?

§ 410. Дифракция волн. Наблюдая движение волн, можно заметить, что в некоторых случаях волны огибают встречающиеся на их пути препятствия (под препятствиями мы подразумеваем области, в которых возможны лишь гораздо более слабые волны). Например, волны на поверхности воды, доходя до торчащего из воды маленького прутика, огибают его и идут далее так, что по их форме никак нельзя сделать заключения о наличии на их пути прутика. Если препятствие по размерам значительно больше длины волны, то его наличие заметно сказывается на форме волн за ним. Сзади препятствия образуется область, где волны отсутствуют, и только у краев препятствия обнаруживается загибание волн за препятствие (рис. 564). Загибание волн за препятствие называется *дифракцией* волн.

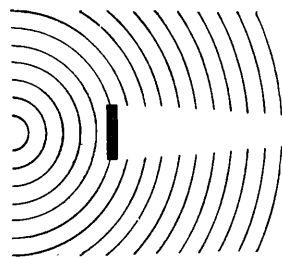


Рис. 564. У краев препятствия заметно загибание волн в область «тени».

Весьма важным случаем дифракции волн является прохождение волн сквозь отверстие в непроницаемой для волн стенке. Этот случай тоже легко наблюдать на волнах, бегущих по поверхности

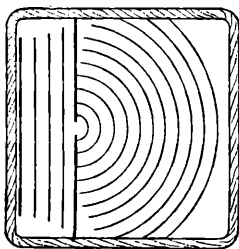


Рис. 565. Дифракция волн, прошедших сквозь узкое отверстие.

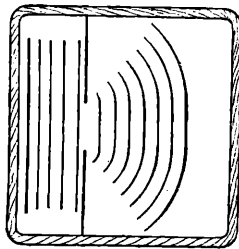


Рис. 566. Дифракция волн, прошедших сквозь широкое отверстие.

воды. Если отверстие мало по сравнению с длиной волн, то волны позади него имеют такую форму, как будто источник волн переместился в отверстие (рис. 565); волны распространяются по всем направлениям.

Если вместо одного отверстия в стенке имеются два, то картина усложняется. Волны идут от отверстий не по всем направлениям,

а только по некоторым. Вид волн тогда в какой-то мере сходен с тем, который создают два шарика, колеблющиеся с одинаковыми периодами (см. рис. 181). Здесь имеет место не только дифракция волн, но и интерференция их. В тех местах, где колебания в волнах происходят в одинаковых фазах, они особенно сильны. В тех местах, где колебания происходят в противоположных фазах, волн нет.

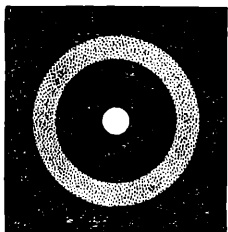
Интерференционный опыт, выполненный по этой схеме (Юнг, 1802 г.), сыграл большую историческую роль в утверждении волновой природы света (наряду с опытами Френеля).

В случае, если размеры отверстия в стенке велики по сравнению с длиной волны, дифракция и интерференция проявляются только у волн, проходящих мимо краев отверстия. В средней части волны идут так, словно стенка отсутствует, а по краям волны загибаются за стенку (рис. 566), причем вследствие интерференции эти волны идут не по всем, а лишь по некоторым направлениям.

Явления дифракции волн и в случае огибания препятствия, и в случае загибания за края отверстия в непроницаемой стенке заметны только тогда, если размеры препятствия или отверстия не очень сильно превышают длину волны. При заданных размерах препятствия или отверстия чем короче длина волны, тем менее заметна дифракция.

§ 411. Дифракция света. При первом знакомстве с оптическими явлениями дифракцию световых волн можно не заметить. Лучи света представляются прямолинейными, и кажется, что они не заходят в область тени за непрозрачными для света предметами. Причиной этого является малость длин световых волн по сравнению с размерами тел, которые образуют тени, или с размерами отверстий в непрозрачных телах, сквозь которые они проходят. Однако в оптических приборах и в глазу дифракционные явления играют весьма существенную роль, ставя предел остроте зрения и возможности увеличивать угол зрения в оптических приборах.

Рис. 567. Дифракционные кольца, видимые вокруг точечного источника света при наблюдении сквозь малое отверстие.



Обнаружить дифракцию световых волн можно так. Приставим к глазу кусок картона, в котором тонкой иглой сделано очень маленькое круглое отверстие. Посмотрим сквозь это отверстие на свет удаленной электрической лампочки. Если отверстие в картоне

круглое и ровное, то мы увидим, что источник света окружен одним-двумя слабыми светлыми кольцами (рис. 567). Размеры этих колец зависят от диаметра отверстия в картоне: чем меньше диаметр отверстия, тем больше кольца. Если диаметр отверстия очень велик,

то кольца настолько приближаются к изображению источника света, что рассмотреть их уже не удается.

В случае отверстия некруглой формы получается иная дифракционная картина (на рис. 568 показана дифракционная картина для отверстия в виде щели).

Дифракционные кольца видны также на изображениях, даваемых оптическими приборами — телескопом, микроскопом. Каждой точке предмета соответствует изображение в виде точки, окруженной одним светлым кольцом (второе и следующие кольца слабы). В этом случае диаметры дифракционных колец зависят от диаметров световых пучков, входящих в объектив прибора и образующих изображение: чем шире входящий пучок лучей, тем меньше диаметры дифракционных колец.

Дифракционные кольца в изображениях не позволяют рассматривать детали изображения. Нет смысла строить приборы с очень большими увеличениями, так как дифракционные кольца все равно помешают рассмотреть детали. Поэтому при конструировании оптических приборов стремятся достигнуть возможно малого диаметра дифракционных колец. В случае телескопов и зрительных труб это достигается увеличением диаметра объектива.

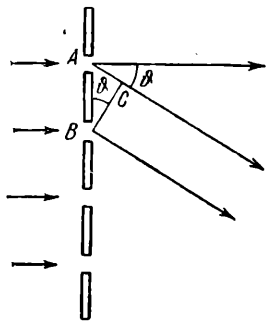


Рис. 569. Принцип действия дифракционной решетки.

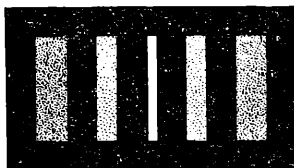


Рис. 568. Дифракционные полосы, видимые вблизи освещенной щели при наблюдении сквозь узкую щель.

§ 412. Дифракционная решетка. Ряд близких параллельных щелей, через которые может проходить свет, образует так называемую дифракционную решетку. Дифракционные решетки нашли важные применения в оптике.

На рис. 569 и 570 разъясняется принцип действия решетки и приводится схема прибора, использующего решетку. Свет проходит через решетку не только прямолинейно (по законам геометрической оптики), но и рассеивается из-за дифракции под различными углами φ . В каких случаях лучи света определенной длины волны, прошедшие через две соседние щели, взаимно усиливаются? Очевидно, для этого на пути этих лучей должно укладываться количество длин волн, либо равное для обоих лучей, либо разность длин лучей должна составлять целое число длин волн. В этих случаях

электрические и магнитные поля двух лучей в точке регистрации (на фотопластинке или на сетчатке глаза) имеют одинаковое направление (одинаковую фазу) и взаимно усиливаются. Равная нулю разность хода соответствует неотклоненному лучу геометрической оптики. Если разность хода соответствует $n = 1, 2, 3$ и т. д. длин волн, мы имеем различные дифракционные лучи. На рис. 569 видно, что разность хода при угле отклонения ϑ составляет

$$AC = d \sin \vartheta,$$

где $d = AB$ есть расстояние между щелями. Эта разность хода лучей AC должна составлять целое число длин волн $n\lambda$. Таким образом, условие взаимного усиления лучей есть

$$d \sin \vartheta = n\lambda.$$

Число $n = 1, 2, 3$ и т. д. называется порядком спектра. На рис. 570 видно, что лучи, рассеянные на этот «угол взаимного усиления» ϑ ,

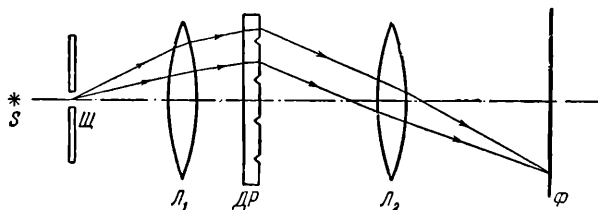


Рис. 570. Схема дифракционного спектрографа: S — источник исследуемого света, Щ — узкая щель в фокусе линзы L_1 , ДР — дифракционная решетка (штрихи на стеклянной пластинке), Φ — фотопластинка в фокусе линзы L_2 .

после преломления в линзе L_2 образуют на фотопластинке дифракционное изображение щели, отстоящее от оптической оси прибора на расстоянии, равном $f \cdot \text{tg } \vartheta$, где f — фокусное расстояние линзы L_2 . Лучи, рассеянные под другими углами (для которых разность хода не равна $n\lambda$), приходят в точку регистрации из каждой щели каждый со своей разностью хода. Так как щелей очень много, наличие дробной разности хода между соседними щелями приводит к тому, что каждой щели соответствует другая щель с почти обратным направлением полей, т. е. происходит ослабляющая интерференция. По этой причине дифракционные изображения щели в дифракционной решетке очень узкие и имеется возможность либо точно определить величину λ , зная d , либо произвести исследование составного света и обнаружить в нем присутствие лучей с разной длиной волны (см. § 428 «Спектральный анализ»).

Технически дифракционные решетки можно делать разными способами. Один из способов — нанесение ряда параллельных

штрихов (царапин) на стеклянную пластинку. Роль щелей при этом играет пространство, не затронутое резцом (рис. 570). Хорошая решетка требует очень точного изготовления. Поэтому для нарезки решеток сконструированы специальные станки.

§ 413. Лабораторная работа № 23. Определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки.

Значение работы. Знакомство с методом определения длины световой волны.

Принадлежности. Прибор для определения световой волны (рис. 571) — софитная лампа (рис. 572), дифракционная решетка, имеющая 50—100 штрихов на 1 мм.

Выполнение работы. Прибор для определения длины световой

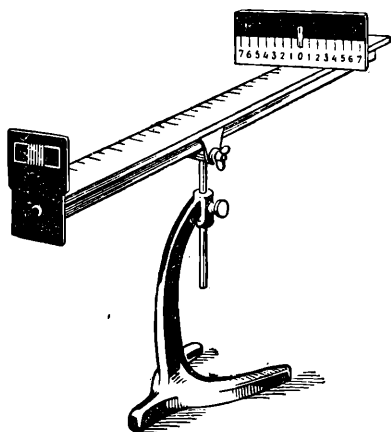


Рис. 571. Прибор для определения длины световой волны.

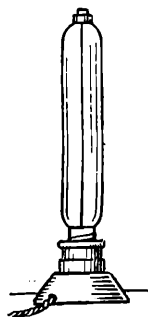


Рис. 572. Софитная лампа с одной нитью накала.

волны располагают на расстоянии 4—6 м от софитной лампы (общей для всего класса). Глядя через дифракционную решетку,

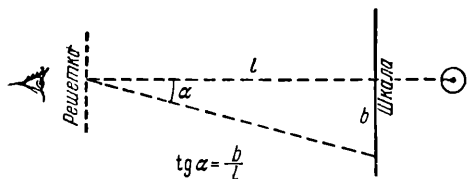


Рис. 573. Схема опыта по определению длины волны.

направьте прибор на лампу так, чтобы через узкую прицельную щель была видна нить накала лампы (рис. 573). Тогда по обе

стороны окна на черном фоне щитка со шкалой появляются дифракционные спектры первого и второго порядка (случайный перекося в расположении спектров устраняем поворотом рамки с решеткой). По шкале щитка определите границы красных и фиолетовых лучей в спектрах I и II порядка справа и слева от окна и возьмите среднее. Определите расстояние l от решетки до щитка (щиток устанавливается передвиганием до получения наибольшей резкости).

По результатам измерений вычисляется $\operatorname{tg} \alpha = \frac{b}{l}$, а затем $\sin \alpha$ (практически $\operatorname{tg} \alpha$ с большой точностью равен $\sin \alpha$ для малых углов α ; проверьте это). По формуле, указанной в теории дифракционной решетки:

$$\lambda = \frac{d \sin \alpha}{n},$$

где d — постоянная решетки (расстояние между штрихами в мк), n — порядок спектра, можно найти длину волны красного и фиолетового цвета. Постоянная решетки d в мм может быть заранее вычислена, если известно число штрихов на 1 мм (например, для 50 штрихов

$$d = \frac{1\,000\,000}{50} = 20\,000).$$

Оформление записи:

Порядок спектра	Границы в мм		l , мм	$\operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha$		λ	
	b (кр.)	b (ф.)		Кр.	Ф.	Кр.	Ф.
I							
II							
Среднее							

§ 414. Поляризация света. Свет — это электромагнитная волна, в которой, как мы уже упоминали, электрические и магнитные поля направлены перпендикулярно к направлению распространения. Можно сказать, что электромагнитная волна является примером поперечных волн, подобно волнам, бегущим по шнуру.

Напомним, что поперечные волны — это такие, в которых направление колебаний перпендикулярно к направлению распространения волны, в отличие от продольных волн, для которых направление колебаний совпадает с направлением распространения волны. Пример продольных волн — механические волны сжатия и разрежения, т. е. звуковые волны. Пример механических поперечных

волн — волны, распространяющиеся вдоль натянутого шнура. С поперечными колебаниями шнура можно проделать следующий опыт (рис. 574, а и б): шнур продевается через узкую поперечную щель; при сообщении концу шнура колебаний в произвольном направлении через щель распространяются колебания строго определенного направления. Такие колебания называются поляризован-

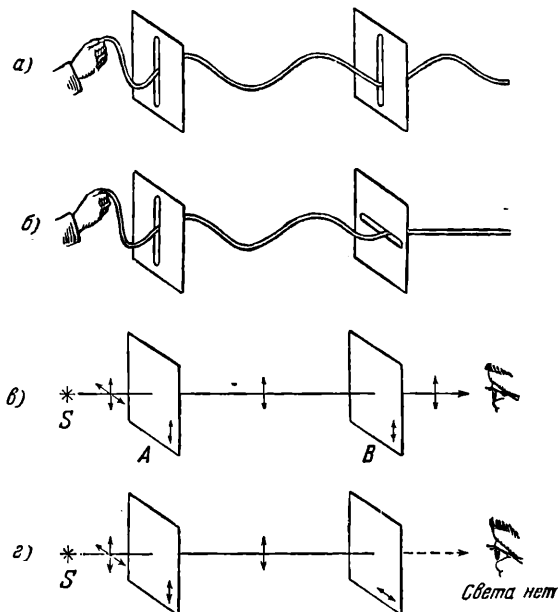


Рис. 574. а) и б) Поляризация поперечных волн, распространяющихся вдоль шнура; в) и г) — схема опыта с поляроидами или с турмалиновыми фильтрами. Знак \uparrow означает направление поляризации, пропускаемой полярироидом или фильтром.

ными, а само явление выделения определенного направления колебаний — поляризацией. При вращении щели в плоскости, перпендикулярной к шнуру, меняется направление колебаний, или, как говорят, направление поляризации.

Аналогичное явление может иметь место для любых поперечных волн, в том числе для электромагнитных. Например, если луч света распространяется вертикально, то переменное электрическое поле может иметь направление с востока на запад, или с юга на север, или же любое другое горизонтальное направление (переменное магнитное поле при этом направлено тоже горизонтально и перпендикулярно электрическому).

Человеческий глаз не различает направления поляризации падающего в него света. Поэтому лишь в XIX веке стало известно, что свет в природе представляет собой смесь лучей, поляризованных в различных направлениях, причем в ряде случаев доля лучей с различным направлением поляризации различна (при рассеянии света молекулами воздуха — свет неба, при отражении от блестящих предметов — свет радуги и т. п.).

Интересно, что многие насекомые (например, пчелы) прекрасно различают поляризацию света неба и используют эту свою способность для ориентации в полете.

Человек дополняет свои органы чувств приборами. Простейший опыт с поляризованным светом приведен на рис. 574, *в* и *г*. В этом опыте используется свойство кристалла турмалина преимущественно поглощать свет одного направления поляризации и пропускать свет перпендикулярного направления. Вместо турмалина можно использовать также пленки специального материала — «поляроида», которые включают в себя много мелких кристалликов сернокислового иод-хинина, похожих по своим свойствам на турмалин.

На рисунке два поляроида пропускают луч света, если их направления пропускания совпадают (случай *в*), и не пропускают, если один из фильтров повернуть на 90° . В этом опыте первый фильтр выделяет из природной смеси различных направлений поляризации лучи с одним преимущественным направлением поляризации. Этот опыт доказывает поперечный характер электромагнитных волн. Для продольных волн поляризация невозможна. Аналогичный опыт можно проделать с поперечными волнами, распространяющимися по шнуру (рис. 574, *а* и *б*).

Ряд жидкостей и растворов органического происхождения обладает свойством изменять направление поляризации. Если между двумя поляроидами, расположенными так, что они не пропускают свет, поместить раствор сахара, свет опять начинает проходить. На этом принципе основаны приборы для определения концентрации сахара в растворах (сахариметры)*). На вращении направления поляризации в твердых телах, различном для разных длин волн, основан красивый опыт с «окрашиванием» прозрачных пленок (из слюды или целлофана), помещенных между двумя поляроидами.

Вращение направления поляризации наблюдается в стекле, если оно находится в напряженном состоянии. Это дает возможность изучать распределение внутренних напряжений в моделях деталей машин и сооружений, изготовленных из стекла и помещенных между двумя поляроидами.

*) Практически в сахариметрах обычно используют не поляроиды, а специальные устройства из кристаллов, дающие высокую степень поляризации прошедшего через них света.

Некоторые другие применения поляроидов:

а) в «поляризационных» микроскопах, предназначенных для рассматривания образцов минералов и т. п. в поляризованном свете;

б) очки для автоводителей с поляроидными стеклами, предохраняющие глаза от ослепления бликами (на мокрой мостовой и т. п.).

У п р а ж н е н и я

523. Посмотрите через поляриод: а) на блик на блестящей поверхности; б) на небо под углом 90° к направлению на Солнце; в) на радугу — и наблюдайте изменение видимой яркости при повороте поляроида. Объясните.

524. Поляроидные очки можно применить для осуществления стереоскопического (объемного) кино. Как бы вы это сделали? Тот же вопрос для стереоскопического телевидения.

525. Существуют предложения снабдить фары автомашин и очки водителей поляроидными стеклами с направлением поляризации, образующим 45° с вертикалью, для устранения ослепления светом фар встречной машины. Объясните.

Г Л А В А Х Х Х V I
С В О Й С Т В А Э Л Е К Т Р О М А Г Н И Т Н Ы Х В О Л Н
Р А З Л И Ч Н О Й Д Л И Н Ы

§ 415. **Спектр белого света.** Взглянем на луг, покрытый цветами самой разнообразной окраски: красными, желтыми, синими... Все они освещены одним и тем же светом — лучами Солнца. Почему же после отражения от различных предметов свет Солнца принимает столь различную окраску?

Ответ на этот вопрос дает следующий опыт *). Поставим призму на пути прошедшего через узкую щель луча белого света (например,

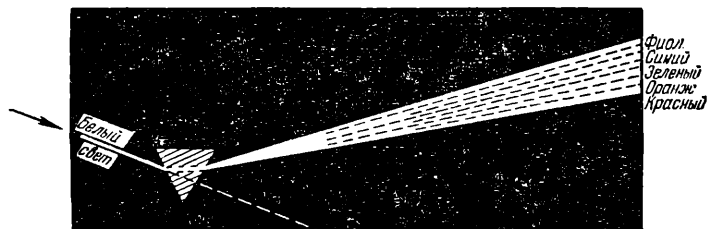


Рис. 575. Проходя сквозь призму, луч белого света разлагается на ряд цветных лучей.

дневного). Мы уже знаем, что луч при этом отклонится призмой в сторону ее широкой части (§ 387). Направим этот отклоненный луч на белый экран.

Вместо узкой белой полоски, получавшейся в отсутствие призмы, мы увидим растянутую полоску с непрерывно меняющейся окраской — **с п е к т р** (рис. 575). Наименее отклоненный край спектра — красный (*кр*), наиболее отклоненный — фиолетовый (*ф*). Между ними располагаются непрерывно переходящие один в другой цвета, среди которых обычно отмечают оранжевый, желтый, зеленый, голубой и синий.

Поставим после призмы линзу, собирающую лучи, а за ней — экран. На экране снова получится белое пятно.

*) Впервые произведенный Ньютоном в 1666 г.

Эти опыты говорят о несовершенстве наших зрительных органов, не дающих нам ощущения, что белый свет — сложный свет, являющийся богатым набором цветных лучей. Мы видели (§ 409), что лучи разной цветовой окраски имеют различные длины волн. Поэтому можно сказать так: белый свет при прохождении сквозь призму разлагается на отдельные электромагнитные волны различной длины.

Теперь мы можем объяснить происхождение разнообразных красок в природе. Тело белого цвета отражает весь падающий на него свет. Красное тело отражает из падающего на него белого света главным образом красные лучи, а остальные поглощает; синее тело отражает синие лучи и т. д. Черное тело поглощает лучи всех цветов.

Это объяснение подтверждается таким наблюдением: предметы, освещенные пламенем, дающим чисто желтый свет (натриевое пламя, см. § 408), кажутся или желтыми, или темными; других окрасок в этом случае увидеть нельзя.

У п р а ж н е н и я

526. Почему при вечернем освещении нельзя судить об окраске, какую ткань имеет днем?

527. Объясните такой опыт: если на волчке нарисовать ряд секторов, окрашенных в спектральные цвета, и привести волчок в быстрое вращение, то он кажется почти белым.

§ 416. Сложение цветных лучей. Если направить спектр не на экран, как было описано в § 415, а на маленькие зеркальца, которые установлены в ряд и могут вращаться, то, поворачивая их, мы сможем часть цветных лучей собрать в одно место (рис. 576). Получится

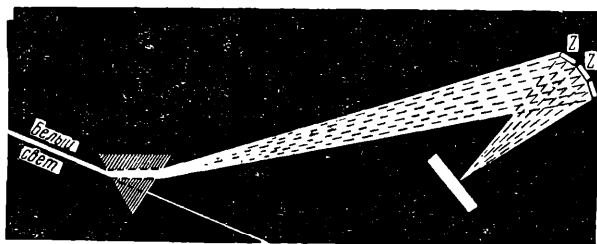


Рис. 576. Поворачивая зеркальца Z , мы можем направлять различные лучи спектра в одно место.

зайчик, окрашенный либо в один из спектральных цветов, либо в пурпурный цвет, не имеющийся в спектре. Из этого опыта ясно, что наш глаз получает одинаковое впечатление и от сложного света, содержащего много спектральных лучей, и от одного только цветного луча.

Если собрать одну часть лучей, образующих спектр, в один зайчик, а другую часть лучей — в другой, то мы получим цветные пятна, которые при наложении друг на друга дают белый свет. Такие цвета называются *дополнительными* (см. цветную вклейку между стр. 544 и 545).

Примерами дополнительных цветов являются красный и голубовато-зеленый, желтый и синий, зеленый и пурпурный.

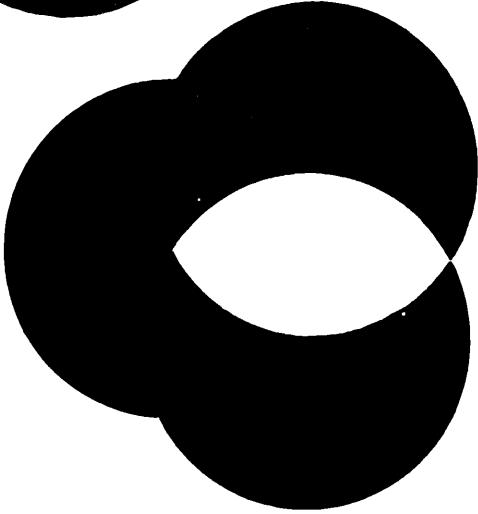
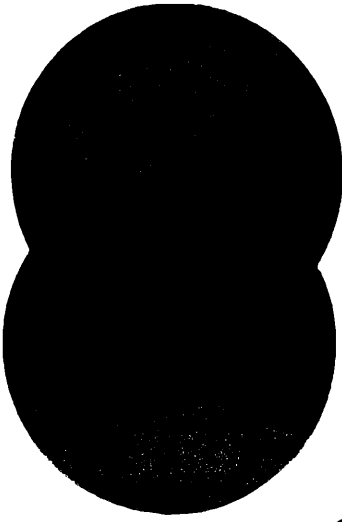
§ 417. Смешивание красок. Соединяя желтый и синий лучи, мы получаем белый луч, так как эти цвета — дополнительные. Однако, смешивая желтую и синюю краски, мы получаем зеленую краску. Как это объяснить?

Для этого надо вспомнить, как получается рассеянное отражение света (§ 384). Отраженный луч света входит на некоторую глубину в вещество и затем выходит обратно. Ясно, что любая краска должна быть прозрачна для тех лучей, которые она отражает. При этом в большинстве случаев краски отражают смесь нескольких цветов. Например, синяя краска отражает синие лучи, смешанные с небольшим количеством зеленых. Желтая краска отражает смесь желтых и зеленых лучей. Если смешать синюю краску с желтой, то синяя задержит желтые лучи, а желтая — синие. Зеленые же лучи пройдут и через ту, и через другую краску, и смесь покажется зеленой (см. цветную вклейку). По этой же причине синее и желтое стекла, сложенные вместе, кажутся зелеными.

Смешивая в различных пропорциях три краски или более, мы можем получать весьма разнообразные окраски. Это делают при цветной печати. На одном и том же листе делают три (или более) цветных оттиска (в трехцветной печати берут красную, желтую и синюю краски). Эти три краски, смешиваясь друг с другом в разных местах оттиска в различных соотношениях, дают картину, выполненную как бы большим количеством разных красок.

§ 418. Дисперсия света. Описанный в § 415 опыт приводит еще к одному важному выводу: лучи различного цвета в стекле преломляются по-разному. То же обнаруживается и для других прозрачных веществ. Наибольший показатель преломления имеет место для фиолетовых лучей, наименьший — для красных лучей. Различие в показателях преломления (а следовательно, и в скоростях распространения) световых волн различной длины называется *дисперсией* света. По мере уменьшения длины световых волн показатель преломления обычно увеличивается. Например, фиолетовый свет (короткие волны) преломляется сильнее, чем красный (длинные волны). Это значит, что короткие световые волны распространяются в стекле медленнее, чем длинные.

Из сказанного ясно, что показатели преломления, указанные в таблице § 381, являются некоторыми средними величинами.



Сплошной

Спектры
испускания

Натрий

Водород

1



2



3



4



5



Натрий

Спектры
поглощения

Солнечный



У п р а ж н е н и е

528. Почему объектив, сделанный из одной линзы, дает изображения предметов, окрашенные по краям?

§ 419. Химическое действие света. Когда свет поглощается телами, он всегда так или иначе действует на них.

Кроме нагревания, которое в той или иной мере всегда имеет место при этом, важным является х и м и ч е с к о е действие света. Оно состоит в том, что свет, поглощаемый телами, вызывает химические реакции в них. Примерами служат выцветание красок, а также процессы, совершающиеся под действием света (главным образом красного) в растениях.

Эти процессы получили название «фотосинтеза» и представляют собой сложную цепь реакций, идущих при посредстве содержащегося в растениях особого зеленого вещества — хлорофилла, поглощающего красный свет. Растения поглощают углекислый газ из воздуха, а воды и минеральные соли — из почвы. Конечным итогом фотосинтеза являются выделение в воздух свободного кислорода и усвоение углерода в виде углеводов и (отчасти) других органических соединений. При этом энергия солнечных лучей переходит в химическую энергию топлива и пищи.

Одним из применений химического действия света является фотография. Светочувствительные пластинки изготавливаются так: в темноте на стеклянную пластинку наносится тонкий слой фотоэмульсии, т. е. желатина, перемешанного с мелко раздробленным бромистым серебром. Крупинки бромистого серебра под действием падающего на них света приобретают свойство более легко отделять бром при последующей обработке. Напомним, что при фотографировании на светочувствительной пластинке образуется действительное изображение предмета. При этом на тех местах пластинки, которые соответствуют более светлым местам предмета, свет разлагает большее число крупинок бромистого серебра, чем в темных местах. Запечатленное на пластинке изображение на этой стадии является невидимым (даже в микроскоп). Его часто называют «скрытое изображение». После съемки пластинку опускают в проявитель — раствор вещества, отнимающего от бромистого серебра бром (например, гидрохиноновый проявитель). Тогда в местах, подвергнувшихся действию света, выделяется серебро в виде тонкого черного порошка. Получается негатив (рис. 577), в котором темные места соответствуют светлым местам предмета и наоборот. После этого негатив надо «закрепить». Для этого его погружают в раствор гипосульфита, в котором растворяются еще не разложившиеся соли серебра, и пластинка теряет светочувствительность.

Чтобы получить позитив, т. е. обыкновенную фотографию (рис. 578), под негатив подкладывают светочувствительную бумагу и подвергают ее действию света. Затем позитив тоже проявляют и

закрепляют. Тогда под темным местом негатива получится светлое место и наоборот, т. е. получится полное соответствие фотографического изображения и предмета.



Рис. 577. Негатив.



Рис. 578. Позитив.

Короткие световые волны производят обычно более сильное химическое действие, чем длинные. Например, на некоторые сорта светочувствительных пластинок действуют только лучи света, близкие к фиолетовому концу спектра, а красные лучи совсем не действуют. Изготовление, проявление и закрепление таких пластинок можно производить при красном свете.

Упражнение

529. Выцветание красок происходит главным образом при освещении, цвет которого является дополнительным к цвету краски. Объясните, почему.

§ 420. Люминесценция. В § 368 было указано, что поглощение света некоторыми телами вызывает испускание этими телами света иного цвета, чем поглощенный свет. Это явление называется люминесценцией. Рассмотрим его примеры.

Вынесем на яркий солнечный свет бутылку с керосином. При этом наиболее ярко освещенная часть керосина как бы окрасится в синеватый цвет. Так как керосин имеет желтоватую окраску, то отраженный свет должен был бы казаться желтым. Следовательно, синеватый цвет керосина — следствие самостоятельного свечения, вызванного поглощением солнечного света. Отметим, что по прекращении освещения синеватое свечение керосина немедленно исчезает. Подобные явления наблюдаются у касторового масла, одеколona, натурального меда и многих других веществ. Люминесценция,

исчезающая при прекращении освещения, называется флуоресценцией.

У некоторых твердых тел (например, у сернистых соединений металлов) наблюдается свечение, продолжающееся и после прекращения освещения. Этот случай люминесценции называется фосфоресценцией. Фосфоресцирующие вещества применяются в светящихся циферблатах часов, автомобильных приборов и т. п.

Световые волны, излучаемые люминесцирующим веществом, имеют большую длину, чем волны, поглощаемые им. Как мы увидим впоследствии, это является следствием закона сохранения энергии.

§ 421. Невидимые электромагнитные волны. Средняя часть спектра (желто-зеленая) представляется нам более яркой, чем края спектра. Это обусловлено неодинаковой чувствительностью глаза к лучам разного цвета. К цветам, расположенным у краев спектра, глаз значительно менее чувствителен, чем к желто-зеленым. За границами видимого спектра располагаются волны, не воспринимаемые глазом: за красным концом спектра — инфракрасные лучи, за фиолетовым концом спектра — ультрафиолетовые лучи.

Инфракрасные лучи являются электромагнитными волнами с длинами волн от 0,76 мк до 0,3 мм. Ультрафиолетовые лучи имеют длины волн от 0,4 до 0,005 мк.

Инфракрасные лучи по своим свойствам близки к красным лучам. Так же как и красные лучи, они не действуют на обыкновенную фотопластинку, и, вообще, химическое действие оказывают лишь в редких случаях. Их нетрудно обнаружить по вызываемому ими нагреванию тел (например, при помощи термометра).

Ультрафиолетовые лучи по своим свойствам близки к фиолетовым лучам: так же как и фиолетовые лучи, они вызывают флуоресценцию керосина и других веществ, сильно действуют на фотопластинки и вообще легко вызывают химические процессы. Важное значение имеет их сильное физиологическое действие. Ультрафиолетовые лучи вызывают «солнечные ожоги» кожи (организм человека защищается против ультрафиолетовых лучей «загаром» — выделением бурого вещества, не пропускающего лучей в глубь кожи). Ультрафиолетовые лучи убивают бактерии. Именно этим объясняется оздоровляющее действие лучей Солнца на жилища. Ультрафиолетовые лучи оказывают сильное фотоэлектрическое действие. Как мы увидим далее, в некоторых металлах фотоэффект может быть вызван только ультрафиолетовыми лучами — видимый свет на них не действует.

Флуоресценция под влиянием ультрафиолетовых лучей в последнее время получила применение в так называемых люминесцентных лампах (рис. 579). Люминесцентные лампы представляют собой стеклянные трубки, содержащие внутри пары ртути. При электрическом токе пары ртути испускают ультрафиолетовые

лучи. На внутренней поверхности трубки нанесен слой вещества, ярко флуоресцирующего под действием ультрафиолетовых лучей. Люминесцентные лампы потребляют значительно меньше энергии, чем обычные лампы накаливания, дают мягкий, близкий к дневному, свет.

Аналогично работают ярко светящиеся рекламные трубки. Разнообразие их цветов обусловлено различным подбором люминесцирующих веществ, наносимых на внутреннюю поверхность трубок. Внедрение люминесцирующих источников света в технику связано с работами С. И. Вавилова и его учеников.



Рис. 579. Устройство люминесцентной лампы.

E — накаливаемые электроды.

и преломляются так же, как и видимые. Точно так же, как и для видимых лучей, для них существуют прозрачные и непрозрачные тела. Например, поваренная соль прозрачна для инфракрасных лучей, а стекло, вода и водяные пары сильно поглощают их. Ультрафиолетовые лучи поглощаются большинством тел. Обыкновенное стекло задерживает их, но существуют сорта стекол, довольно прозрачные для них. Почти не задерживает ультрафиолетовых лучей кварц. Поэтому стенки ламп, испускающих ультрафиолетовые лучи (например, некоторых медицинских ламп), изготавливаются из кварца.

У п р а ж н е н и е

530. На специальных фотографиях часто можно рассмотреть подробности, которые ускользают при рассматривании предметов глазом. Например, на фотографиях местности, сделанных с самолета, явно выделяется маскировка под зелень, совершенно скрывающая орудия. Как это объяснить?

§ 422. Рентгеновские лучи. В 1895 г. немецкий физик Рентген заметил, что стенки трубки, на которые падают катодные лучи (§ 347), являются источником невидимых лучей; эти последние лучи вызывали флуоресценцию некоторых веществ, действовали на фотопластинки и сильно ионизировали воздух. Они получили название **рентгеновских**.

Впоследствии в трубках для получения рентгеновских лучей (рис. 580) катод получил вид накаленной нити *K*, испускающей электроны. Против катода устанавливается **антикатод** *A*, тормозящий потоки электронов; он изготавливается из тугоплавкого металла с большим атомным весом (например, вольфрама).

Для работы рентгеновской трубки необходимо наличие высокого (десятки тысяч вольт) напряжения между антикатодом и катодом.

Это напряжение обычно создается повышающим трансформатором переменного тока. В течение той половины периода, при которой электрическое поле в трубке направлено от антикатада к катоду, электроны, вылетевшие из катода, двигаясь ускоренно, достигают громадных скоростей. При столкновении электронов с тяжелыми ядрами антикатада и возникают рентгеновские лучи. При резком торможении электрона исчезает магнитное поле движущегося электрона и по закону индукции

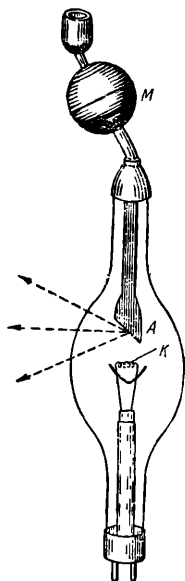


Рис. 580. Рентгеновская трубка с накалившимся катодом.

M — приспособление для охлаждения антикатада.



Рис. 581. Рентгеновский снимок.

Темные точки — дробишки, застрявшие в руке.

создаются электрические и магнитные поля, распространяющиеся в виде электромагнитной волны высокой частоты.

Во время второй половины периода ток через трубку не течет (так как антикатод не является источником электронов).

Кинетическая энергия электронов превращается при их торможении в антикатоде в энергию рентгеновских лучей только частично. Значительная часть энергии электронов тратится на нагревание антикатада. Во избежание перегрева антикатада его охлаждают во время работы проточной водой.

Наиболее важное свойство рентгеновских лучей — их способность проникать через многие непрозрачные для видимого света вещества. Бумага, дерево, ткани человеческого тела почти прозрачны для них. Менее прозрачны кости, стекло. Еще менее прозрачны металлы, в особенности тяжелые, например свинец или

платина. Проникающая способность рентгеновских лучей позволяет с их помощью устанавливать многие заболевания внутренних органов человека. Для этой цели подлежащую исследованию часть тела (например, поврежденную руку) помещают между рентгеновской трубкой и флуоресцирующим под действием рентгеновских лучей экраном (или фотографической пленкой). На экране получают более или менее темные тени от тканей тела, от костей и т. д., позволяющие судить о повреждениях или о состоянии внутренних органов человека (рис. 581). Без использования рентгеновских лучей трудно представить себе сейчас работу хирурга, диагностику легочных и многих других внутренних болезней. Рентгеновскими лучами пользуются также в целях де ф е к т о с к о п и и (отыскания внутренних дефектов в металлических изделиях).

Рентгеновские лучи оказывают сильное влияние на живые ткани. Этим пользуются в медицине для лечения некоторых болезней. Длительное действие мощных рентгеновских лучей на тело человека опасно для здоровья.

Природа рентгеновских лучей долго оставалась неясной. В 1912 г. в результате открытия дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке было установлено, что рентгеновские лучи являются электромагнитными волнами. Длины их простираются от 5 ммк (мягкие, сильно поглощаемые лучи) до 0,004 ммк (жесткие, сильно проникающие лучи). При не очень больших энергиях электронов, падающих на антикатод, рентгеновские лучи представляют собой смесь электромагнитных волн всевозможных длин (эти лучи, как описано, возникают при торможении рассеивающихся в поле ядер электронов и поэтому называются лучами торможения). При

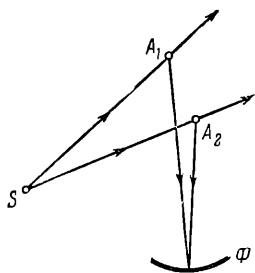


Рис. 582. Возникновение разности хода лучей при рассеянии рентгеновских лучей двумя атомами A_1 и A_2 .

увеличении энергии падающих электронов возникает новое явление — значительная часть энергии рентгеновских лучей приходится на определенные длины электромагнитных волн; эти длины различны в зависимости от вещества антикатада («характерны» для вещества антикатада). Поэтому эти лучи называются «характеристическими». К причине их образования мы вернемся в главе «Строение атома».

Дифракция рентгеновских лучей на атомах кристаллической решетки явилась одним из первых подтверждений атомарной структуры вещества. В настоящее время дифракция рентгеновских лучей является важнейшим средством изучения расположения атомов в кристаллах, жидкостях и сложных молекулах. В этих исследованиях обычно применяются характеристические лучи. Пучок рентгеновских лучей определенной длины волны рассеивается на

такие углы, при которых рассеянные разными атомами лучи приходят в точку регистрации (на фотопластинку) в одинаковой фазе и колебания взаимно усиливаются (складываются) (сравните с теорией рассеяния света дифракционной решеткой, § 412; в случае рентгеновских лучей роль «щелей» играют отдельные атомы).

На рис. 582 изображено рассеяние лучей, вышедших из точки S (антикатод), двумя атомами A_1 и A_2 . В точке регистрации Φ (фотопластинка) рассеянные лучи взаимно усиливаются, если разность путей $SA_1\Phi - SA_2\Phi$ равна целому числу длин волн λ характеристического излучения. Зная величину λ , мы можем по величине угла рассеяния судить о расстоянии между атомами A_1A_2 .

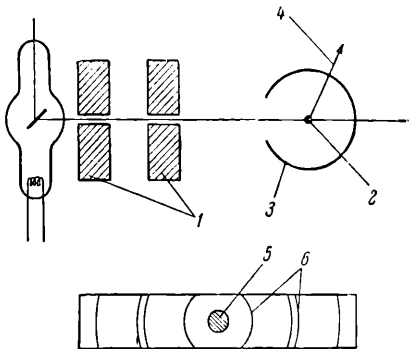


Рис. 583. Схема опыта по рассеянию рентгеновских лучей мелкокристаллическим веществом: 1 — ограничитель хода лучей, 2 — исследуемый образец, 3 — фотопленка, 4 — рассеянный луч, 5 — пятно на фотопленке от нерассеянного пучка лучей, 6 — темные линии, соответствующие углам усиленного рассеяния.

На рис. 583 изображены примерная схема опыта по рассеянию характеристических рентгеновских лучей тонкой провололочкой мелко-

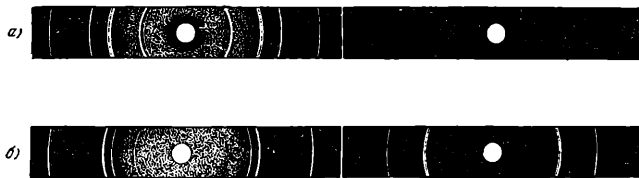


Рис. 584. Рентгенограммы: а) графита; б) алмаза (позитивный снимок). Изменение расположения атомов в кристаллической решетке при превращении графита в алмаз привело к изменению углов максимального рассеяния.

кристаллического вещества и типичный вид картины, получающейся на фотопленке после ее проявления.

На рис. 584 приведены в качестве примера рентгенограммы графита и алмаза. Химический состав этих двух веществ одинаков — чистый углерод, они отличаются строением кристаллической решетки. Успехи науки о строении кристаллов, в которых так велика роль рентгеноструктурного анализа, увенчались в последние годы получением искусственных технических алмазов из графита при давлении более ста тысяч атмосфер и при высоких температурах.

§ 423. Обзор электромагнитных волн. Рассмотрим рис. 585, схематически показывающий основные участки спектра электромагнитных волн.

На прямой отложены деления, соответствующие длинам волн, причем длины волн уменьшаются в десять раз при переходе на одно деление слева направо. Рисунок охватывает длины волн от 10^6 км до 10^{-6} ммк. Начиная с очень длинных волн, указанных в левом краю чертежа, все волны вплоть до длин в десятые доли миллиметра

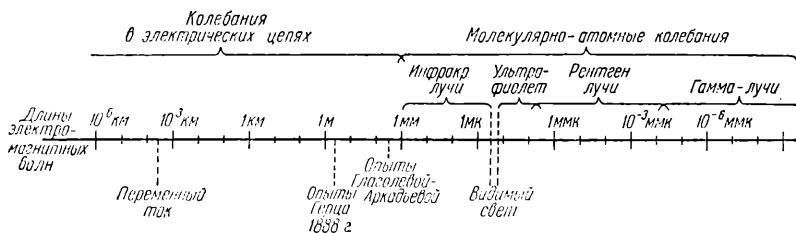


Рис. 585. Сводка электромагнитных волн различных длин.

получаются посредством колебаний в электрических цепях: в электрических машинах (например, переменный ток стандартной частоты 50 гц), в телефонных установках, в ламповых генераторах, в искровых разрядах. Соответствующие им длины волн разнятся в колоссальное число раз: примерно от диаметра Солнца до толщины бумажного листа. Среди опытов с короткими волнами отметим упомянутые опыты Герца, опыты П. Н. Лебедева и А. А. Глаголевой-Аркадьевой. Еще более короткие волны получают при колебаниях молекул, атомов и ядер атомов. Как видно из чертежа, существуют такие области, где возможны оба способа получения колебаний. Молекулярно-атомные колебания охватывают широкую область инфракрасных лучей, узенькую полоску видимого спектра и широкую область ультрафиолетовых лучей. Затем идут рентгеновские лучи, длины волн которых близки к размерам атомов. Еще дальше расположены гамма-лучи, длины волн которых значительно меньше размеров атомов. Гамма-лучи испускаются при радиоактивных процессах, о которых мы будем говорить далее.

Таким образом, понятие «электромагнитные волны» охватывает собой волны, имеющие громадное разнообразие свойств вплоть до совсем несходных (например, свойств радиоволн и световых волн). Мы видим здесь яркий пример того, как изменение некоторого количества (в данном случае длины электромагнитных волн) приводит к резкому изменению качества (в данном случае свойств волн).

Построение полной шкалы электромагнитных волн, охватывающей многие, казалось бы, совершенно несходные явления, составляет одно из величайших достижений науки.

ИЗЛУЧЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ

§ 424. Тепловое излучение твердых тел и жидкостей. В долгие зимние ночи поверхность Земли сильно охлаждается. Это — результат излучения поверхностью Земли в межпланетное пространство длинноволновых инфракрасных лучей. Такое излучение испускают все твердые и жидкие тела. Однако, если вокруг излучающего тела находятся другие тела при той же температуре, например стены здания, в которых мы находимся, то это излучение не приводит к охлаждению: тело излучает столько же энергии, сколько и поглощает от других тел.

Что произойдет, если мы начнем повышать температуру тела? Как известно из повседневного опыта, увеличится мощность излучения, т. е. общее количество энергии, излучаемое за единицу времени. Как установили Стефан и Больцман, мощность излучения растет пропорционально четвертой степени абсолютной температуры. Например, при повышении температуры от 300°K до 600°K , т. е. вдвое, мощность излучения возрастает в $2^4 = 16$ раз. Обозначив мощность излучения с 1 м^2 поверхности тела через E , абсолютную температуру через T , мы можем написать:

$$E = \sigma T^4,$$

где σ — коэффициент пропорциональности, равный

$$\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}^4 \cdot \text{сек}}.$$

Закон Стефана — Больцмана, строго говоря, относится к телам, поглощающим все падающие на них лучи (абсолютно черным), но довольно хорошо выражает свойства и обычных, нечерных тел.

Рассмотрим пример: какое количество энергии ночью в пространство излучает за 10 часов 1 га пахотной земли, имеющей температуру 10°C ? Абсолютная температура пашни равна $273^\circ \text{K} + 10^\circ \text{K} = 283^\circ \text{K}$. Следовательно, с 1 м^2 за 1 сек излучается

$$5,7 \cdot 10^{-8} \cdot 283^4 \text{ дж} = 3,6 \cdot 10^2 \text{ дж}.$$

Так как $1 \text{ га} = 10^4 \text{ м}^2$, а 10 часов = 36 000 *сек*, то общее количество излученной энергии равно

$$10^4 \cdot 3,6 \cdot 10^4 \cdot 3,6 \cdot 10^2 = 1,3 \cdot 10^{11} \text{ дж.}$$

Переводя в килокалории, получим:

$$\frac{1,3 \cdot 10^{11}}{4,2 \cdot 10^3} \text{ ккал} = 3,1 \cdot 10^7 \text{ ккал.}$$

Это примерно равно количеству теплоты, получаемому при сжигании 10 *т* дров.

При повышении температуры максимум мощности излучения перемещается в сторону более коротких волн. При низких температурах максимум излучения приходится на инфракрасные лучи, а видимые и ультрафиолетовые лучи настолько слабы, что их нельзя обнаружить. По мере повышения температуры все мощнее излучаются видимые лучи, сперва красные, затем желтые и т. д. (при 500—600° С начинается заметное свечение тел). Дальнейшее повышение температуры приводит к интенсивному излучению ультрафиолетовых лучей.

В свете керосиновой лампы (1600° С) на видимые лучи приходится 2% всей мощности излучения; в солнечном свете эта цифра возрастает до 38% (температура поверхности Солнца около 5700° С). При еще более высоких температурах процент видимого света становится меньше, так как испускается очень много ультрафиолетовых и рентгеновских лучей.

Поскольку излучение ведет к охлаждению тел, то мы должны заключить, что оно происходит за счет энергии теплового движения молекул и атомов тел. Поэтому его называют **тепловым излучением**.

Тепловое излучение твердых и жидких тел представляет набор электромагнитных волн всевозможных длин. Для видимых лучей это доказывается характером спектра. Свет накаливаемых твердых тел (например, свет волоска горящей электрической лампы, раскаленных частиц копоти в пламени свечи и т. п.) имеет сплошной спектр без всяких разрывов. Таким же при тепловом излучении твердых и жидких тел оказывается и спектр невидимых лучей.

У п р а ж н е н и я

531. Какова мощность излучения железной плиты площадью 2500 *см*², имеющей температуру 227° С?

532. Солнечные лучи приносят на 1 *см*² поверхности, расположенной перпендикулярно к их направлению вблизи поверхности Земли, около 1 *кал* в минуту. Какова должна быть температура почвы, чтобы она излучала такое же количество энергии обратно в мировое пространство?

§ 425. Спектроскоп. При слабых источниках света опыт, показанный на рис. 575, невыполним: на экран попадает слишком мало света. Спектры слабых источников удобно изучать при помощи приборов, называемых спектроскопами. На рис. 586 показана схема простого спектроскопа. В трубе *A* имеется освещенная исследуемым источником света щель *S*, находящаяся в фокусе линзы L_1 . Пройдя сквозь линзу L_1 , лучи света становятся параллельными, падают на призму *P* и разлагаются ею на ряд цветных

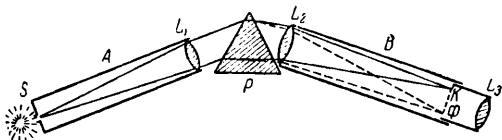


Рис. 586. Схема устройства спектроскопа.

параллельных пучков. Затем они проходят линзу L_2 , установленную в начале трубы *B*. В фокальной плоскости линзы получается ряд цветных изображений щели — спектр. Для рассматривания спектра служит окуляр L_3 . Спектры можно сфотографировать, помещая в фокальную плоскость линзы L_2 фотопластинку. Спектроскоп, специально приспособленный для фотографирования спектров, часто называют спектрографом. Как спектроскопы, так и спектрографы бывают двух типов: с использованием преломления в призме, как на рис. 586, или с использованием дифракции на дифракционной решетке (см. рис. 570).

§ 426. Излучение газов. Если внести в пламя спиртовой горелки асбест, смоченный раствором соли натрия или другого металла и изучать спектр этого пламени при помощи спектроскопа, то мы увидим спектр излучения одноатомных паров металлов, соли которых введены в пламя. Эти спектры состоят из отдельных цветных линий (линейчатый спектр), разделенных темными промежутками (см. цветную вклейку). Излучение других одноатомных газов тоже имеет линейчатый спектр. Спектр излучения многоатомных газов состоит из отдельных светлых полос (полосатый спектр).

Напомним, что свечение газа можно вызвать не только нагреванием до высокой температуры, но также электрическим током. В этом случае тоже наблюдаются линейчатые и полосатые спектры.

Каждому химическому элементу свойствен некоторый определенный спектр, отличный от спектров других элементов. Например, видимый спектр паров натрия состоит из двух очень близких желтых линий, видимый спектр водорода состоит из четырех линий.

Кроме видимых линий, спектры газов содержат еще невидимые (инфракрасные или ультрафиолетовые).

Спектры излучения различных источников света называются спектрами испускания.

§ 427. Спектры поглощения. Цветные стекла представляются нам цветными потому, что поглощают часть лучей. Какие именно лучи они поглощают? Это можно узнать так. Получим, как указано в § 415, сплошной спектр, а затем перед щелью поместим исследуемое цветное стекло. Мы увидим, что в некоторых местах сплошного спектра образовались темные полосы, указывающие на поглощение лучей. Сплошной спектр с темными полосами, соответствующими поглощенным в какой-либо среде световым волнам, называется спектром поглощения этой среды.

Кроме спектров поглощения прозрачных твердых тел, можно получать спектры поглощения жидкостей и газов. В случае газов вместо темных полос получаются темные линии поглощения. Немецкий физик Кирхгоф (в 1859 г.) установил, что линии поглощения в газе по своему положению совпадают со светлыми линиями в спектре испускания того же газа (закон Кирхгофа). Например, спектр поглощения паров натрия имеет две линии поглощения в желтой части спектра (см. цветную вклейку).

Этот закон применим также к твердым и жидким телам. Можно сказать так: *чем сильнее тело поглощает лучи с определенной длиной волны, тем сильнее оно при той же температуре излучает их.*

У п р а ж н е н и е

533. Имеются две кастрюли одинакового размера, содержащие одинаковые количества горячей воды; одна кастрюля закопченная, другая — блестящая. Какая из кастрюль остынет быстрее?

§ 428. Спектральный анализ. Так как разные газы дают различные спектры, то можно исследовать состав веществ, наблюдая их спектры испускания или поглощения (спектральный анализ).

Спектральный анализ оказывает большие услуги химии, в особенности в тех случаях, когда количества веществ слишком малы, чтобы их можно было исследовать обычными химическими способами. Посредством спектрального анализа узнали также состав наружных оболочек небесных светил. Исследование спектра Солнца обнаружило в спектре много узких линий поглощения. Эти линии были названы ф р а у н г о ф е р о в ы м и (в честь открывшего их немецкого физика Фраунгофера). Они образуются благодаря поглощению излучения из глубин Солнца в наружной, более холодной части оболочки Солнца (см. цветную вклейку). Сличая спектр Солнца со спектрами разных химических элементов, установили,

что на Солнце имеются кальций, железо, натрий, водород и ряд других химических элементов.

Спектральные линии благородного газа гелия впервые были обнаружены именно в спектре Солнца, и лишь потом этот газ был открыт на Земле.

Изучение спектров далеких туманностей привело американского ученого Хаббла к открытию смещения линий к красному концу спектра («красное смещение»). Чем дальше туманность, тем это смещение значительней. Это поразительное явление может быть истолковано, исходя из работ выдающегося советского ученого А. А. Фридмана (выполненных в 1922—1923 гг. до открытия Хаббла) как свидетельство грандиозного всеобщего «расширения Вселенной». Электромагнитные колебания света удаляющихся от нас туманностей доходят до нас с уменьшенной частотой. Это явление подобно явлению кажущегося понижения тона гудка удаляющегося от нас поезда.

Широко используется спектральный анализ в технике. Например, наблюдая спектры света, излучаемого электрической искрой, получаемой между кусками сплава, можно очень быстро определить состав этого сплава.

Спектральный анализ обладает огромной чувствительностью обнаружения ничтожных примесей инородных элементов. Получение особо чистых веществ, такое важное в атомной технике, при производстве полупроводниковых материалов, реактивов и т. п. было бы невозможно без спектрального анализа.

В тех случаях, когда вещество нельзя нагревать, так как это разрушило бы его, можно производить спектральный анализ по спектрам поглощения. Например, в судебной медицине, чтобы узнать, являются ли какие-либо пятна следами крови, растворяют эти пятна и смотрят, не дает ли раствор полос поглощения, характерных для крови.

Особенным разнообразием отличаются спектры поглощения органических веществ, снятые в инфракрасных лучах. Для классификации огромного количества различных спектров органических веществ очень полезным оказалось применение быстродействующих электронных вычислительных машин.

Сейчас, как и в период возникновения современных представлений об атомах и молекулах, изучение спектров остается одним из основных источников сведений о строении вещества.

У п р а ж н е н и е

534. Какие изменения произойдут в спектре Солнца во время полного солнечного затмения, когда наблюдается спектр света, излучаемого атмосферой Солнца (к о р о н о й)?

ЯВЛЕНИЯ, ОБЪЯСНЯЕМЫЕ КВАНТОВЫМИ СВОЙСТВАМИ СВЕТА. ФОТОНЫ

§ 429. **Фотоэлектрический эффект.** При изучении свойств электромагнитного излучения в конце XIX — начале XX века был открыт ряд новых явлений, для полного описания которых оказались недостаточными разработанные к тому времени теоретические представления. Одним из этих явлений является испускание электронов освещенными телами (внешний фотоэлектрический эффект, или, кратко, фотоэффект).

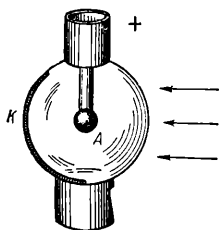


Рис. 587. Схема устройства фотоэлемента.

А — анод в виде металлического шарика, К — катод в виде тонкого слоя щелочного металла. Стрелки показывают направление лучей света.

Прикрепим к электроскопу цинковую пластину и зарядим ее отрицательно. Если осветить пластину ярким светом (например, от электрической дуги), то она быстро потеряет свой заряд — листочки электроскопа спадут. Если же пластинку зарядить положительно, то потери заряда не наблюдается. Следовательно, освещение пластинки вызывает испускание из нее электронов. Фотоэффект наблюдается и у других металлов; особенно он велик у щелочных металлов (калия, натрия, цезия и др.).

В технике фотоэффект широко используется в приборах, называемых фотоэлементами. Один из типов фотоэлементов изображен на рис. 587. Он представляет собой стеклянную колбу, часть внутренней поверхности которой покрыта щелочным металлом. Слой металла сообщается с выведенным наружу проводником, который присоединяется к отрицательному полюсу источника тока (напряжением 100—200 в). Посредине колбы устанавливается небольшой электрод, соединяемый с положительным полюсом источника. Воздух из колбы откачан (иногда колбу наполняют газом). Если фотоэлемент не освещен, ток по нему не идет. Освещение фотоэлемента вызывает появление тока (фототока). Фототоки обычно настолько слабы, что необходимо их усиление посредством электронных ламп (§ 350).

Впервые фотоэффект был исследован А. Г. Столетовым, установившим его основные законы. В частности, он нашел, что при освещении металлов испускание ими электронов имеет место не всегда. Если длина волны падающего света больше некоторой определенной для данного металла величины, то фотоэффект не наблюдается. Предельная длина волны обратно пропорциональна той «работе выхода», которую нужно произвести, чтобы электрон вылетел за пределы данного металла (см. § 276). Обозначим работу выхода электрона W . Фотоэффект имеет место, если длина волны падающего света λ меньше некоторого предельного значения, которое можно записать в виде

$$\lambda_{\text{пред}} = \frac{A}{W}.$$

Величина A — постоянная величина, численно равная $2 \cdot 10^{-25}$ дж · м.

В атомной физике в качестве единицы энергии часто пользуются энергией, приобретенной электроном при прохождении разности потенциалов, равной 1 в. Эта единица обозначается 1 электрон-вольт (1 эв). Подчеркнем, что вольт — единица разности потенциалов, а электрон-вольт — единица энергии. Заряд электрона равен $-1,6 \cdot 10^{-19}$ к; 1 электрон-вольт поэтому равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ дж. Если работу выхода W выражать в электрон-вольтах, то постоянная A будет иметь численное значение $1,24 \cdot 10^{-6}$ м · эв.

§ 430. Фотоны. В 1905 г. А. Эйнштейн проанализировал известные к тому времени закономерности фотоэффекта и пришел к выводу, что для их объяснения необходимо предположить наличие у света не только волновых свойств, но и свойств потока частиц. Эти частицы получили наименование «фотонов». Раньше часто применялся термин «кванты света», в связи с чем теория атомных явлений получила название «квантовая теория». Каждый фотон обладает определенной энергией, которая зависит от длины волны, или частоты электромагнитного излучения. Число фотонов зависит от интенсивности излучения. Зависимость энергии фотона от частоты Эйнштейн заимствовал из опубликованной пятью годами ранее работы выдающегося немецкого физика Макса Планка, который вместе с Эйнштейном и датским физиком Нильсом Бором является основоположником квантовой теории.

Формула Планка для порции энергии E , которая поглощается или испускается при взаимодействии излучения с веществом (Планк исследовал тепловое излучение тел)

$$E = h\nu.$$

Здесь ν — частота электромагнитных колебаний.

h — постоянная величина, получившая название постоянной Планка и равная $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ дж · сек.

Предположение о поглощении энергии при фотоэффекте порциями, равными энергии одного фотона, объясняло существование предельной длины волны (закон Столетова).

Выразим частоту света через его длину волны, $\nu = \frac{c}{\lambda}$, где c — скорость света. Имеем порцию энергии, сообщаемую одному электрону.

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{A}{\lambda},$$

где

$$A = hc = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 = 2 \cdot 10^{-25} \text{ дж} \cdot \text{м}.$$

Если величина $E = \frac{A}{\lambda}$ меньше, чем работа выхода электрона W , то фотоэффект невозможен при любой интенсивности падающего света (закон Столетова). Если E больше W , то при выходе из металла энергия электрона уменьшается на величину W . В результате кинетическая энергия электрона оказывается равной

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{A}{\lambda} - W = h\nu - W.$$

Это — знаменитая формула Эйнштейна. Она хорошо подтверждается на опыте.

Согласно Эйнштейну при распространении электромагнитного излучения в пустоте мы можем рассматривать его как поток летящих по инерции частиц (фотонов), каждая из которых обладает энергией $E = h\nu$ и скоростью, равной $c = 3 \cdot 10^8$ м/сек. Когда освещенность какой-либо поверхности увеличивается (например, из-за приближения источника света), число фотонов, падающих за секунду на эту поверхность, увеличивается, но энергия каждого из них остается прежней $E = h\nu$.

До разработки электромагнитной («волновой») теории света ряд ученых (в том числе И. Ньютон) считали свет потоком частиц. Эти представления хорошо объясняли прямолинейное распространение света (как движение по инерции) и некоторые другие явления, но были оставлены в XIX веке, так как не могли объяснить явлений дифракции и интерференции световых волн. В XX веке выяснилось, однако, что для полного описания свойств света необходимо учитывать и волновые явления, и наличие фотонов. Такое сочетание внешне противоречивых свойств потребовало глубокого пересмотра основ теории. Развитие представлений о природе света и строении атома (описанное в следующей главе) шло параллельно и завершилось созданием новой физической теории — квантовой теории.

Формула $E = \frac{A}{\lambda}$ показывает, что энергия фотонов обратно пропорциональна длине волны. Например, желтый свет, излучаемый

парами натрия ($\lambda = 5,9 \cdot 10^8 \text{ \AA} = 5,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}$, § 409), состоит из фотонов, каждый из которых имеет энергию

$$E = \frac{6,62 \cdot 10^{-24} \cdot 3 \cdot 10^8}{5,9 \cdot 10^{-7}} \left[\frac{\text{дж} \cdot \text{сек} \cdot \text{м}}{\text{сек} \cdot \text{м}} \right] = 3,4 \cdot 10^{-19} \text{ дж} = 2,1 \text{ эв}.$$

Красный или инфракрасный свет состоит из фотонов меньшей энергии, а ультрафиолетовый свет или, тем более, рентгеновские лучи состоят из фотонов большей энергии. Напомним, что длины волн рентгеновских лучей в тысячи и десятки тысяч раз меньше длин волн видимого света. Во столько же раз больше энергия их фотонов по сравнению с энергией фотонов видимого света.

Фотонная теория света объясняет более сильное химическое действие коротких световых волн (§ 419). В случае более длинных световых волн энергия фотона может оказаться недостаточной для той или иной химической реакции (например, для создания скрытого фотографического изображения).

Фотонная теория объясняет также увеличение длины волны света при люминесценции (§ 420). При люминесценции часть энергии фотона переходит в энергию теплового движения люминесцирующего тела. Величина $\frac{A}{\lambda}$ уменьшается, а λ увеличивается.

У п р а ж н е н и я

535. а) Выразите в электронвольтах энергию фотона с длиной волны 10^{-2} \AA (жесткие рентгеновские лучи).

б) Какова длина волны фотона с энергией $3,1 \text{ эв}$?

536. Будет ли иметь место фотоэффект при освещении меди видимым светом (400—700 мкм), если работа выхода электронов из меди равна $4,8 \text{ эв}$?

§ 431. Применения фотоэффекта в технике. Фотоэлементы находят все более широкое применение в промышленности и на транспорте, заменяя в разнообразных автоматических, управляющих и контрольных устройствах глаз человека. Например, на многих станках опасная зона ограждена световыми лучами. Пересечение рукой рабочего одного из лучей вызывает выключение фотоэлемента, что приводит посредством несложной электронной схемы к остановке станка; другие примеры — использование фотоэлементов в устройствах для счета числа изделий готовой продукции, для контроля качества обработки поверхностей изделий или для контроля качества окраски тканей. На транспорте фотоэлементы используются для регистрации вагонов на сортировочных «горках» и для обеспечения безопасности движения.

Типичное применение фотоэлементов — звуковое кино. На кинопленте рядом с кадрами расположена так называемая звуковая дорожка, на которой звук записан в виде чередующихся светлых и темных полосок. При движении звуковой дорожки поперек

светового луча интенсивность света меняется, что вызывает колебания фототока в фотоэлементе, и после усиления переменный по силе ток поступает в динамик (схема на рис. 588).

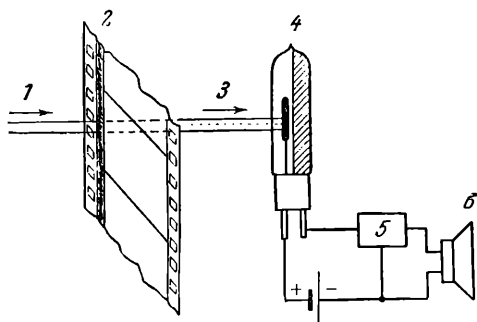


Рис. 588. Схема воспроизведения звука в кино: 1 — световой луч, 2 — звуковая дорожка, 3 — световой луч переменной интенсивности, 4 — фотоэлемент, 5 — усилитель, 6 — динамик.

Явление фотоэффекта лежит в основе устройства передающих трубок телевидения, применяемых в телекамерах на телестудиях для превращения оптического изображения в электрический

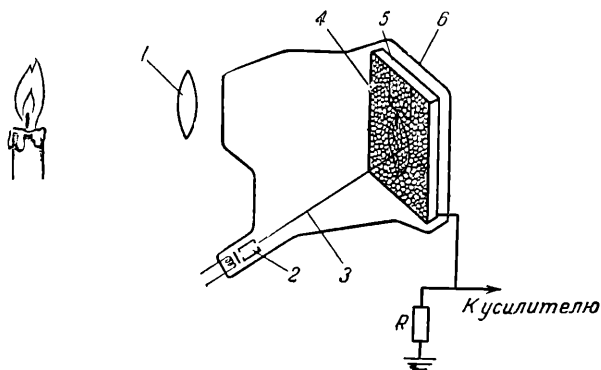


Рис. 589. Упрощенная схема работы передающей телевизионной трубки: 1 — объектив, 2 — электронный прожектор, 3 — электронный луч, 4 — мозаика, 5 — слюда, 6 — основание фотокатада.

сигнал. Схема такой трубки изображена на рис. 589. Свет, отраженный от расположенного перед телекамерой предмета, пройдя через объектив 1, фокусируется на светочувствительном мозаичном фотокатоде 4, образуя действительное изображение предмета.

Фотокатод состоит из трех слоев: металлического основания δ , тонкого изолирующего слоя и нанесенного на него «мозаичного» слоя, состоящего из мелких металлических чешуек (серебро, покрытое цезием). В тех местах мозаичного фотокатода, на которые приходится изображение ярких мест предмета, возникает фотоэффект. Электроны вылетают из «чешуек», оставляя их положительно заряженными. На основании катода δ возникает наведенный отрицательный заряд. Принято говорить, что изображение «запоминается». В передающей трубке имеется, далее, специальное устройство, в котором формируется электронный луч — электронный прожектор 2.

Электронный прожектор состоит из накаливаемого источника электронов, устройств, обеспечивающих остроту фокусировки электронного луча, и так называемых отклоняющих катушек. Отклоняющие катушки (не показанные на схеме) создают меняющееся поперечное магнитное поле, которое заставляет электронный луч совершать по поверхности фотокатода движение, схематически изображенное на рис. 590. Луч как бы последовательно обходит (за период, равный $\frac{1}{50}$ сек) все точки фотокатода. При этом разряжаются те чешуйки, которые ранее под действием света приобрели положительный заряд, и освобождается заряд, наведенный на основание фотокатода. В результате в те моменты, когда луч проходит по заряженным чешуйкам, во внешней цепи протекает ток. Этот ток усиливается электронными лампами и периодически изменяет амплитуду несущей радиоволны телевизионного передатчика (аналогично тому, как это имеет место при передаче по радио звуковых сигналов, см. § 364).

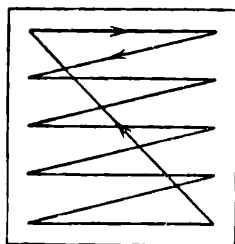


Рис. 590. Схема движения луча в передающей и приемной трубках телевидения.

Радиосигнал принимается антенной телевизионного приемника и после усиления используется для изменения силы электронного луча в приемной телевизионной трубке — «кинескопе». Луч в кинескопе описывает такую же фигуру, как луч в передающей трубке. При этом он обходит различные точки светящегося экрана. Максимальная яркость свечения экрана обеспечивается в тех точках, которые соответствуют ярко освещенным точкам фотокатода. Так осуществляется передача изображения по радио — телевидение. В изобретении телевидения большую роль сыграли русские и советские ученые и изобретатели. Телевидение находит применение не только в быту, но и в промышленности (контроль за вредными и опасными производствами), в военном деле и в научных исследованиях.

В 1959 г. в Советском Союзе была впервые осуществлена телевизионная передача фотографии изображения обратной стороны Луны (рис. 591, а).

Наряду с вакуумными фотоэлементами в технике широкое применение получают полупроводниковые фотоэлементы, в которых электроны под действием света совершают переход из области с дырочной проводимостью в область с электронной проводимостью. Мы уже упоминали об этих приборах в главе о полупроводниках.

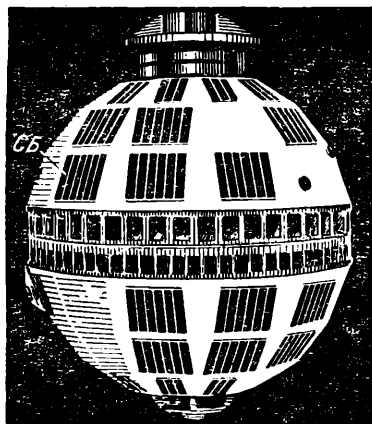
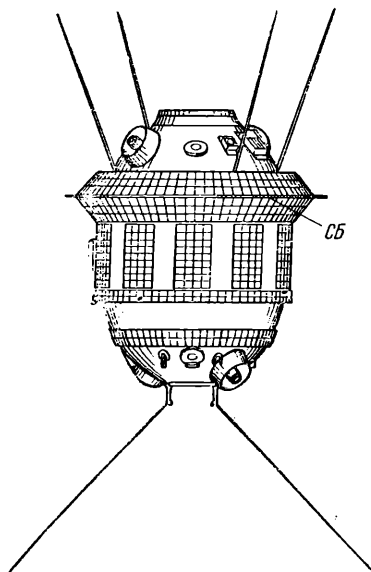


Рис. 591. Автоматическая межпланетная станция (запущена в СССР 4/X 1959 г.), с помощью которой получены и переданы на Землю фотографии обратной стороны Луны (слева). Спутник «Телестар» (запущен в США 10/VII 1962 г.) для передачи телевизионных программ (справа). СБ — солнечные батареи полупроводниковых фотоэлементов.

На рис. 591, б изображены полупроводниковые солнечные фотоэлементы, установленные на искусственном спутнике Земли, служащем для передачи (с усилением сигнала в 10 млн. раз) телевизионных программ с одного континента на другой. Полупроводниковые фотоэлементы питают электроэнергией приемник и передатчик этого и многих других советских и американских спутников.

§ 432. Давление света. Английский физик Максвелл, исходя из представления о свете как об электромагнитных волнах, пришел к заключению, что свет должен оказывать давление на тела, на которые он падает. Это «давление света» связано с тем, что по поверхности поглощающего (или отражающего) свет тела текут быстроперемennые электрические токи, на которые воздействует электромагнитное поле света. Вычисленная Максвеллом величина светового давления очень мала. При мощности поглощенного света в $W = 1$ ватт воз-

никает сила, равная $F = \frac{W}{c}$ (где c — скорость света), т. е. $\frac{1}{3 \cdot 10^8} = 3,3 \cdot 10^{-9}$ н. Величину давления, как всегда, получаем делением силы на площадь. Если мощность в 1 ватт приходится на 1 м^2 , то давление составит $3,3 \cdot 10^{-9} \text{ н/м}^2$. Однако в 1900 г. П. Н. Лебедеву все же удалось измерить на опыте такое ничтожно малое давление и подтвердить теорию Максвелла.

Основной деталью прибора Лебедева были подвешенные на тонкой нити из кварца легкие крылышки, которые поворачивались под действием давления света электрической дуги. Зеркальце, укрепленное на той же нити, служило для регистрации поворота крылышек и отсчета угла по отклонению «зайчика». Опыт проводился в откачанном сосуде. Лебедеву пришлось преодолеть очень большие трудности для исключения влияния на результаты опыта помех, обусловленных конвективными потоками, образованными остатками воздуха при нагреве крылышек поглощенным светом. Впоследствии П. Н. Лебедев произвел еще более тонкие опыты по определению светового давления на газы.

Световое давление играет важную роль при очень высоких температурах или при очень малых плотностях вещества. Его необходимо учитывать во многих астрофизических теориях.

Явление светового давления может быть очень наглядно истолковано с точки зрения представления о фотонах. Каждому фотону необходимо приписать не только определенную энергию $E = h\nu$, но и определенный импульс (количество движения), численно равный $\frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$. Импульс — векторная величина. Импульс фотона направлен по направлению распространения света. Пусть на поглощающую поверхность падают за 1 сек n фотонов, каждый из которых обладает энергией E и импульсом $\frac{E}{c}$. Полная поглощенная энергия составит $W = nE$, а полный переданный импульс $F = \frac{nE}{c}$. Переданный телу за единицу времени импульс есть не что иное, как сила давления, а энергия, поглощенная в единицу времени, — мощность. Мы воспроизвели формулу Максвелла

$$F = \frac{W}{c}.$$

§ 433. Соотношение Эйнштейна $m = \frac{E}{c^2}$. Эйнштейн указал, что наличие явления светового давления приведет к парадоксам (кажущимся противоречиям), если при этом не ввести представления о взаимосвязи энергии и массы. Рассмотрим тело A массы M , которое испустило («направо» на рис. 592) фотон с импульсом $k = \frac{E}{c}$. По закону сохранения импульса тело A начинает двигаться «налево». Центр тяжести системы двух тел ($A + \text{фотон}$) будет оставаться на месте (как это должно быть при отсутствии внешних сил), только если мы

припишем фотону некоторую массу m . Эйнштейн показал, что необходимо сохранить в теории обычную формулу:

$$\text{импульс} = \text{масса} \times \text{скорость.}$$

В нашем случае импульс $k = \frac{E}{c}$, скорость равна c , отсюда масса фотона

$$m = \frac{k}{c} = \frac{E}{c^2}.$$

В момент испускания (или поглощения) фотона суммарная масса тела A и фотона не может измениться (это тоже привело бы к противоречиям, например к скачкообразному смещению центра тяжести в системе $A + \text{фотон} + \text{какое-либо третье тело}$). Поэтому при изменении энергии тела A на величину E его масса M изменится на величину $\frac{E}{c^2}$, Эйнштейн доказал, что это соотношение выражает общий закон природы, который мы запишем в виде формулы

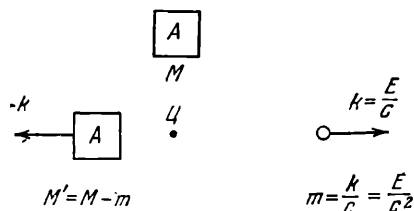
$$M' = M + \frac{E}{c^2},$$

M' — измененная масса.

Из закона Эйнштейна следует зависимость массы тел от их скорости (благодаря чему, в частности, скорость любого тела не может превысить скорости света c).

Рис. 592. К выводу соотношения $m = \frac{E}{c^2}$.

ζ — центр тяжести.



Характерной для каждого тела величиной является значение массы, соответствующее малым (по сравнению с c) скоростям. Эта величина есть мера инертности тела при малых скоростях; в частности, именно она входит в формулу второго закона Ньютона. Ее называют иногда «масса покоя» (в тех случаях, когда ее надо отличить от «полной массы»).

Покоящихся фотонов не бывает. Фотон всегда движется со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/сек, недоступной для тел, обладающих массой покоя. Энергия фотона может быть сколь угодно мала (при больших длинах волн). По этим причинам считают, что масса покоя фотона равна нулю.

Формула Эйнштейна $M' = M + \frac{E}{c^2}$ относится как к тому случаю, когда энергия тела меняется из-за изменения его скорости (при этом масса покоя по определению не изменяется), так и к случаю изменения внутренней энергии тела без изменения его скорости. В этом случае масса покоя тела, конечно, изменяется.

РАЗДЕЛ V

СТРОЕНИЕ АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА

ГЛАВА XXXIX

СТРОЕНИЕ ОБОЛОЧЕК АТОМА

§ 434. Основные этапы познания строения вещества. Поразительные достижения физики и все возрастающая помощь, которую она оказывает и смежным наукам, и всем отраслям техники, и медицине, и агрономии, в значительной мере связаны с успехами в выяснении строения вещества. Можно наметить три этапа развития учения о строении вещества.

Первый этап, относящийся в основном к XIX веку: развитие представлений о молекулярном строении газов, твердых тел и жидкостей. Мы познакомились с этими представлениями в разделе II.

Второй этап, относящийся в основном к первым десятилетиям XX века: развитие представлений о строении атомов. Предварительные сведения по этому вопросу были даны в § 215, более подробно он рассматривается в этой главе.

Третий этап, охватывающий последние 30—40 лет: развитие представлений о строении ядер атомов. Эти сведения излагаются в следующей главе.

В XX веке многие представления, казавшиеся незыблемо установленными предыдущим развитием физики, подверглись коренному пересмотру и были уточнены и дополнены. Система представлений и законов механики Галилея — Ньютона, «классическая физика», лежавшая в основе всей физики XVIII—XIX веков, оказалась приближенным частным случаем более общих законов природы.

В механике Ньютона скорость движения любого тела может быть сколь угодно велика. В 1905 г. Эйнштейн установил, что скорость любого физического тела при возрастании кинетической энергии не возрастает неограниченно, а стремится к определенному пределу, равному $c = 3 \cdot 10^8$ м/сек (скорость света в вакууме). Существование такой «универсальной» предельной скорости находится в противоречии с обычным законом векторного сложения скоростей и делает необходимым пересмотр некоторых представлений о свойствах пространства и времени при скоростях движения тел, близких к

скорости света. Разработанная Эйнштейном теория известна под названием «теории относительности». При больших скоростях движения тел законы механики Галилея — Ньютона должны быть заменены более общими законами теории относительности.

Еще более глубокий пересмотр основных представлений механического описания природы, приведший к понятиям и законам так называемой квантовой теории, оказался необходимым при изучении движения атомов и их составных частей. Даже само существование атомов (почему электрон не падает на атомное ядро?) не могло быть объяснено в рамках «классической» физики.

Эти революционные перевороты в науке связаны с именами великих физиков XX века: Альберта Эйнштейна, Макса Планка, Нильса Бора и их многочисленных последователей во всех странах.

Такой ход развития науки представляется естественным, является доказательством правильности диалектического материалистического миропонимания. На это указал еще в 1908 г. В. И. Ленин в своей классической книге «Материализм и эмпириокритицизм». В это время пересмотр основных представлений физики еще только начинался. Тем более изумительна прозорливость, с которой Ленин оценивал значение новых представлений. Приведем его слова: «Диалектический материализм настаивает на приблизительном, относительном характере всякого научного положения о свойствах материи» и далее: «...как ни необычно ограничение механических законов движения одной только областью природы и подчинение их более глубоким законам электромагнитных явлений и т. д. — все это только лишнее подтверждение диалектического материализма*»).

§ 435. Свойства электронов. Прежде чем перейти к рассмотрению строения атомов и их ядер, укажем следующее. Мы часто будем изображать атомные частицы, например электроны, кружками. Это не значит, конечно, что электрон имеет форму шара. Вопросы о форме электронов и других частиц мы вообще не будем обсуждать. Отметим лишь, что понятия формы тела, положения и движения его в пространстве и др. выработались у людей в результате их повседневного опыта, т. е. на основании наблюдений над сравнительно большими телами. Подходя к вопросам строения атомов, нельзя быть заранее уверенным в том, что понятия, полученные в результате наблюдений над телами, состоящими из огромного числа мельчайших частиц, окажутся применимыми и к самим этим частицам.

В § 215 мы указывали, что атомы состоят из центрального ядра и движущихся вокруг него электронов. В следующей главе мы познакомимся с опытами Резерфорда, которые послужили первым экспериментальным основанием этого представления.

*) В. И. Ленин, Соч., т. 14, стр. 248.

Мы указали также, что электроны во всех атомах одинаковы, в частности по своему заряду и массе. Различные способы определения заряда электрона дали величину заряда, близкую к $1,6 \times 10^{-19}$ к. Наблюдать меньшие заряды не удавалось никогда. Поэтому в настоящее время считают заряд, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ к, элементарным зарядом. Всякий заряд равен целому числу элементарных зарядов. Это стносится как к положительным, так и к отрицательным зарядам. Далее оказалось, что все электроны имеют одну и ту же массу $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, которая приблизительно в 1837 раз меньше массы атома водорода.

§ 436. Электронные оболочки атомов. Как было указано в § 215, заряд ядра в атомах различных химических элементов различен и связан с положением элемента в известной из курса химии периодической системе Менделеева. В нейтральных (т. е. незаряженных) атомах положительный заряд ядра равен сумме отрицательных зарядов всех электронов, образующих оболочку атома.

Атом водорода имеет один электрон, и соответственно заряд его ядра равен $+1,6 \cdot 10^{-19}$ к. Атом гелия имеет два электрона, и заряд его ядра равен $3,2 \cdot 10^{-19}$ к. Далее идут атомы с тремя, четырьмя и т. д. электронами и соответствующими зарядами ядер. Например, атом серы имеет 16 электронов, и заряд его ядра равен $16 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ к = $25,6 \cdot 10^{-19}$ к. Таким образом, порядковый номер элемента в таблице Менделеева Z равен числу электронов в оболочке его атомов (имеется в виду нейтральный атом) или заряду ядра, выраженному в единицах, равных элементарному заряду.

Таблица Менделеева показывает, что химические свойства элементов определяются числом электронов в нейтральном атоме; при этом химические свойства при увеличении числа электронов изменяются периодически, т. е. повторяясь через определенное число номеров (сначала через 8 номеров, затем через 18 номеров, затем через 32 номера).

§ 437. Постулаты Бора. Уровни энергии в атоме. В 1911 г. Э. Резерфорд сформулировал представление об электронной оболочке атомов. Одним из самых непонятных вопросов в то время являлся вопрос о причинах стабильности (устойчивости) атома (например, атома водорода). Согласно механике Ньютона орбита *) электрона, обращающегося вокруг ядра, может проходить на любом расстоянии от атомного ядра.

Электрон, вращаясь по орбите, должен непрерывно излучать электромагнитные волны (как всякое колеблющееся заряженное тело). При этом энергия электрона уменьшается и он, двигаясь по спирали (подобно искусственному спутнику Земли, тормозящемуся

*) По аналогии с движением планет орбитами называют траектории электронов внутри атомов.

в атмосфере), в конце концов падает на ядро. В действительности эта «страшная» картина не имеет места, атомы существуют миллиарды лет без каких-либо изменений. Но объяснить стабильность атомов в рамках имевшихся представлений не удавалось.

В 1913 г. датский физик Нильс Бор выдвинул (первоначально без доказательства, в качестве гипотезы) следующие положения («постулаты Бора»):

1. Для каждого атома возможными («допустимыми») являются не любые орбиты электронов, а только некоторые.

Каждой орбите электрона соответствует определенная энергия, тем большая, чем больше расстояние электрона от ядра. Таким образом, *система из ядра и электронов, составляющая атом, может обладать не любой энергией, а только некоторыми определенными значениями энергии. Эти значения энергии называются «уровни энергии».* Каждый вид атомов обладает своей совокупностью уровней энергии.

2. Каждому атому свойственно поглощать и отдавать энергию определенными порциями, равными разности его уровней энергии.

В ходе дальнейшего развития теории атома эти постулаты Бора были подтверждены и уточнены. Главным в них оказалось представление об уровнях энергии. Это представление никак не может быть согласовано с механикой Ньютона, допускающей любые положения и энергии электронов в атоме. Вместе с тем принятие этого постулата немедленно объясняет устойчивость атома. Среди уровней энергии существует самый низкий, т. е. с самой малой энергией. В этом состоянии атом может находиться неопределенно долго. Это — так называемое «основное» или «нормальное» состояние. Только приток энергии извне переводит атом из основного состояния в «возбужденное», которому соответствует более высокий уровень энергии.

На рис. 593 схематически изображено положение некоторых электронных орбит в атоме водорода и приведена схема соответствующих им уровней энергии. На этой схеме на вертикально расположенной числовой прямой отложены различные возможные значения энергии электрона в атоме водорода. За нуль энергии принята энергия свободного покоящегося электрона. Электрон, обращающийся вокруг атомного ядра (связанный), при этом выборе нуля имеет отрицательную энергию, так как только сообщение ему некоторой энергии делает его свободным. Энергии связанных электронов по первому постулату Бора не являются произвольными. Фактически основное состояние в атоме водорода имеет энергию $E_0 = -13,6$ эв. Возбужденные уровни имеют энергии:

$$E_1 = -3,4 \text{ эв}; \quad E_2 = -1,51 \text{ эв}; \quad E_3 = -0,85 \text{ эв} \text{ и т. д.}$$

Положения этих уровней на числовой прямой на рис. 593 обозначены черточками. Свободные электроны имеют произвольную

положительную энергию $\frac{mv^2}{2}$ и не имеют уровней, что изображено штриховкой. Заметим, что изображение электронных орбит в виде кругов носит несколько условный характер.

Атом, в котором один из электронов перешел на более удаленную орбиту, становится возбужденным. Степень возбуждения атома может быть различной, так как атомных уровней много. Наиболее

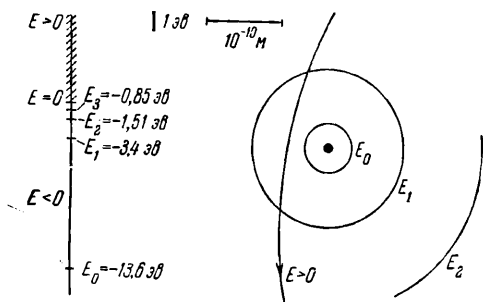


Рис. 593. Уровни энергии и орбиты в атоме водорода.

высокий уровень энергии соответствует полному удалению электрона из атома, т. е. ионизации атома. При поглощении еще большей энергии могут быть удалены из атома два, три и более электронов (многократная ионизация).

Поскольку в каждом атоме возможны только некоторые определенные орбиты электронов, соответствующие определенным уровням энергии, атом при возбуждении может поглотить не любое количество энергии, а только такие ее порции, которые соответствуют разностям между уровнями энергии. При ионизации сообщаемая энергия не может быть меньше определенной величины $|E_0|$, соответствующей переходу из основного состояния в свободное состояние; избыток энергии переходит в кинетическую энергию электрона.

Экспериментальная проверка этих фактов при ионизации и возбуждении атомов ударами ускоренных электронов явилась важным подтверждением гипотез Бора.

Развитие идей Н. Бора, М. Планка, А. Эйнштейна и других выдающихся ученых привело к созданию в 1924—1928 гг. системы совершенно новых научных представлений и законов — к так называемой квантовой механике.

Квантовая механика теоретически обосновала гипотезу Бора об уровнях энергии и тем самым дала возможность объяснить наблюдаемые на опыте основные свойства атомных частиц, атомов и построенных из атомов сложных систем (молекул, твердых и жидких тел и т. д.).

У п р а ж н е н и я

(Использовать численные данные для атома водорода:

$$E_0 = -13,6 \text{ эв}; E_1 = -3,4 \text{ эв}; E_2 = -1,51 \text{ эв}; E_3 = -0,85 \text{ эв}.)$$

537. Какие возбужденные состояния могут возникнуть при столкновении электрона, имеющего энергию 12,6 эв, с атомом водорода? Найти энергию электрона после столкновения с атомом в этих случаях.

538. Атом водорода ионизован столкновением с электроном с энергией 20 эв. Определить суммарную кинетическую энергию двух получившихся свободных электронов.

§ 438. Химические свойства элементов. Распределение электронов многоэлектронных атомов по орбитам объясняет химические свойства элементов.

Наименьшей энергии системы электрон — ядро соответствуют две наиболее близкие к ядру орбиты электронов. Если электронов

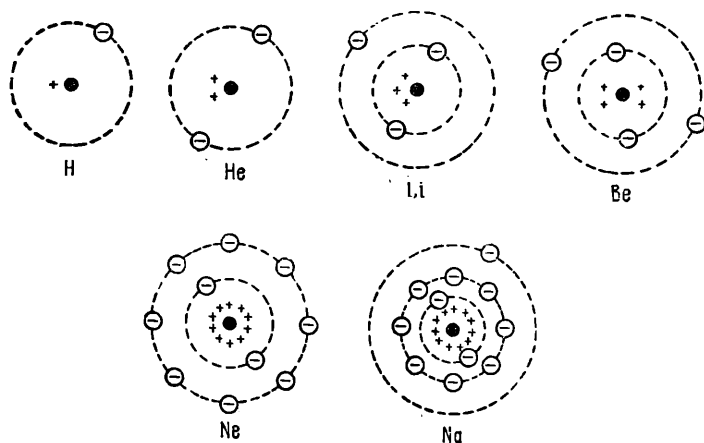


Рис. 594. Схемы строения атомов водорода (H), гелия (He), лития (Li), бериллия (Be), неона (Ne) и натрия (Na).

Схемы показывают только порядок расположения электронных оболочек атомов. Электроны оболочек показаны условно шариками на окружностях.

в атоме один или два (водород или гелий), то они в атоме, находящемся в основном состоянии, занимают эти уровни (рис. 594). Следующие по порядку Z атомы отличаются от атомов водорода и гелия наличием второго слоя электронов, содержащего от одного до восьми электронов. У атома лития три электрона; два из них находятся в первом слое, а один — во втором. В атомах бериллия, бора и т. д., кончая неонам, второй слой все более и более заполнен. У следующего за неонам по порядку расположения в периодической системе элемента натрия (Na^{11}) имеются два заполненных первых слоя и еще один электрон в третьем слое. Химические свойства элементов

оказываются связанными со степенью заполнения у данного элемента наружного слоя электронов. Если этот слой заполнен целиком, элемент является инертным (гелий, неон и т. д.). Если в наружном слое только один электрон, элемент является щелочным металлом; единственный его наружный электрон легко отделяется от атома; при этом возникает положительно заряженный ион (Li^+ , Na^+ и т. д.).

Если в атоме наружный слой не заполнен до конца и для его заполнения требуется один или два электрона, то атом обладает свойством легко образовывать отрицательный ион, присоединяя к себе лишние электроны (F^- , Cl^- и т. д.).

§ 439. Излучение света атомами. Важным подтверждением постулатов Бора явились явления поглощения и испускания света в газах; исторически именно эти явления легли в основу идей Бора.

Возбужденный атом обладает избыточной энергией по сравнению с основным состоянием. Как и всякая система, атом стремится перейти в состояние, соответствующее минимуму энергии. Поэтому через некоторое время после возбуждения (обычно весьма короткое) атом возвращается в основное состояние, отдав каким-либо образом излишек энергии, например излучив его в виде электромагнитных волн. При этом излучается определенная порция энергии, равная разности энергий возбужденного и основного уровней $E = E_1 - E_0$. В ходе дальнейших рассуждений Н. Бор использует идею Эйнштейна о «фотонной» природе света и формулу Планка о связи частоты и энергии (см. гл. ХХІХ). Энергия $E = E_1 - E_0$ излучается возбужденным атомом в виде одного фотона с частотой $\nu = \frac{E}{h} = \frac{E_1 - E_0}{h}$.

Так как при возбуждении атомов возможны переходы между разными уровнями, то полный спектр излучения может состоять из нескольких линий.

Теория Бора объяснила таким образом явление линейчатых спектров испускания светящихся газов (состоящих, как было рассказано в § 426, из нескольких тонких цветных линий, соответствующих определенным длинам волн).

Теория Бора объяснила также образование характеристических рентгеновских лучей (см. § 422). Пусть антикатод рентгеновской трубки состоит из атомов вольфрама, для которых энергия связи ближайшего к ядру электрона равна 70 кэв. Если напряжение трубки превышает 70 кэв, то энергия падающих на антикатод электронов достаточна для ионизации с удалением электрона из внутренней оболочки. Возникают ионы вольфрама в возбужденном состоянии. Энергия такого состояния максимальна. Если электрон удалить из более удаленных от ядра оболочек, то энергия состояния будет меньше (для вольфрама энергии связи для более удаленных оболочек близки к 10 и 2 кэв). При удалении самого внешнего электрона энергия иона минимальна — это основное состояние иона. При переходах электронов с более удаленных орбит на более близкие к ядру выделяется энергия, равная разности энергий связи. В случае

вольфрама эти разности равны $60 \text{ кэв} = 70 \text{ кэв} - 10 \text{ кэв}$; $8 \text{ кэв} = 10 \text{ кэв} - 2 \text{ кэв}$ и т. д. В случае более легких атомов эти разности меньше и длины волн возникающего рентгеновского излучения соответственно больше.

Изучение зависимости длины волны характеристического рентгеновского излучения от порядкового номера элементов сыграло важную роль в истории физики при истолковании порядкового номера как заряда ядра.

Существование фотонов означает, что определенные уровни энергии имеются не только у атомов, но и у электромагнитных волн. Основной уровень соответствует отсутствию электромагнитной энергии. Первый возбужденный уровень соответствует тому, что электромагнитное поле приобрело энергию, равную энергии одного фотона. Следующие уровни соответствуют энергии нескольких фотонов.

У п р а ж н е н и я

539. Определить частоты и длины волн, излучаемые при переходах в атоме водорода $E_2 \rightarrow E_0$, $E_2 \rightarrow E_1$, $E_1 \rightarrow E_0$. Обратите внимание на соотношение между тремя частотами.

540. Определить длину волны характеристического излучения вольфрама при переходе между уровнями с разностью энергий 60 кэв .

§ 440. Избирательное поглощение и усиление электромагнитных волн. Спектры твердых тел и жидкостей. Как известно (§§ 424 и 426), свечение разреженных газов имеет спектр, состоящий из отдельных линий, свечение же твердых тел и жидкостей, а также сильно сжатых газов имеет сплошной (непрерывный) спектр. От чего это зависит?

В газах атомы и молекулы находятся достаточно далеко друг от друга. Поэтому уровни энергии в атомах определяются свойствами только самих этих атомов; влияние полей соседних атомов ничтожно и на уровнях не сказывается. Если же атомы и молекулы сближены настолько (жидкости или твердые тела), что влияние электрических и магнитных полей соседних атомов уже заметно, то энергия уровней в каждом атоме определяется также относительным расположением соседних с ним атомов; энергия уровней в каждом атоме при этом своя и изменяется во времени. Это приводит к резкому увеличению числа возможных уровней энергии, а значит, и числа различных излучаемых электромагнитных волн. Соответствующие этим волнам спектральные линии оказываются расположенными настолько густо, что спектр становится сплошным.

При прохождении света со сплошным спектром через холодный разреженный газ, состоящий из молекул или атомов в основном (невозбужденном) состоянии, происходит избирательное поглощение тех длин волн, для которых энергия фотона соответствует разности уровней между основным и каким-либо возбужденным состоянием. Эти же длины волн присутствуют в спектре испускания, если атомы газа перевести в возбужденное состояние (например,

пропуская через газ электрический ток *). Избирательное поглощение часто называют резонансным, имея в виду совпадение частот поглощения и испускания. Спектр поглощения состоит из черных линий на непрерывном фоне; таков спектр Солнца (см. стр. 557).

При прохождении света или радиоволн непрерывного спектра через вещество, в котором большинство атомов находится в возбужденном состоянии («активная среда»), возможен обратный процесс — избирательное усиление соответствующей спектральной линии. Этот эффект был теоретически изучен Эйнштейном в 1919 г. Впервые эффект избирательного усиления (для электромагнитных волн радиочастотного диапазона) был осуществлен в опытах советских ученых Басова и Прохорова и американского ученого Таунса с сотрудниками. Сейчас он находит многочисленные применения в так называемых квантовых усилителях и генераторах света и радиоволн (часто называемых английскими терминами «лазер» и «мазер»).

§ 441. Лазер. На рис. 595 изображена схема квантового генератора светового пучка — лазера на рубине. Р — кристалл рубина. Рубин, известный как драгоценный камень, — кристалл окиси

алюминия Al_2O_3 , в котором часть атомов Al заменена атомами хрома Cr. В настоящее время кристаллы рубина изготовляют искусственно для нужд часовой промышленности. Рубин — не единственно возможный материал для лазеров**). ИЛ — импульсная газосветная лампа, подобная применяемой в фотографиях лампе-вспышке. При замыкании ключа и разряде конденсатора К лампа ярко вспыхивает и, освещая кристалл рубина, приводит большинство атомов хрома в возбужденное состояние (возникает «активная среда»).

Возникающее излучение возбужденных атомов хрома многократно отражается от двух посеребренных (зеркальных) граней кристалла З и ПЗ. При этом происходит процесс избирательного

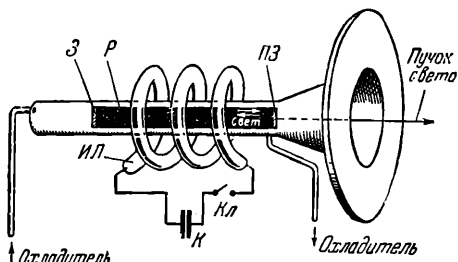


Рис. 595. Схема лазера.

*) В § 427 мы упоминали, что факт соответствия между линиями поглощения и испускания был установлен в 1859 г. Кирхгофом и лежит в основе спектрального анализа.

**) Существуют лазеры, использующие другие кристаллы, а также специальные стекла, полупроводники и газовые смеси. Методы создания активной среды тоже очень разнообразны. В газовых и полупроводниковых лазерах обычно используются электрические методы.

усиления световой волны, имеющей определенную частоту и направление $Z \leftrightarrow PZ$; атомы хрома один за другим переходят в основное состояние, передавая свою энергию световой волне; процесс усиления прекращается (вернее, уравнивается избирательным поглощением), когда число возбужденных атомов хрома сравнивается с числом атомов хрома в основном состоянии. Одна из граней рубина PZ покрыта более тонким полупрозрачным слоем

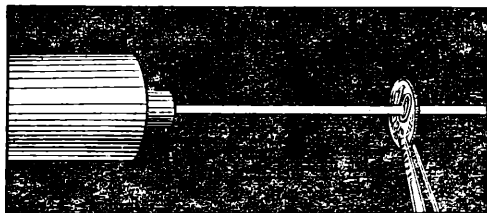


Рис. 596. Луч лазера прожигает монету за $0,5 \cdot 10^{-8}$ сек.

для целей связи, в том числе космической, для ретрансляции телевизионных программ, в дальномерных и локационных системах и т. п.

Лазеры с большой интенсивностью пучка могут быть использованы для разнообразных научных исследований; по сообщениям зарубежной печати они могут быть использованы в военном деле для дистанционного разрушения нагревом. Луч лазера может быть применен для технологических целей (микросварка, микропайка радиосхем и т. п.), для хирургических целей (например, для операций на глазе).

Особенно большие технические возможности связаны с полупроводниковыми лазерами, в которых электрическая энергия с высоким к. п. д. превращается в энергию излучения при переходах электрона с верхнего энергетического уровня на нижний на границе областей с электронной и дырочной проводимостью.

У п р а ж н е н и е

541. Длина волны света, испускаемого атомами Cr в кристалле Al_2O_3 , равна 6943 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$). В кристалле весом 3 г , в котором $0,05\%$ атомов Al заменено атомами Cr , 80% атомов хрома приведено в возбужденное состояние. Продолжительность вспышки равна 10^{-8} сек . Вычислить мощность светового пучка, если 20% световой энергии испускается вне пучка и 30% световой энергии поглощается в зеркалах. Считая, что пучок сфокусирован на площади $0,1 \text{ см}^2$, где устанавливается равновесие с тепловым излучением, определить температуру освещенного пятна.

ГЛАВА XL АТОМНОЕ ЯДРО

§ 442. Радиоактивные превращения. Когда выяснилось, что атомы имеют сложный состав, возник вопрос о строении и свойствах частиц, составляющих атомы. Как уже указывалось, электроны во всех атомах совершенно одинаковы. Принято считать, что электроны — «элементарные частицы». Точного определения этого термина не существует, он употребляется как противоположность термину «сложные (или составные) частицы». Что касается ядер атомов, то ядра различных атомов имеют самые различные заряды и массы. Для известных сейчас ядер заряд Z , измеренный в атомных единицах ($1,6 \cdot 10^{19}$ к), изменяется от 1 до 104, а масса ядер, измеренная в атомных единицах ($1,66 \cdot 10^{27}$ кг), изменяется от 1 до 260. Точное определение атомной единицы массы дается ниже; сейчас же заметим, что она подобрана так, что массы большинства ядер измеряются приблизительно целыми числами. Ядра являются сложными системами. Первым указанием на сложное строение ядра явились радиоактивные превращения.

В 1896 г. французский физик Анри Беккерель заметил, что соли урана испускают неизвестные лучи, проходящие через черную бумагу и некоторые другие непрозрачные вещества. Кроме того, как выяснилось, они ионизируют воздух и оказывают физиологическое действие (длительное облучение ими вызывает язвы).

Вскоре после этого французские физики Мария и Пьер Кюри выделили из урановой руды новый химический элемент — металл радий, действующий гораздо сильнее, чем уран. Впоследствии были найдены многие другие вещества с аналогичными свойствами, получившие название радиоактивных веществ (естественных, в отличие от открытых много позднее искусственных радиоактивных веществ).

Изучение лучей, испускаемых естественными радиоактивными веществами, показало, что существует три рода радиоактивных излучений. Их назвали альфа-лучи, бета-лучи и гамма-лучи. α - и β -лучи отклоняются магнитным полем, причем в разные стороны. β -лучи отклоняются так же, как и катодные лучи, и фактически являются потоком электронов высокой энергии. α -лучи являются

потоком положительно заряженных частиц. γ -лучи не отклоняются магнитным полем.

Частицы, входящие в состав альфа-лучей, получили название альфа-частиц. Английские ученые Резерфорд и Содди обнаружили, что излучение радия связано с появлением в сосуде газа гелия. Постепенно выяснилось, что альфа-частицы есть не что иное, как ядра атомов гелия (атомный вес $A = 4$, заряд $Z = 2$). Альфа-частицы имеют положительный заряд, равный по абсолютной величине двум зарядам электрона. Альфа-частицы вылетают из ядер со скоростями порядка 10^7 м/сек (в 10^4 раз быстрее пули), что соответствует кинетической энергии в несколько мегаэлектрон-вольт*). Теряя свою кинетическую энергию при прохождении через какое-либо вещество (например, воздух), альфа-частицы вызывают его нагрев. Это непрерывное выделение энергии, замеченное вскоре после открытия радиоактивных веществ, сначала казалось противоречащим закону сохранения энергии. Затем стало ясно, что выделение энергии происходит за счет траты энергии, заключенной в атомных ядрах, и сопровождается изменением состава ядра.

Что происходит с ядром радиоактивного вещества (например, радия), выбросившим альфа-частицу? Масса ядра уменьшается на четыре атомные единицы ($A \rightarrow A - 4$), а заряд — на две атомные единицы ($Z \rightarrow Z - 2$) в соответствии с тем, что ядро гелия имеет $A = 4$, $Z = 2$. При этом радий превращается в новый химический элемент — радон (в отличие от металла радия — это инертный газ, тоже радиоактивный). Исследование бета-лучей показало, что они представляют собой поток быстрых электронов (энергия порядка 1 Мэв). При испускании бета-частиц атомный вес ядра практически не изменяется, но испускание отрицательно заряженного электрона сопровождается увеличением положительного заряда ядра ($Z \rightarrow Z + 1$). Это приводит к изменению химических свойств атома. Ядерные превращения, сопровождающиеся выделением альфа-лучей, часто называют альфа-распадом, а превращения с испусканием бета-лучей — бета-распадом.

Впоследствии оказалось, что при бета-распаде из ядра вылетает, кроме электрона, также нейтральная частица, получившая название нейтрино. Поток нейтрино свободно проникает через очень большие толщи вещества, не вступая с ним в заметное взаимодействие. Лишь недавно удалось обнаружить явление поглощения некоторой малой доли потока нейтрино от сильного источника (ядерного реактора): опыт американских ученых Райнса и Коуэна**).

Исследование гамма-лучей показало, что это — электромагнитные волны (фотоны) с очень малой длиной волны, которые сопровождают альфа- и бета-распады, если в результате них получается

*) Мегаэлектрон-вольт (Мэв) — принятая в ядерной физике единица энергии, равная 10^6 эв = $1,6 \cdot 10^{-15}$ дж.

**) Доля нейтрино, поглощенных протонами на пути 1 м в содержащем водород поглотителе, составила менее 10^{-16} .

ядро не в основном, а в возбужденном состоянии. Испускание гамма-лучей ядром вполне аналогично испусканию видимого света электронами электронной оболочки атома и не меняет ни A , ни Z ядра.

В результате последовательных превращений естественных радиоактивных веществ они превращаются в нерадиоактивный свинец. Исходными же элементами являются уран и торий.

Скорость распада каждого радиоактивного вещества характеризуется соответствующим периодом полураспада. Период полураспада есть такой отрезок времени, в течение которого радиоактивное вещество распадается наполовину. За два периода полураспада общее количество радиоактивных ядер уменьшается в 4 раза, за три периода — в 8 раз и т. д. Распад каждого индивидуального ядра наступает «внезапно», по закону случая, независимо от распада соседних ядер, и не проявляется ни в каких предшествующих изменениях ядра. Закономерности радиоактивного распада являются закономерностями случайных процессов, и это очень характерно для физики микромира. Период полураспада радия равен 1600 лет, период полураспада радона — около 4 суток.

Есть вещества с периодом полураспада в миллиарды лет (например, уран и торий) и с периодом полураспада в доли секунды. Естественно, что вещества, распадающиеся быстро, менее распространены в природе, чем вещества, распадающиеся медленно. Относительно больше всего урана и тория (около $10^{-3}\%$ по весу в земной оболочке). Несмотря на малое распространение радиоактивных веществ на Земле, роль их в жизни Земли очень велика. Непрерывное выделение энергии радиоактивными веществами, распределенными в теле Земли, создает и поддерживает высокие температуры в центральных частях земного шара, является причиной многих геологических процессов.

У п р а ж н е н и я

542. Уран имеет атомный вес $A = 238$ и 92 электрона в оболочке; после ряда альфа- и бета-распадов он превращается в свинец, который имеет атомный вес 206 и 82 электрона в оболочке. Какое число альфа- и бета-распадов претерпевает уран, превращаясь в свинец?

543. Через сколько лет от 8 мг радия останется 0,5 мг?

§ 443. Методы изучения атомных частиц. Если в прошлом столетии далеко не все были убеждены, что вещество состоит из отдельных частиц, то теперь это ни у кого не вызывает сомнений. Самым убедительным доказательством этого явилась возможность наблюдать и изучать действие отдельных атомных частиц.

1. Самым старым способом обнаружения атомных частиц является наблюдение сцинтилляций. Сцинтилляциями называются кратковременные точечные вспышки, которые наблюдаются во флуоресцирующих веществах, если в них попадают быстрые частицы.

На рис. 597 показан простой прибор для наблюдения сцинтилляций (спинтарископ). На острие, расположенное внутри металли-

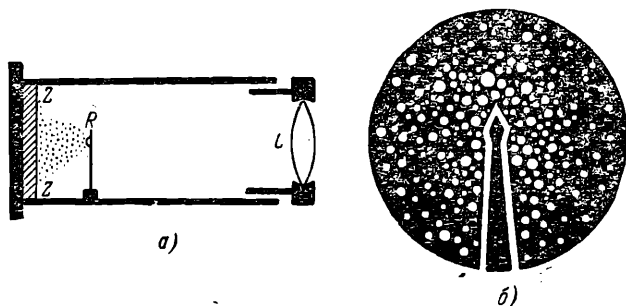


Рис. 597. а) Устройство спинтарископа; б) вспышки света на экране в спинтарископе под ударами альфа-частиц.

ческой трубки, нанесено незначительное количество радиоактивного вещества R . С помощью лупы можно наблюдать сцинтилляции, вызванные на флуоресцирующем экране ZZ альфа-частицами, вылетающими из R .

При выключенном свете хорошо видно, как то в одном, то в другом месте экрана вспыхивают яркие точки, указывающие места ударов отдельных альфа-частиц.

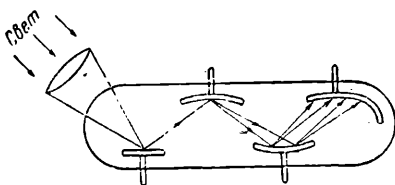


Рис. 598. Схема фотоумножителя.

В современных исследованиях эффект свечения веществ под действием атомных частиц регистрируют не глазом, а с помощью фотоумножителей. Это специальные вакуумные приборы, регистрирующие слабые и быстро меняющиеся потоки света. Основными деталями (рис. 598) являются фотокатод, на котором падающий свет вызывает появление электронов фотоэффекта, и дополнительные электроды, на которых электронный поток усиливается за счет так называемой вторичной электронной эмиссии (выбивание из металла одним первичным электроном нескольких вторичных электронов).

2. В начале XX века английским физиком Вильсоном был изобретен прибор, сделавшийся важным орудием физиков, изучающих атомные процессы, — камера Вильсона. Этот прибор в простейшем осуществлении представляет собой невысокий стеклянный цилиндр (рис. 599), сверху закрытый стеклянной пластинкой MM . На дне камеры помещена черная увлажненная ткань BB , создающая близкую к 100% влажность воздуха в камере. Воздух внутри камеры можно разрезать, например, поршнем P . Быстрое расширение воздуха ведет к его охлаждению; в обычных условиях это вызывает появление тумана. Однако в камере Вильсона этого не происходит,

так как в ней приняты меры к удалению так называемых ядер конденсации. Ядрами конденсации могут служить пылинки, а также ионы, всегда имеющиеся в воздухе. Удалить из воздуха пылинки легко (например, фильтрованием воздуха). Ионы можно удалить, создав электрическое поле между дном камеры *ВВ* и тонким прозрачным слоем металла, нанесенным на прозрачную пластинку *ММ*. Если внутри камеры с пересыщенными водяными парами влетит быстрая атомная частица, например альфа-частица, то она, как мы знаем, вызовет ионизацию молекул на своем пути, оставляя за собой канал, наполненный ионами. При разрежении воздуха на этих ионах образуются

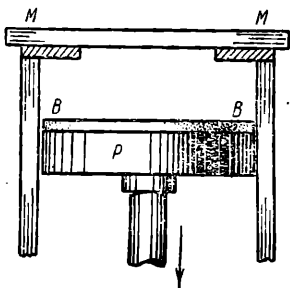


Рис. 599. Схема устройства камеры Вильсона.

Источник тока, создающий электрическое поле между крышкой камеры *ММ* и дном камеры *ВВ*, не показан.



Рис. 600. Фотография треков альфа-частиц в азоте, полученных в камере Вильсона. «Вилки» на концах треков указывают на столкновения альфа-частиц с ядрами азота и на появление ядер кислорода и водорода.

капельки воды, которые делают путь альфа-частицы видимым. Надлежащее освещение делает путь альфа-частицы ясно заметным в виде тонкой белой линии на фоне черной ткани (рис. 600). Эти линии называют следами или треками.

Источники исследуемых быстрых частиц (радиоактивные вещества) иногда вносят внутрь камеры. При помощи камеры исследуют также частицы, влетающие в нее извне.

Одной из новейших разновидностей камеры Вильсона является так называемая «пузырьковая» камера, в которой на пути заряженной атомной частицы образуется ряд пузырьков в перегретой выше точки кипения жидкости (например, в жидком водороде).

3. Появление ионов при пролетании быстрых частиц в газе может быть обнаружено также и по изменению его электропровод-

ности. На этом основано устройство счетчиков быстрых частиц, регистрирующих частицы электрическим методом. Примером такого счетчика является счетчик Гейгера.

На рис. 601 приведена схема двух простейших счетчиков — с острием (Гейгера) и с тонкой нитью (Гейгера — Мюллера). При появлении в газе ионов вблизи острия или проволоочки возникает разряд, нарастающий подобно лавине, а затем затухающий за достаточно короткое время (10^{-4} сек и менее). По сопротивлению R в это

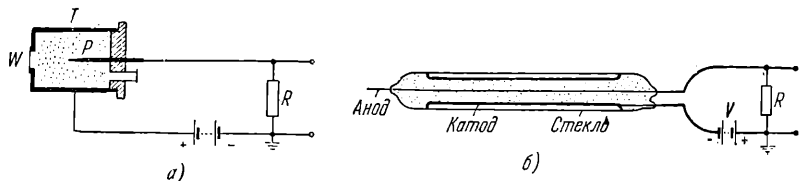


Рис. 601. а) Счетчик Гейгера; б) счетчик Гейгера—Мюллера.

время протекает импульс тока (10^5 — 10^7 электронов), возникающее на R напряжение подается на управляющую сетку входной радиолампы усилителя *).

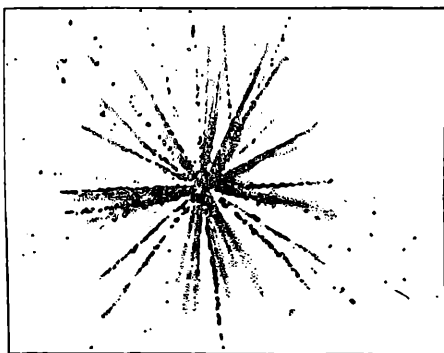


Рис. 602. Следы альфа-частиц в эмульсии фотопластинки (увеличение). Источник альфа-частиц — радиоактивная пылинка из атмосферы.

На выходе усилителя получаем ряд импульсов, которые можно автоматически сосчитать, или (при другой схеме) постоянный ток, пропорциональный числу частиц, попадающих в счетчик в единицу времени.

Электрорегистрация атомных частиц (обычно с использованием радиотехнических усилителей) имеет очень большое практическое значение на атомных предприятиях, при использовании ядерной энергии в мирных целях, при поиске месторождений урана,

в противоатомной защите населения и войск в случае применения противником ядерного оружия и при научных исследованиях.

4. Быстрая частица, двигаясь внутри светочувствительной эмульсии, вызывает такие же изменения зерен галоидного серебра, как и свет. Если фотопластинку с достаточно толстым слоем эмульсии

* Оцените напряжение на входе усилителя, если импульс тока содержит 10^6 электронов, длительность импульса $3 \cdot 10^{-6}$ сек и $R = 3 \cdot 10^7$ ом. (Отв. — 0,16 в.)

подвергнуть облучению быстрыми частицами, то после проявления в эмульсии обнаруживаются следы частиц в виде цепочек из почерневших зерен эмульсии (рис. 602), которые можно рассмотреть, пользуясь микроскопом. (В разработке этого метода большую роль сыграли работы советских ученых Л. В. Мысковского и А. П. Жданова.)

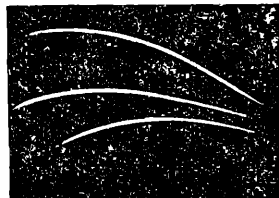


Рис. 603. Треки заряженных частиц, движущихся в магнитном поле.

Одним из способов суждения об энергии и скорости частиц является наблюдение их движения в магнитном поле. Траектории альфа-частиц, а также и других частиц, летящих в магнитном поле, перпендикулярных к плоскости, в которой они движутся, оказываются искривленными (рис. 603). Измеряя радиус окружности, по которой движутся частицы, зная их заряд и массу, а также индукцию B магнитного поля, можно определить их скорость и энергию (§ 286).

В 1936 г. советский ученый П. А. Черенков, работая в лаборатории С. И. Вавилова, обнаружил и изучил новый вид свечения — «черенковское свечение» при пролете быстрых электронов через жидкость. Таинственное голубое свечение, окружающее «плавающий» атомный реактор на Выставке достижений народного хозяйства, в значительной степени является «черенковским». Советские ученые И. Е. Тамм и И. М. Франк показали, что черенковское свечение возникает, когда скорость электрона превышает скорость света в прозрачной среде (тут нет противоречия с теорией относительности, так как скорость света в среде меньше скорости света в вакууме).

В § 137 мы познакомились с образованием ударных волн в воздухе при движении тел со скоростью, превышающей скорость звука. Можно сказать, что излучение Черенкова является аналогом этого газодинамического явления в оптике. Так же как ударная волна в газодинамике, черенковское излучение испускается под определенным углом φ к направлению полета частицы, зависящим от ее скорости v . С помощью принципа Гюйгенса можно показать (мы не будем на этом останавливаться), что

$$\cos \varphi = \frac{c}{nv}$$

(c — скорость света в вакууме, n — коэффициент преломления, v — скорость частицы).

Возможность точного определения v оказалась очень важной во многих исследованиях новых атомных частиц. Наблюдение черенковского свечения обычно производится с помощью фотоумножителей.

§ 444. Опыт Резерфорда с рассеянием альфа-частиц. В основе модели атома Резерфорда лежат его знаменитые исследования по рассеянию альфа-частиц атомами золота. Рассеяние альфа-частиц обусловлено их электростатическим взаимодействием с составными частями атома — электронами и ядром. Изучение этого рассеяния дает возможность определить размеры области, занятой в атоме положительным и отрицательным объемными зарядами.

На рис. 604 показана схема опыта Резерфорда. Поток альфа-частиц радия, прошедший через щели в свинцовом корпусе источника и экрана, попадает на золотую фольгу O .

Большая часть альфа-частиц проходит через фольгу, почти не изменив направления полета по направлению OO' . Остальные

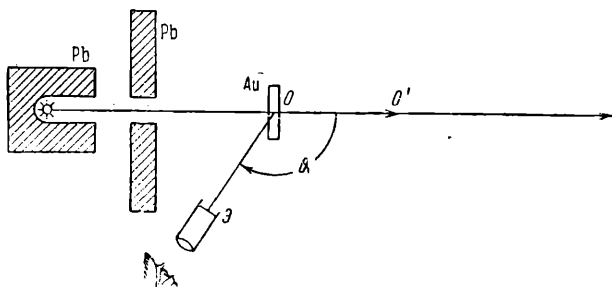


Рис. 604. Схема опыта Резерфорда.

рассеиваются и образуют расходящийся по радиусам пучок. Число рассеянных альфа-частиц в этом пучке, приходящихся на единицу

телесного угла, зависит от «угла рассеяния» $\vartheta = \angle O'OZ$. Нахождение этой зависимости и есть задача опыта. Резерфорд использовал описанную в предыдущем параграфе методику наблюдения и подсчета числа сцинтилляций. Рассеянные альфа-частицы попадают на флуоресцирующий экран и наблюдаются в лупу. Подсчитывается число сцинтилляций на данной площади экрана, расположенной напротив лупы. Меняя относительное расположение лупы и источника (поворачивая лупу или источник вокруг точки O), Резерфорд определил число рассеянных альфа-частиц для разных углов рассеяния. При показанном на

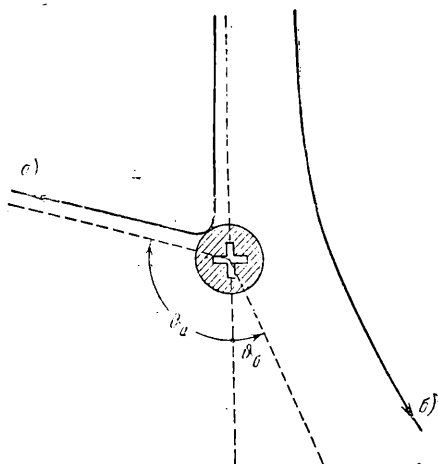


Рис. 605. Рассеяние альфа-частиц на ядре: а) при пролете вблизи ядра; б) при пролете на большом расстоянии от ядра.

рисунке положении лупы регистрируются альфа-частицы, рассеянные на угол $\vartheta = 135^\circ$.

В этих опытах было обнаружено значительное число альфа-частиц, рассеянных на большие углы. Для истолкования этого

результата необходимо рассмотреть процесс рассеяния альфа-частицы ядром при различных предположениях о размере ядра и траектории альфа-частицы (рис. 605). На наибольший угол рассеивается альфа-частица, прошедшая вблизи границы ядра. При этом, чем больше размеры ядра, тем меньше при сохранении заряда ядра этот максимальный угол. Математический анализ результатов опыта привел Резерфорда к его модели атома. Диаметр области, занятой электронами, — это диаметр атома, т. е. примерно 10^{-10} м. Ядро имеет положительный заряд, численно равный суммарному заряду электронов, и очень малые размеры (диаметр около 10^{-14} м). Таким образом, ядро является очень компактным образованием.

В настоящее время тот же по идее метод, что и в опыте Резерфорда, но с использованием вместо альфа-частиц электронов очень большой энергии, ускоренных на гигантских ускорителях, и использованием современных методов регистрации частиц применяется для изучения структуры атомных ядер и структуры атомных частиц (опыты американского ученого Хофстадтера).

§ 445. Космические лучи. Вскоре после открытия радиоактивности было установлено, что у поверхности Земли ионизация воздуха обусловлена излучениями радиоактивных веществ, имеющих в земной коре. Но вслед за тем в начале XX века было открыто, что степень ионизации воздуха в высоких слоях атмосферы больше, чем у поверхности Земли. Очевидно, что в верхних слоях атмосферы ионизация вызывается не радиоактивностью Земли, а какими-то другими причинами. Изучение этого явления привело к выводу, что в атмосферу Земли непрерывно проникают из космического пространства частицы (главным образом протоны, т. е. ядра атома водорода) с колоссальными энергиями — от величин порядка 10^9 — 10^{10} эв (таких большинство) до энергий порядка 10^{11} — 10^{17} эв и даже выше. Столкновения пришедших из космического пространства частиц с молекулами воздуха вызывают появление разного рода новых частиц, которые в свою очередь производят ионизацию воздуха. Сложный поток этих частиц, как первичных, пришедших из космического пространства, так и вторичных, образуемых в верхних слоях атмосферы, получил общее название космических лучей.

§ 446. Машины для получения быстрых атомных частиц. Исследования космических лучей дали и продолжают давать много знаний о строении вещества. Однако большинство исследований с ними может производиться лишь на большой высоте над уровнем моря (в горах или в стратосфере). Кроме того, даже на больших высотах космические лучи обладают очень малой интенсивностью.

Естественно, возникла необходимость в приборах, в которых достаточно мощные потоки быстрых частиц получались бы в лабораторных условиях. Такие приборы были созданы и получили название ускорителей заряженных частиц, так как в них используется принцип ускорения частиц электрическим полем.

Сначала исследователи пошли по пути ускорения частиц в постоянном электрическом поле, созданном электростатической машиной или другим источником постоянного высокого напряжения. Такие машины были разработаны для получения частиц с энергией от нескольких сотен килоэлектрон-вольт ($1 \text{ кэВ} = 10^3 \text{ эВ}$) до нескольких мегаэлектрон-вольт. Частицы с большей энергией получаются в машинах, в которых осуществлено многократное ускорение частиц полем сравнительно невысокого напряжения. Схема одной из таких машин — циклотрона — показана на рис. 606.

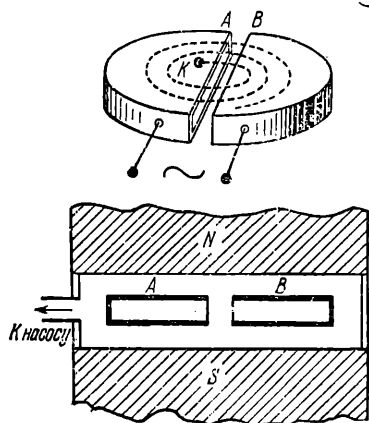


Рис. 606. Схема устройства циклотрона.

Основную часть его представляет низкий металлический цилиндр, разделенный на половины — дуанты A и B. Дуанты присоединяются к источнику переменного напряжения высокой частоты. В полости между дуантами возникает электрическое поле, направление которого меняется через равные промежутки времени. В дуантах создается вакуум, в который вводится ничтожное количество какого-либо газа (например, водорода). Внутри одного из дуантов помещена платиновая проволочка, накаливаемая током (точка K на рисунке). Вылетающие из нее электроны своими ударами ионизируют

водород, образуя ионы водорода — протоны. Дуанты помещены между полюсами электромагнита NS, питаемого постоянным током. В магнитном поле протон движется по дуге окружности. Долетев до места разреза коробки, ион попадает в электрическое поле и под его действием увеличивает свою скорость. Затем он перелетает в другой дуант и здесь движется по дуге окружности несколько большего радиуса (так как скорость его увеличилась). Прибор рассчитан так, что к моменту, когда протон снова подлетит к разрезу между дуантами с другой стороны, направление электрического поля изменится и протон вновь увеличит свою скорость. Совершив переход из одного дуанта в другой много раз, протон (или какой-либо другой ион) приобретает энергию в десятки мегаэлектрон-вольт.

Циклотрон не пригоден для сообщения частицам скорости, близкой к скорости света, так как в этом случае масса частицы, согласно теории относительности, возрастает и ее период обращения оказывается больше периода напряжения, подаваемого на дуанты. Выход из этой трудности был указан в 1944 г. советским физиком В. И. Векслером, который обосновал возможность изменения в процессе ускорения частоты, подаваемой на дуанты, и величины магнитного поля; несколькими месяцами позже аналогичные идеи были высказаны

американским ученым Мак-Милланом. На этих принципах в Советском Союзе построены (наряду с рядом меньших ускорителей) и успешно работают

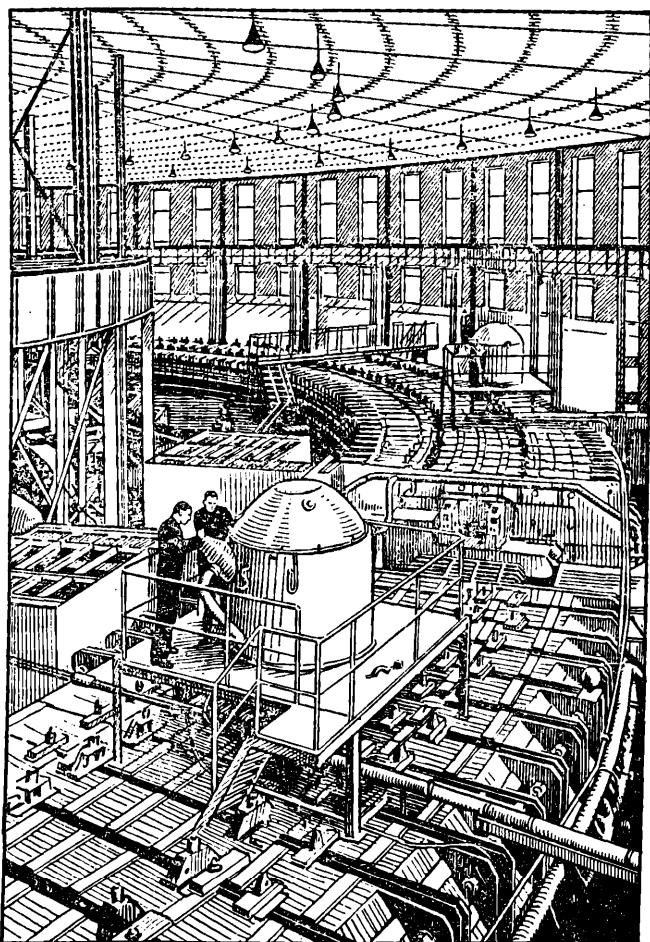


Рис. 607. Ускоритель протонов на 10^{10} эв (показана часть магнита диаметром 60 м и весом 36 тыс. тонн).

ускорители протонов на 10^{10} эв (рис. 607) и на $7 \cdot 10^{10}$ эв. Это гигантские сооружения с длиной орбиты ускоряемых протонов около 200 м и около 1500 м соответственно. В ряде стран ведутся работы по созданию еще более мощных ускорителей.

§ 447. Строение ядер атомов. Массы большинства ядер почти точно кратны массе ядра атома водорода (протона), равной $1,66 \times 10^{-27}$ кг. Масса ядра гелия в четыре раза больше, масса ядра углерода в 12 раз, масса ядра алюминия в 27 раз. Это навело на мысль, что ядра атомов являются сложными и состоят из почти одинаковых по массе частиц. Что это за частицы? Естественно предположить, что одной из таких частиц является ядро атома водорода — протон. Однако ядра не могут состоять из одних протонов. Дело в том, что отношение массы любого ядра к массе протона, приблизительно равное атомному весу A , всегда больше числа протонов в ядре Z . Например, у углерода $A = 12$, $Z = 6$; у алюминия $A = 27$, $Z = 13$.

Положение разъяснилось, когда в 1932 г. английский ученый Чэдвик, исследуя излучение, возникающее при облучении бериллия альфа-частицами, открыл н е й т р о н — частицу с массой, почти точно равной массе протона, но не имеющую электрического заряда («нейтральную»). Отсутствие у нейтрона заряда приводит к тому, что он при своем движении не ионизирует вещество, и беспрепятственно движется в веществе, пока не вступит во взаимодействие с ядрами. Отсутствие электростатического отталкивания нейтронов от ядер приводит к тому, что нейтроны любой энергии легко проникают в ядра и вызывают те или иные ядерные превращения.

Заметим, что другим примером нейтральной атомной частицы является нейтрино, которое тоже легко проникает в ядра, но не вступает с ними при этом во взаимодействие.

После открытия нейтронов стало ясно, что ядра состоят из нейтронов и протонов. Сумма числа протонов и числа нейтронов в ядре называется массовым числом и обозначается большой буквой M . $M = Z + N$, где N есть число нейтронов, а Z — число протонов в ядре (Z — заряд ядра в единицах $1,6 \cdot 10^{-19}$ к, или порядковый номер системы Менделеева).

Число нейтронов в ядре, очевидно, равно $N = M - Z$.

§ 448. Изотопы. Число нейтронов в ядре может быть различным при сохранении числа протонов. Это обстоятельство объясняет существование так называемых изотопов, т. е. атомов различного атомного веса, но одинаковых химических свойств, которые, как мы знаем, определяются числом электронов в электронной оболочке атома, равным числу протонов в ядре. Существование изотопов было обнаружено задолго до открытия нейтрона при изучении движения ионов в магнитном поле. Для точного определения масс ядер по их отклонению в магнитном поле и для изучения изотопного состава элементов разработаны специальные приборы, называемые масс-спектрометрами. На рис. 608 изображена схема одного из типов масс-спектрометров. Пучок ионов исследуемого элемента или смеси элементов входит в область магнитного поля. Более легкие ионы

отклоняются сильнее, чем более тяжелые (при том же заряде иона). После фокусировки пучков в специальных вспомогательных полях на фотопластинке получается ряд полос, соответствующих разным массам ионов.

С помощью масс-спектрометров изучены массы ядер всех элементов. Почти у всех элементов были обнаружены изотопы. Например, у хлора ($Z = 17$) были обнаружены изотопы с массовым числом $M = 37$ ($N = 20$) и с массовым числом $M = 35$ ($N = 18$). Ядер первой разновидности в природной смеси около 25%, а второй — 75%. Эти соотношения находятся в соответствии с определенными химическими методами средним атомным весом хлора, равным $35,5 = \frac{25 \cdot 37 + 75 \cdot 35}{100}$. Атомные веса отдельных изотопов не

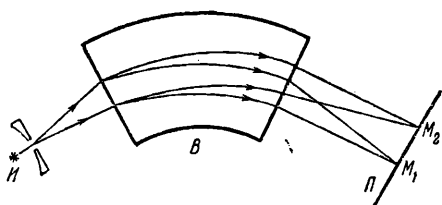


Рис. 608. Схема масс-спектрометра: *И* — источник исследуемых ионов, *В* — область магнитного поля, перпендикулярного плоскости рисунка, M_1M_2 — линии спектра масс на пластинке *П*.

очень тяжелых ядер близки к массовым числам; атомные веса природной смеси изотопов в некоторых случаях, как видно на примере хлора, могут сильно отличаться от целых чисел. У водорода был обнаружен тяжелый изотоп с $M = 2$, получивший название дейтерий. Ядро атома дейтерия (так называемый дейтон) состоит из одного протона и одного нейтрона. Дейтерий в количестве 0,014% присутствует в природной смеси изотопов. Кроме того, был искусственно получен при некоторых ядерных реакциях изотоп водорода с $M = 3$ ($N = 2$), названный тритий. Этот изотоп в природе не встречается, так как он радиоактивен с относительно малым временем полураспада (12 лет).

Все изотопы одного элемента образуют одни и те же химические соединения с другими элементами. Так, например, два атома дейтерия с одним атомом кислорода образуют соединение, называемое тяжелой водой (плотность тяжелой воды равна $1,1 \text{ г/см}^3$, точка замерзания $3,8^\circ \text{С}$). Свойства соединений и простых веществ изотопов других элементов еще меньше зависят от массового числа. Разделение элементов на изотопы вследствие сходства их химических и физических свойств весьма затруднительно, но все же возможно.

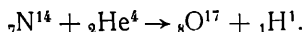
Ядерные свойства изотопов с различным числом нейтронов, напротив, резко отличаются. Поэтому для характеристики ядра необходимо указывать не только его порядковый номер Z , но и, например, массовое число M (тем самым будет известно и число нейтронов $N = M - Z$).

Ядра принято обозначать символом химического элемента с двумя индексами. Цифра, стоящая у буквенного обозначения вверху справа, обозначает число частиц в ядре, т. е. массовое число M , а цифра внизу слева — число протонов в ядре Z (эту цифру иногда не пишут, так как она повторяет то же, что заключается в буквенном символе химического элемента). Примеры: ${}_1\text{H}^1$ — протон, ядро водорода; ${}_1\text{H}^2$ — дейтон, ядро дейтерия, 1 протон + 1 нейтрон; ${}_2\text{He}^4$ — альфа-частица, ядро гелия, 2 протона + 2 нейтрона; ${}_{13}\text{Al}^{27}$ — ядро алюминия, 13 протонов + 14 нейтронов; ${}_{92}\text{U}^{235}$ — ядро легкого изотопа урана, 92 протона + 143 нейтрона (в природной смеси этого изотопа 0,7%); ${}_{92}\text{U}^{238}$ — ядро тяжелого изотопа урана, 92 протона + 146 нейтронов.

§ 449. Ядерные реакции. Первые, ставшие известными ядерные превращения связаны с естественной радиоактивностью.

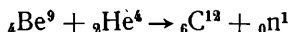
В настоящее время известно много ядерных превращений, происходящих при облучении ядер нейтронами и быстрыми заряженными частицами (альфа-частицами, протонами, дейтонами и т. д.).

В 1919 г. Резерфорд наблюдал впервые искусственное превращение, описываемое реакцией



На рис. 600 была приведена фотография треков альфа-частицы ${}_2\text{He}^4$ в атмосфере азота. Некоторые из треков раздваиваются, образуя «вилку». Исследования показали, что короткий трек есть след иона кислорода с массовым числом $M = 17$, а длинный — след протона.

При облучении альфа-частицами бериллия имеет место реакция



с образованием нейтрона ${}_0\text{n}^1$; именно при изучении этой реакции Чэдви́к впервые открыл нейтрон (§ 447).

В 1934 г. французские ученые Ф. Жолио-Кюри и И. Кюри открыли искусственные радиоактивные вещества (испускающие бета-лучи), получающиеся при ядерных реакциях. В настоящее время известны сотни искусственно получаемых ядер, все они обладают радиоактивностью.

Во всех ядерных реакциях и превращениях имеют место сохранение суммарного электрического заряда, суммы числа протонов и нейтронов и энергии.

Так как начальные и конечные ядра в ядерной реакции или превращении не тождественны, то (как и в элементарном акте любой химической реакции) имеет место увеличение или уменьшение суммарной кинетической энергии участвующих в процессе ядер и частиц; в случае увеличения кинетической энергии принято говорить о выделении ядерной энергии.

§ 450. Энергия связи протонов и нейтронов в ядре. Дефект массы. Ядро любого элемента состоит из определенного числа протонов и нейтронов, связанных собой силами притяжения (ядерными силами). Важной характеристикой силы этой связи является так называемая энергия связи Q — та энергия, которую необходимо сообщить для разрушения ядра на составляющие его частицы. Эта энергия, например, для ядра гелия (альфа-частицы) составляет $28,3$ Мэв. Для сравнения укажем, что энергия разрушения молекулы воды на атомы водорода и кислорода составляет 5 эв, т. е. альфа-частица в миллионы раз прочней.

Обычно интересуются энергией, приходящейся на одну ядерную частицу $\frac{Q}{M}$, или близкой величиной — энергией удаления одной частицы (M — массовое число). Исследования показали, что величина $\frac{Q}{M}$ —

наибольшая у элементов со средним атомным весом (примерно от $M = 30$ до $M = 200$) и составляет для них около 8 Мэв. Для более легких и более тяжелых ядер величина $\frac{Q}{M}$ меньше, т. е. эти ядра менее прочны и при их превращении в ядра середины периодической системы может, в принципе, выделяться энергия.

На рис. 609 приведен график энергии связи одной частицы $\frac{Q}{M}$ в различных ядрах.

При превращении водорода, дейтерия и других легких ядер в более тяжелые ядра энергия выделяется в результате так называемых термоядерных реакций. При превращении урана, тория и других элементов конца периодической системы в более легкие элементы энергия выделяется при естественном радиоактивном распаде и при так называемом «делении».

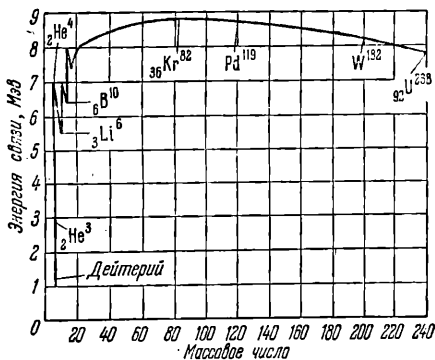


Рис. 609. Кривая энергии связи атомных ядер.

Определение величины энергии связи ядер и энергетического баланса ядерных реакций производится двумя дополняющими друг друга методами.

Первый метод основывается на непосредственном измерении кинетической энергии ядерных частиц, участвующих в ядерных реакциях, и продуктов реакции по их отклонению в магнитном поле.

Второй метод основан на установленном Эйнштейном соотношении массы и энергии (§ 433 гл. XXVIII). Согласно формуле Эйнштейна масса всякого тела меняется, когда меняется его энергия. Это изменение массы равно $\frac{E}{c^2}$, где E — изменение энергии, c — скорость света. Для разделения ядра на составляющие его частицы необходимо сообщить некоторую энергию связи Q . По формуле Эйнштейна при этом будет иметь место увеличение массы на величину $m' = \frac{Q}{c^2}$.

Мы приходим к выводу, что масса всякого ядра меньше суммы масс составляющих его частиц, протонов и нейтронов на величину m' . Пусть масса ядра m_a , масса протона m_p , масса нейтрона m_N :

$$m' = Z \cdot m_p + (M - Z) m_N - m_a = \frac{Q}{c^2}.$$

Разность суммы масс протонов и нейтронов и массы ядра называется дефектом массы данного ядра.

В настоящее время составлены и периодически уточняются таблицы масс большинства ядер. В эти таблицы включают также массу нейтрона. Массы ядер определяются с высокой точностью с помощью масс-спектрометра. Масса нейтрона определяется с использованием соотношения Эйнштейна из рассмотрения баланса энергии в реакциях с участием нейтронов. Массы в таблицах выражают в атомных единицах массы (а. е. м.).

Таблица масс атомов и нейтронов

Символ	Z	M	Масса атома в а. е. м.
${}_0^1\text{n}^1$	0	1	1,0086654
${}_1^1\text{H}^1$	1	1	1,0078252
${}_1^2\text{H}^2$	1	2	2,0141022
${}_1^3\text{H}^3$	1	3	3,0160494
${}_2^3\text{He}^3$	2	3	3,0160299
${}_2^4\text{He}^4$	2	4	4,0026036

В таблицах принято указывать массы нейтральных атомов (а не ионов или ядер). За атомную единицу массы (а. е. м.) согласно

стандарту принята $1/12$ часть массы атома основного изотопа углерода ${}^6\text{C}^{12}$. Как видно из таблицы, а. е. м. очень близка к массе протона или нейтрона. Численное значение атомной единицы массы по последним измерениям равно $1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г}$. Полезно заметить, что одной атомной единице массы соответствует энергия

$$E = mc^2 = 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 931,4 \text{ Мэв.}$$

Напомним также, для справок, что переводный множитель от атомных к обычным единицам массы называется числом Авогадро A

$$\text{(см. § 160)} \quad A = \frac{1 \text{ г}}{1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г}} = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{\text{атом}}{\text{моль}}; \text{ моль} — \text{это } 6,02 \cdot 10^{23}$$

атомов; при использовании в качестве основной единицы массы 1 кг имеем переводный множитель

$$A = \frac{1 \text{ кг}}{1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} = 6,02 \cdot 10^{26} \frac{\text{атом}}{\text{кмоль}}$$

(киломоль — это $6,02 \cdot 10^{26}$ атомов).

Пример пользования таблицей. Найти дефект массы и энергию связи альфа-частицы. Из таблицы находим массу нейтрального атома водорода, нейтрона и атома гелия ${}^4\text{He}$. При подстановке этих величин в формулу для m' масса электрона сокращается (так как в атоме гелия столько же электронов, сколько в двух атомах водорода):

$$m' = 2 \cdot 1,0086654 + 2 \cdot 1,0078252 - 4,0026036 = 0,0303776 \text{ а. е. м.},$$

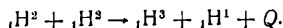
$$Q = 931,4 \text{ Мэв} \cdot m' = 28,3 \text{ Мэв.}$$

Дефект массы имеет место и при химических реакциях, но в этих случаях он пренебрежимо мал. Отклонения от закона Ломоносова — Лавуазье (закон сохранения массы) при существующей точности измерения не могут быть обнаружены на опыте.

В заключение этого параграфа заметим, что наличие дефекта масс является одной из причин, нарушающей точную пропорциональность массы ядра массовому числу. Другой причиной является некоторое отличие массы нейтрона от массы протона. Несмотря на то, что пропорциональность массы ядер целым числам является не точной, а приблизительной закономерностью, она сыграла важную роль при выяснении состава ядра (см. § 445).

Упражнения

544. Используя таблицу масс, найти выделение энергии и реакции



545. Смешиваются две порции воды: 500 г при 10°C и 750 г при 40°C . Каково изменение массы, которое происходит у первой и второй порций воды при выравнивании температур?

§ 451. Деление урана и использование атомной энергии. Как мы выяснили при анализе кривой энергии связи, превращение элементов конца периодической системы в более легкие элементы должно сопровождаться выделением ядерной энергии. Физической причиной более слабой связи ядерных частиц в ядрах с большим числом протонов является большая роль в этих ядрах взаимного электростатического отталкивания протонов.

Вскоре после открытия естественной радиоактивности стало ясно, что ядра радиоактивных элементов заключают в себе запас энергии необычайно высокой концентрации. Однако радиоактивные вещества очень мало распространены в природе, добыча их — очень трудное дело; выделение энергии радием происходит очень медленно и ускорить или замедлить этот процесс не удастся. Поэтому широкое использование атомной энергии естественных радиоактивных веществ оказалось технически невозможным. Успех в использовании атомной энергии был достигнут благодаря открытию деления урана.

В конце 1938 г. при изучении явлений, возникающих при облучении урана нейтронами, было совершено открытие, оказавшееся поворотным пунктом в истории физики и техники. Оказалось, что ядра одного из изотопов урана (${}_{92}\text{U}^{235}$) при захвате медленных нейтронов претерпевают ядерное превращение совершенно неожиданного типа. Тяжелое ядро разрывается на две примерно одинаковые части, которые под действием сил электрического отталкивания разлетаются с огромными скоростями. Эти части (называемые «осколками») являются бета-радиоактивными ядрами, которые после ряда радиоактивных превращений, занимающих от нескольких минут до десятков лет, превращаются в ядра элементов с атомным весом от 70 до 160 и зарядом Z от 30 до 64.

Разлет осколков связан с выделением энергии примерно 200 *Мэв*. Происхождение этой энергии в конечном счете такое же, как при радиоактивных превращениях — менее прочная связь ядерных частиц в особо тяжелых ядрах. Легко подсчитать, что при делении всех ядер, содержащихся в одном грамме урана, выделится столько же энергии, сколько при сжигании трех тонн угля.

Колоссальная энергия, выделяющаяся при делении урана, могла бы оказаться столь же недоступной для использования в технике, как и другие ранее известные реакции и ядерные превращения, если бы не следующая особенность этой реакции, впервые исследованная в лаборатории французского ученого Ф. Жолио-Кюри. При реакции деления наряду с осколками образуются нейтроны в количестве 2—3 (в среднем 2,5 нейтрона), которые сами могут вызывать дальнейшие акты деления. Это создает принципиальную возможность так называемой цепной реакции, которая, однажды начавшись, охватывает все новые и новые ядра урана.

Как известно, исследование этой возможности привело к осуществлению 2 декабря 1942 г. под руководством Э. Ферми (физика итальянского происхождения, работавшего в США) управляемой цепной реакции деления в так называемом уран-графитовом реакторе деления.

Взрывная цепная реакция осуществляется в атомных бомбах. 6 и 9 августа 1945 г. атомные бомбы были преступно применены против населения японских городов Хиросима и Нагасаки.

Разработка устройств для осуществления взрывной цепной ядерной реакции, разработка методов отделения изотопов урана друг от друга, получение в ядерных реакторах нового элемента плутония ${}_{94}\text{Pu}^{239}$, разработка устройств для осуществления термоядерного взрыва — все эти работы потребовали очень большой изобретательности и настойчивости и были своевременно проведены в Советском Союзе в интересах его обороноспособности наряду с работами по мирному использованию ядерной энергии.

Руководителем большинства работ в области ядерной физики и техники на протяжении многих лет являлся выдающийся советский ученый И. В. Курчатов.

§ 452. Разделение изотопов урана. Для осуществления взрывной ядерной реакции и для использования в мирных целях необходимо выделять из природной смеси изотопов урана ($99,3\% {}_{92}\text{U}^{238} + 0,7\% {}_{92}\text{U}^{235}$) легкий изотоп ${}_{92}\text{U}^{235}$. Для разделения изотопов используется процесс диффузии газообразного соединения урана UF_6 через пористую перегородку. Как известно, скорость движения молекул при данной температуре зависит от их массы. У соединения более легкого изотопа скорость диффузии примерно на $0,5\%$ больше. Повторяя процесс диффузии многократно, удалось добиться выделения ${}_{92}\text{U}^{235}$ почти в чистом виде. Техническое осуществление этого процесса является очень сложным, требует гигантских установок и больших затрат электроэнергии для питания газовых насосов. Кроме использования диффузии, существуют и другие методы разделения изотопов урана и других элементов, применяемых в технике.

§ 453. Ядерный реактор. Это устройство является основным для получения ядерной энергии в мирных целях и для получения плутония. На рис. 610 изображена схема одного из типов ядерных реакторов (так называемого уран-графитового реактора). В толще большого куба из графита проложены каналы, по оси которых проходят стержни из урана (природная смесь изотопов или смесь, обогащенная ${}_{92}\text{U}^{235}$). Вокруг стержней протекает охлаждающая вода. Все сооружение окружено толстым слоем бетона, защищающим обслуживающий персонал от вредного действия радиоактивных излучений.

В ядерном реакторе происходит цепная ядерная реакция, интенсивность которой в ходе работы поддерживается на постоянном уровне и может быть увеличена или уменьшена или вовсе прекращена при помощи специальных устройств управления (управляемая ядерная реакция).

При делении ядер ${}_{92}\text{U}^{235}$ образуются нейтроны. Часть из этих нейтронов вылетает наружу из реактора и не участвует в процессе. Часть нейтронов поглощается ядрами ${}_{92}\text{U}^{238}$ и тоже не участвует в поддержании цепной реакции деления, хотя существенно с другой точки зрения, о которой мы скажем ниже. Для поддержания цепной

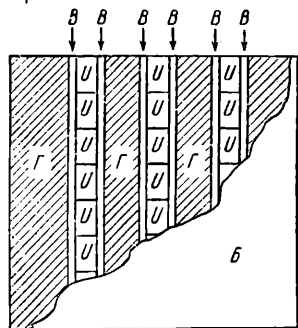


Рис. 610. Схема уран-графитового ядерного реактора: *U* — урановые стержни, *В* — охлаждающая вода, *Г* — замедлитель нейтронов (графит), *Б* — защита персонала (бетон).

реакции, не изменяющейся во времени, необходимо, чтобы в среднем один из нейтронов, образовавшихся при делении одного ядра ${}_{92}\text{U}^{235}$, был вновь захвачен другим ядром ${}_{92}\text{U}^{235}$. Очевидно, это возможно, если выполнены три условия.

I. Общее число нейтронов, образующихся при одном акте деления, должно быть больше 1. Этот физический факт был установлен в опытах Ф. Жолио-Кюри и его сотрудников, как мы уже отметили.

II. Потеря нейтронов из-за вылета из реактора должна быть незначительной. Это возможно, если размеры реакторов достаточно велики *). Некоторые из промышленных реакторов имеют размер многоэтажного дома.

III. Потеря нейтронов из-за поглощения в ${}_{92}\text{U}^{238}$ и других веществах, присутствующих в реакторе, должна быть незначительной. Выполнение этого требования потребовало огромных усилий и изобретательности. Если используется уран с природным содержанием ${}_{92}\text{U}^{235}$, то очень существенно поглощение нейтронов в ${}_{92}\text{U}^{238}$. Для уменьшения этого вредного процесса применяется так называемый замедлитель нейтронов (в данном случае графит). При столкновении нейтронов с ядрами углерода они отдают им свою энергию по законам соударения упругих шаров. Для нейтронов меньшей энергии соотношение вероятностей захвата в ${}_{92}\text{U}^{236}$ и ${}_{92}\text{U}^{238}$ более благоприятное. Поэтому замедление нейтронов уменьшает их потери. Графит и уран должны быть свободны от ничтожных примесей бора, кадмия и других элементов, способных с большей вероятностью захватывать замедленные нейтроны. Для управления интенсив-

*) Принято говорить, что масса реактора (и урана в нем) должна превосходить «критическую массу».

ностью цепной реакции в реакторе имеются управляющие стержни, содержащие поглотитель нейтронов. Введение этих стержней даст возможность остановить цепную реакцию за счет нарушения баланса нейтронов, когда это необходимо.

В урановых стержнях происходит выделение ядерной энергии. Разлетающиеся осколки деления ядер урана, пройдя расстояние в доли миллиметра, отдают свою кинетическую энергию электронам и нагревают стержни. Чтобы стержни не расплавились, их необходимо охлаждать. Для промышленного использования ядерной энергии охлаждающая вода под давлением и превращается в пар высокой температуры и давления, направляемый в паровую турбину.

На этом принципе основано использование ядерных реакторов на атомных электростанциях (первая атомная электростанция пущена в Советском Союзе в 1954 г.), в двигательных установках атомного ледокола «Ленин» и в ряде других устройств. Кроме уран-графитового реактора с водяным охлаждением, разработано много типов реакторов с другими замедлителями и охлаждающими веществами *).

Нейтроны, захваченные ${}_{92}\text{U}^{238}$, не участвуют в поддержании цепной реакции, но они не пропадают бесследно. При захвате нейтрона образуется радиоактивный изотоп урана ${}_{92}\text{U}^{239}$, который после двух бета-распадов превращается в новый элемент плутоний ${}_{94}\text{Pu}^{239}$, не существующий в природе. Плутоний обладает свойствами, близкими к свойствам ${}_{92}\text{U}^{235}$, и играет важную роль в атомном и термоядерном оружии и при мирных применениях ядерной энергии. Превращение урана ${}_{92}\text{U}^{238}$ в плутоний в ядерных реакторах дает в принципе возможность использовать для получения электроэнергии не только энергию ${}_{92}\text{U}^{235}$, но и всю энергию, заключенную в ${}_{92}\text{U}^{238}$. Так как содержание основного изотопа урана в 140 раз больше содержания ${}_{92}\text{U}^{235}$, то вовлечение в ядерную энергетику ${}_{92}\text{U}^{238}$ очень существенно с экономической точки зрения. Реакторы для переработки ${}_{92}\text{U}^{238}$ в плутоний используют исходное ядерное горючее высокой концентрации и не содержат замедлителя (реакторы на «быстрых» нейтронах).

В Советском Союзе осуществляется большая программа строительства ядерных реакторов для получения электроэнергии, для использования в транспортных целях, для получения радиоактивных изотопов, для научных исследований. Большое значение имеет строительство атомных электростанций с электрической мощностью

*) В качестве замедлителя используются графит, вода, тяжелая вода (которая особо мало поглощает нейтроны), бериллий. В качестве теплоносителя используют воду, углекислый газ, жидкий натрий, гелий и т. д. Конструкция реактора упрощается, и он становится компактней (что особенно важно для транспортных реакторов), если применяется уран с повышенной концентрацией ${}_{92}\text{U}^{235}$.

в сотни тысяч киловатт, с высоким давлением и температурой водяного пара, и поэтому экономичных. Примером и прообразом таких станций являются Белоярская АЭС им. И. В. Курчатова, Воронежская АЭС. Идут проектирование и строительство реакторов на «быстрых» нейтронах, использующих ${}_{22}\text{U}^{238}$. Вслед за атомным ледоколом «Ленин» будут строиться еще два атомных ледокола. Атомная подводная лодка «Ленинский комсомол» совершила рейс подо льдами к Северному полюсу. Создан экспериментальный реактор «Ромашка», в котором электроэнергия вырабатывается непосредственно в реакторе в термоэлектрических полупроводниковых генераторах.

Успехи советской науки и техники в создании ядерных реакторов получили признание во всем мире.

У п р а ж н е н и я

546. Мощность двигателя атомного судна составляет 15 000 квт. Кпд равен 30%. Определить месячный расход ядерного горючего.

547. При делении ядра ${}_{92}\text{U}^{235}$ под действием замедленного нейтрона образовались осколки с массовыми числами $M_1 = 90$ и $M_2 = 143$. Определить число нейтронов, вылетевших из ядра в момент деления в данном акте деления. Определить энергию и скорость каждого из осколков, если их суммарная кинетическая энергия равна 160 Мэв.

§ 454. **Использование изотопов.** Радиоактивные изотопы могут быть получены: а) при облучении нейтронами в ядерном реакторе соответствующих стабильных изотопов (таковы, например, радиокобальт Co^{60} и радиофосфор P^{32}); б) выделением из продуктов деления урана (например J^{131}); в) облучением на ускорителях. Стабильные изотопы получают методом разделения природной смеси изотопов.

Радиокобальт и некоторые другие изотопы используются для лечения опухолей, в качестве источника гамма-лучей для гамма-просвечивания, для удлинения сроков сохранности пищевых продуктов.

Особое значение при научных исследованиях и в медицинской диагностике приобрел так называемый «метод меченых атомов», использующий свойство разных изотопов одного и того же элемента практически одинаково вести себя в химических, биологических и многих физических процессах. Радиоизотопы при этом обнаруживаются с помощью счетчиков атомных частиц, а соотношение стабильных изотопов — с помощью масс-спектрометра. Два типичных примера.

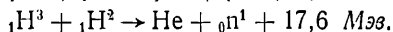
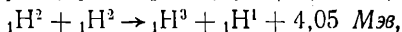
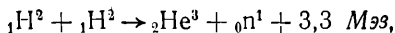
1) В организм человека вводят радиоiod (в ничтожно малом количестве, не вредном для здоровья). Помещая счетчик вблизи щитовидной железы, удается установить, как циркулирует в организме стабильный природный йод, и своевременно обнаружить опасное заболевание.

2) Фотосинтез — сложная цепь реакций в зеленых растениях, при которой CO_2 и H_2O превращаются в углеводы и O_2 . Добавляя повышенные количества стабильного изотопа кислорода ^{18}O поочередно в H_2O и CO_2 , ученым удалось установить, что источником выдыхаемого растением кислорода является в основном вода (а не CO_2 , как думали раньше). Аналогичным методом изучаются самые тонкие и важные детали механизма химических и биохимических процессов.

Число этих примеров можно увеличить. Наряду с перспективами ядерной энергетики они говорят нам об огромном значении мирного использования достижений ядерной физики.

§ 455. Термоядерные реакции. При объединении самых легких ядер (например, изотопов водорода) в более тяжелые происходит выделение ядерной энергии, которое в ряде случаев превосходит (на единицу массы) даже выделение ядерной энергии при реакции деления.

Приведем примеры таких реакций (символ ${}_0^1\text{n}$ означает нейтрон, ${}_2^3\text{He}$ — легкий, мало распространенный изотоп гелия).



Реакции «объединения» происходят между заряженными частицами, которые отталкиваются друг от друга как одноименно заряженные тела. Поэтому необходимым условием протекания этих реакций является большая кинетическая энергия сталкивающихся частиц, достаточная для преодоления сил отталкивания. В малых масштабах такие условия могут быть осуществлены с помощью ускорителей (именно так были впервые изучены приведенные реакции). В более крупных масштабах реакции между заряженными частицами могут происходить, если температура газа, к которому они принадлежат, превосходит 10^7 градусов и более.

Реакции, происходящие между заряженными частицами при тепловом движении в горячем газе, называются термоядерными. Термоядерные реакции являются источником энергии, поддерживающей свечение Солнца и звезд, они получили важное применение в так называемом термоядерном оружии и, по мнению многих ученых, лягут в основу энергетики будущего в виде управляемой термоядерной реакции.

В недрах Солнца и похожих на него звезд происходит сложный цикл последовательных ядерных реакций, конечным результатом которых является превращение четырех протонов и четырех электронов в одно ядро гелия, два электрона и два нейтрино, которые беспрепятственно вылетают наружу. При этом выделяется энергия,

близкая к той, которая потребовалась бы для разрушения ядра гелия на составные части. Большая часть этой энергии переносится за счет лучистой теплопередачи от слоя к слою к поверхности звезды и излучается в виде видимого, инфракрасного и ультрафиолетового излучения. Часть энергии излучается в виде энергии нейтрино. В центре звезды имеет место равновесие между выделением и отводом энергии и температура поддерживается на постоянном уровне. После выгорания водорода, особенно в массивных звездах, происходит дальнейший термоядерный синтез элементов, более тяжелых, чем гелий.

В термоядерном оружии по данным, опубликованным в печати, высокая температура первоначально возникает за счет энергии взрывной цепной реакции ${}_{92}\text{U}^{235}$ или плутония и в ходе дальнейшего процесса поддерживается термоядерными реакциями, приведенными в начале этого параграфа.

В настоящее время ученые работают над проблемой осуществления управляемой термоядерной реакции. При высоких температурах дейтерий и тритий почти полностью ионизированы и состоят из плазмы, т. е. из нейтральной смеси заряженных частиц — ионов и электронов.

Основная задача на пути осуществления управляемой термоядерной реакции — удержание высокотемпературной плазмы от контакта со стенками сосуда и уменьшение отвода тепла к стенкам до такой величины, при которой возможно поддержание в центре сосуда температуры в десятки миллионов градусов. Одна группа предложений использует для этой цели своеобразные свойства движения заряженных частиц, составляющих плазму, в постоянном магнитном поле. Другая группа предложений имеет ввиду использование высокочастотных электромагнитных полей. Возможности и трудности этого второго пути изучены меньше, чем первого пути. Поэтому мы в нашем изложении ограничимся постоянными магнитными полями. Рассмотрим движение заряженной частицы в однородном магнитном поле. Оно складывается из двух движений — вращения по окружности в плоскости, перпендикулярной к направлению магнитного поля (§ 286), и поступательного

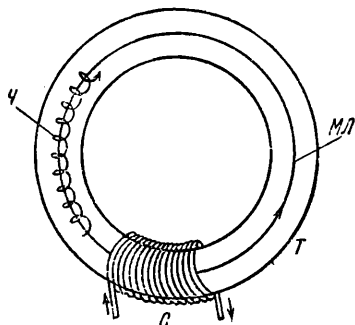


Рис. 611. Одна из схем, предложенных для осуществления термоядерной управляемой реакции: T — торoidalная камера, C — одна из секций обмотки, которые должны покрывать всю камеру, $MЛ$ — замкнутая магнитная силовая линия, $Ч$ — траектория заряженной частицы.

движения вдоль магнитной силовой линии.

В целом получается движение по винтовой линии, «надетой» на магнитную силовую линию. В неоднородном магнитном поле в первом приближении движение носит такой же характер, т. е. частица как бы привязана к магнитной силовой линии и не соприкасается со стенками сосуда, если магнитная силовая линия замкнута внутри сосуда и не приближается к стенкам. Такое магнитное поле может быть осуществлено, например, в сосуде торoidalной формы, окруженном подмагничивающей обмоткой (рис. 611). На рисунке

показана траектория заряженной частицы, которая движется вдоль магнитной силовой линии. Фактически такая простейшая схема не является работоспособной по ряду причин, из которых некоторые являются устранимыми. Главной принципиальной трудностью этой и более сложных схем является наличие так называемой неустойчивости плазмы в неоднородном магнитном поле. Малые случайные неоднородности плазмы и неправильности ее формы не только не рассасываются, но быстро нарастают и «расплескивают» плазму по стенкам сосуда. В настоящее время исследователи изучают пути уменьшения этих вредных процессов при помощи введения дополнительных постоянных магнитных или высокочастотных полей.

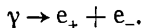
У п р а ж н е н и е

548. Солнце каждую секунду излучает $4 \cdot 10^{26}$ джоулей энергии. Масса Солнца составляет $2 \cdot 10^{30}$ кг. При образовании одного ядра гелия выделяется 25 Мэв энергии (не считая энергии, уносимой нейтрино). Считая, что 5 миллиардов лет назад Солнце состояло из чистого водорода, определить содержание гелия на Солнце в настоящее время.

§ 456. Ядерные силы. Исследования взаимодействия и превращений элементарных частиц. Большая энергия связи ядерных частиц в ядре указывает, что существуют какие-то силы, удерживающие протоны и нейтроны друг около друга. Эти силы называются ядерными силами. В настоящее время известно, что эти силы являются весьма большими на расстояниях, меньших 10^{-15} м (к одной ядерной частице приложены силы, превышающие сотни ньютонов), и очень быстро убывают на больших расстояниях. Ядерные силы не являются силами электрической природы (нейтрон не заряжен). Это новый тип сил, свойственный протонам и нейтронам.

Изучение ядерных сил — это часть исследований взаимодействия элементарных частиц*). Эти исследования, проведенные с использованием космических лучей и ускорителей частиц, привели к ряду удивительных открытий. Оказалось, что элементарные частицы обладают свойством взаимных превращений и что число различных элементарных частиц весьма велико.

Мы уже знакомы с такими элементарными частицами, как электрон, протон, нейтрон, нейтрино. В 1932 г. Андерсон, изучая треки, образующиеся в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле, открыл частицу, имеющую такую же массу, как электрон, но положительный электрический заряд (позитрон). Если через вещество проходят гамма-лучи с энергией фотонов $h\nu > 2mc^2$, где m — масса покоя электрона, то происходит реакция образования «пар» электрон e_- плюс позитрон e_+ :



На рис. 612 воспроизведен снимок образования «пары» в камере Вильсона с приложенным магнитным полем, отклоняющим положительные и отрицательные частицы в разные стороны.

Обратная реакция $e_+ + e_- \rightarrow \gamma$ (один или несколько фотонов) получила несколько неуклюжее название реакции аннигиляции (т. е. уничтожения). На самом деле, это просто одна из реакций превращения одних частиц в другие.

Вслед за открытием в 1932 г. нейтрона, позитрона и предсказанием существования и свойств нейтрино (швейцарский физик Паули и итальянский физик Ферми) последовали дальнейшие удивительные открытия.

*) Как мы уже упоминали в начале главы, этот термин не имеет точного определения. Атомы и атомные ядра — составные частицы. Электроны, протоны, нейтроны, фотоны и ряд других открытых в последние годы частиц принято называть «элементарные частицы».

В 1936 г. при изучении космических лучей методом камеры Вильсона Андерсон и Неддермейер открыли заряженную частицу с массой, в 207 раз превышающей массу электрона. В 1947 г. Пауэлл и Окиаллини, изучая космические лучи методом фотопластинок, открыли еще одну частицу с массой, лежащей между массой электрона и массой протона. Такие частицы мы сейчас называем мезонами (т. е. «средние по массам»). Открытой в 1936 г. частице присвоено название мю-мезон. Открытая Пауэллом и Окиаллини частица получила название пи-мезон. Она существует в положительно заряженной, отрицательной и нейтральной форме и имеет массу около 270 масс электрона; ее изучение дало очень много для понимания ядерных сил. В дальнейшем было открыто еще четыре формы мезонов, получивших название K -мезонов, ряд частиц более тяжелых, чем протон и нейтрон (гипероны), и большое число частиц, которые обладают столь малым временем полураспада, что об их существовании физики судят лишь по некоторым косвенным признакам при процессах взаимодействия более долгоживущих частиц.

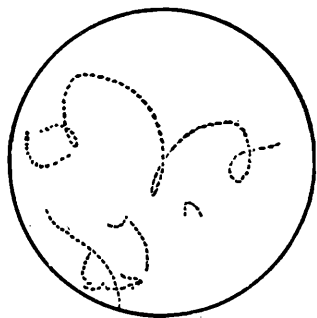


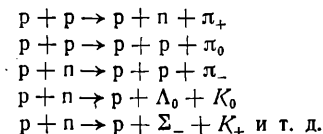
Рис. 612. Образование пары электрон + позитрон в камере Вильсона, наполненной криптоном. След позитрона в магнитном поле отклоняется вправо, след электрона — налево.

Принципиальное значение имело выяснение факта существования так называемых античастиц (т. е. частиц, способных к взаимной аннигиляции).

Позитрон — первый пример античастицы (по отношению к электрону). Были обнаружены античастицы для протона («антипротон»), для нейтрона, нейтрино и некоторых других элементарных частиц. Принципиально возможно стабильное существование «антивещества», в котором ядра атомов состоят из антипротонов и антинейтронов, а оболочки атомов — из позитронов. Существует ли в настоящее время антивещество в природе, неизвестно.

Приведем примеры превращений элементарных частиц (их принято записывать в виде реакций, обозначая частицы буквами; p — протон, n — нейтрон, e_- — электрон, e_+ — позитрон, π_0 — пи-мезон (нейтральный), ν — нейтрино, Λ , Σ , Ξ — различные гипероны и т. д.).

При попадании протонов большой энергии (составляющих основную часть космических лучей) в верхние слои атмосферы происходят при взаимодействии с протонами и нейтронами атомных ядер ${}^8\text{O}^{16}$ и ${}^7\text{N}^{14}$ реакции образования пи-мезонов, K -мезонов и гиперонов:



Эти реакции удалось также осуществить в лабораторных условиях с использованием больших ускорителей.

На рис. 613 приведена фотография, полученная при одном из таких опытов с использованием пузырьковой камеры. Образовавшийся в ускорителе (по реакции $p + p \rightarrow p + p + \pi_-$) мезон пи-минус образует в камере пару $K_+ + \Sigma_-$, каждая из этих частиц вступает в дальнейшие реакции.

Большинство элементарных частиц испытывают распад с испусканием нейтрино. Изучение реакции поглощения нейтрино показало, что существует

четыре сорта нейтрино. Нейтрино, образующиеся при распаде нейтрона и ядер с нейтронным избытком, являются античастицами по отношению к нейтрино, которые образуются при распаде ядер с протонным избытком. Опыт Рейнса и

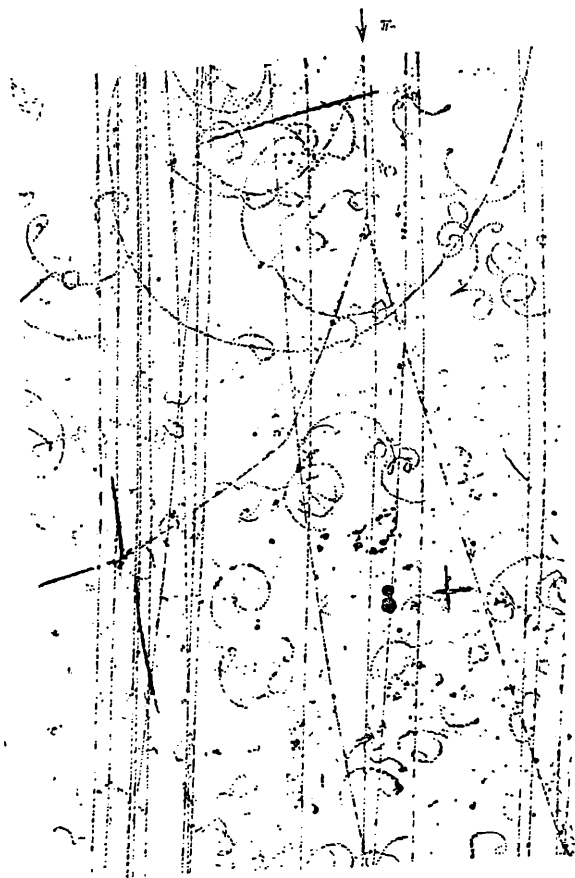
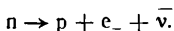


Рис. 613. Превращения элементарных частиц высокой энергии при столкновении с атомами в пузырьковой камере. Мезон пи-минус (помечен стрелкой) участвует в реакции $\pi_{-} + p_{+} \rightarrow K_{+} + \Sigma_{-}$.

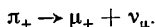
Коуэна (захват нейтрино протонами) возможен лишь с нейтрино первого сорта, которые условились называть антинейтрино (обозначение $\bar{\nu}$), сохранив название нейтрино (ν) за частицами, образующимися при распаде ядер с протонным избытком и при термоядерной реакции, идущей на Солнце и похожих

на него звездах *). Нейтрино и антинейтрино, которые возникают при распаде и образовании мю-мезонов, являются частицами, совсем отличными по своим реакциям захвата от нейтрино двух описанных сортов. Их называют мю-нейтрино и обозначают ν_{μ} и $\bar{\nu}_{\mu}$.

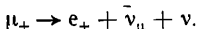
Приведем примеры распада элементарных частиц и других реакций с участием нейтрино. Распад свободного нейтрона (период полураспада 13 мин)



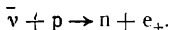
Распад заряженного пи-мезона (период полураспада $1,77 \cdot 10^{-8}$ сек)



Распад мю-мезона (период полураспада $1,53 \cdot 10^{-6}$ сек)



Реакция захвата антинейтрино (опыт Рейнса и Коуэна).



Реакция захвата мю-антинейтрино:



При всех превращениях элементарных частиц выполняется закон сохранения энергии и закон сохранения электрического заряда; кроме того, используя понятие античастиц, можно сформулировать некоторые дополнительные законы сохранения, ограничивающие типы возможных превращений частиц. Например, суммарное число «тяжелых» элементарных частиц (их иногда называют собирательным названием «барионы») — протонов, нейтронов и гиперонов минус суммарное число соответствующих античастиц есть величина постоянная.

Аналогичные законы можно сформулировать для нейтрино и электронов, а также мю-мезонов и мю-нейтрино.

Исследования элементарных частиц, их превращений и взаимодействий принадлежат к числу важнейших в современной науке.

У п р а ж н е н и я

549. Энергия фотонов гамма-лучей, падающих на свинцовую пластинку, равна $1,1$ Мэв. Возможно ли образование пар $e_{+} + e_{-}$? Чему равна суммарная кинетическая энергия электрона и позитрона?

550. Найти скорость, которую приобретает межзвездная ракета, если 1% ее веса составляет антивещество и энергия, полученная при его соединении с веществом, использована для нагрева и извержения через сопло «рабочего тела», составляющего 10% веса ракеты.

*) Эта реакция: $p + p \rightarrow {}^2_1\text{H} + e_{+} + \nu_{e}$. Дейтерий ${}^2_1\text{H}$ затем соединяется с водородом, образуя гелий (уже без выделения нейтрино). Если существовали бы звезды, состоящие из антивещества, то они являлись бы источником антинейтрино. Попытки изучения потоков приходящих из космоса нейтрино и антинейтрино (очень трудные экспериментально) представляют большой научный интерес.

ОТВЕТЫ К УПРАЖНЕНИЯМ

2. 2,6 мм. 4. 0,02 мм; 0,16%. 5. Не имеет смысла. Сомнительной является уже вторая цифра после запятой. Правильный ответ: $2,73 \text{ г/см}^3$. 6. Не имеет смысла. Правильный ответ: $457\,000 \text{ м}^2$. 7. 3,7 кг. 8. 200 кг. 9. 590 кг. 10. 120 м. 11. Вода. 12. а) Циклоида (см. рис. 614, пунктир); б) окружность; в) точка. 13. а) Вращательное; б) сочетание поступательного и вращательного движений (тело отсчета — пробка); в) поступательное. 14. 2 км/час; 3 км/час; 4 км/час. 17. а) Равномерное движение со скоростью 15 км/час; б) покой в точке на расстоянии 15 км от начала отсчета. 18. Второй. 19. а) $\sim 11 \text{ м/сек}$; б) $\sim 470 \text{ м/сек}$. 20. 4 м.

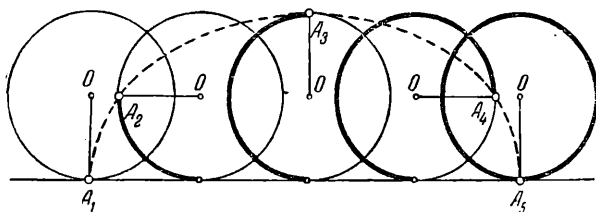


Рис. 614.

21. 16 ч. 40' м. 22. 9,5 часа. В действительности же под действием земного тяготения скорость ракеты относительно Земли уменьшается и продолжительность полета будет значительно большей. 23. 60 м^3 . 24. $0,5 \text{ м/сек}$. 25. Мгновенной. 26. На участке Москва — Клин средняя скорость равна $55,6 \text{ км/час}$; на участке Клин — Калинин скорость другая. 27. 20 сек ; 100 м . 28. 440 м/сек . 29. 9. 30. 10 м/сек ; $-0,1 \text{ м/сек}^2$. 31. 12 500. 32. В течение 1-й секунды скорость возросла от $0,5 \text{ м/сек}$ до 2 м/сек и ускорение было равно $1,5 \text{ м/сек}^2$; в течение 2-й секунды скорость возросла от 2 м/сек до $2,5 \text{ м/сек}$ и ускорение было равно $0,5 \text{ м/сек}^2$; затем $1,5 \text{ сек}$ скорость оставалась постоянной; в течение отрезка времени от $3,5$ до 5 сек скорость убывала от $2,5$ до 2 м/сек и ускорение было равно $-0,33 \text{ м/сек}^2$. 34. 2 м/сек ; 8 м . 35. 8 м/сек ; 40 м . 36. $14,7 \text{ м/сек}$. 37. 7 м/сек . 38. $\sim 0,5 \text{ м}$. 39. $1,5 \text{ м}$. 44. а) Две силы по 8 кг , приложены к доске скамьи; б) 40 кг , приложена к левой стенке вагона. 46. $\sim 13 \text{ м/сек}^2$. 47. $1,63 \text{ м/сек}^2$. 48. а) 69 кг ; б) 96 кг . 49. 16 кг ; $1,64 \text{ т. е. м}$. 50. 49 н ; 5 кг . 51. 550 кг . 52. $33\,500 \text{ кг}$. 53. Правый с ускорением $4,9 \text{ см/сек}^2$; левый с ускорением $-1,9 \text{ см/сек}^2$. 54. а) Не изменится; б) увеличится; в) уменьшится; г) вода пере-

станет вытекать. 58. Не разорвется, так как действующая на нее сила равна 5 кг. 60. Третий закон не нарушен, так как судно движется с ускорением $0,005 \text{ м/сек}^2$. 61. 1760 кг, 1500 кг, 1240 кг. 62. 1240 кг, 1500 кг, 1760 кг. 63. $0,6 \text{ м/сек}$. 64. 50 см/сек . 65. $5,2 \cdot 10^4 \text{ г} \cdot \text{см/сек}$. 66. В жидкости трение покоя отсутствует. 67. Не меньше 80 Т. 68. 36 кг. 69. 240 000 кгм. 70. 1500 кг. 71. 125 кг. 73. 50 н, 61 н, 65 н. 76. Вверх. 78. Нет, так как отсутствует сила, действующая на стену. 79. 97 см. 80. Сжатие стержня ВС 340 кг, растяжение АВ 240 кг. 81. Растяжение АС 36 кг, сжатие АВ 29 кг. 83. 2,1 нм. 84. На расстоянии 9 см от точки опоры. 85. На расстоянии 48 см от меньшего груза. 86.. Нет. Необходим груз не меньше 36 кг. 88. На расстоянии 1160 мм от диска А, 105 кг. 89. А — 6200 кг, В — 3800 кг. 90. 32 кг. 91. 12 кгм. 92. 4800 кгм. 97. 200 кг/см^2 ($200 \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$). 98. 13 см^2 ; 7 см^2 . 99. $0,5 \text{ см}^2$. 100. 12,5 дж. 101. 60 000 дж. 102. 9000 кгм. 103. 3 м. 104. 0,16 кгм. 105. $2 \times 10^6 \text{ кгм}$. 106. 450 кгм. 107. 6 кгм/сек . 108. 8300 кг; 340 кг. 109. 33 л. с. (паспортная мощность «Победы» 50 л. с.). 110. 10 кгм/сек . 111. Около 70 л. с. 112. 34 л. с. 113. $\sim 98\%$. 114. 7300 кгм; 910 кг. 115. 6,5 квт. 118. 4 кгм, 24 кгм. 119. Энергия пули в 2,5 раза больше. 120. 100 м. 121. 14 м/сек , 2,5 кгм, 5 кгм. 122. 10^7 дж . 123. 380 кг. 125. 5,5 м. 127. 800 м. 129. 1,3 м; 8,7 м. 130 а) $0,0017 \text{ рад/сек}$; б) $0,000073 \text{ рад/сек}$; в) 63 рад/сек . 133. Нельзя, так как окружная скорость превысит в $\sim 1,2$ раза допустимую: $v = 52,3 \text{ м/сек}$. 134. 158 об/мин. 135. 7,9 км/сек. 136. $0,5 \text{ м/сек}^2$. 137. 16 м/сек^2 . 140. 32 см. 141. 400 Г. 142. 122 кг. 143. 0,86 об/сек. 144. Около 5 об/сек. 145. $\sim 236 \text{ Т}$. 148. $6 \cdot 10^{21} \text{ т}$. 149. 24 кг. 150. $6 \cdot 10^{-7} \text{ дин}$. 151. 7,4 км/сек. 152. 0,01 сек. 153. 5 ц. 154. 2 мм, 60 см. 155. Укоротить. 156. Начнут отставать. 157. 1,9 сек. 162. 405 ц. 163. а) 17 м и 1,7 см; б) 1,45 мм. 167. Расход $Q = 6000 \text{ м}^3/\text{сек}$. Мощность $10^9 \text{ вт} = 10^6 \text{ квт}$. 168. 340. 169. 0,0004. 170. В 200 раз длиннее меридиана. 177. 40 дин/см. 178. 16 000 эрг. 179. 435 дж. 196. 1300,7 см, 1299,8 см. 197. На 29° С . 198. 80,2 мм. 199. 6 мм. 200. 5165 см^3 . 201. 193 см^3 . 202. Меньше. 203. $8,8 \text{ г/см}^3$. 204. Погрузится. 205. а) Не изменится; б) понизится. 207. I — 815-мм рт. ст.; II — 715 мм рт. ст. 208. 307° С . 209. $1,01 \text{ кг/см}^2$. 210. $26,3 \text{ кг/см}^2$, 42° С . 212. 2400 л. 213. 80 кг. 214. 35 ата. 215. $0,0007 \text{ г/см}^3$. 216. 22 м^3 . 218. $0,0014 \text{ г/см}^3$. 221. 131 кг/см^2 . 222. $+13^\circ \text{ С}$. 223. 3 : 1. 224. 193 см^3 . 225. 527° С . 226. В 10-литровом в 1,1 раза больше. 227. 5 ата. 228. 527° С . 229. а) Теплообмен; б) работа при адиабатическом процессе; в) теплообмен увеличивает внутреннюю энергию; часть сообщенной энергии отдается подвижным стенкам в виде работы; г) теплообмен и работа увеличивают внутреннюю энергию. 230. $9,2 \text{ кдж/град}$, 900 кдж/град . 231. 507 кдж (121 ккал). 232. 84 кдж (20 ккал). 233. 183 кдж (43,6 ккал). 234. 14,2 дж, 5,8 дж. 235. 36° С . 236. 41,5 кг. 237. 35,7 кдж. 238. $45 \cdot 10^7 \text{ дж}$. 239. 12,7 кг. 240. 10,7 кг. 241. 44%. 242. 66° С . 249. 2200 кдж. 250. 0,1%. 251. 15 т. 255. Нет, потому что плотность твердого свинца больше плотности его расплава. 268. Изменениями атмосферного давления. 269. До начала кипения верхние слои жидкости холоднее нижних. 272. а) $3,6 \text{ кг/см}^2$, $11,5 \text{ кг/см}^2$. 273. 147° С , 190° С . 274. До 92,5 мм рт. ст., до 17,5 мм рт. ст. 279. 529 кдж. 280. 124 г. 281. 49° С . 282. 3,7 кг. 283. Меньше 1200 ккал/кг. 284. 54%, 755-мм рт. ст. 285. $7,52 \text{ г/м}^3$. 286. 5° С . 289. 21%. 290. 36%. 291. 41%. 294. 55%. 296. 4000 н. 297. 2000 кг, 6%. 298. 8100 кг, 24%. 299. Уменьшится в 36 раз. 300. Около 0,4 см. 301. 15 000 ед. СГСЭ. 302. 0,36 дин. 303. $2,6 \cdot 10^{-8}$ ед. СГСЭ. 304.

3600 кГ. 305. 15 ед. СГСЭ и — 5 ед. СГСЭ, или 5 ед. СГСЭ и — 15 ед. СГСЭ.
 306. На расстоянии 18 см от меньшего заряда. 307. $-0,9 \cdot 10^{-8}$ н. 308. $5 \cdot 10^{11}$.
 309. На внутренних частях заряженного тела заряды отсутствуют. 312. 2400 н/к;
 9600 н/к. 313. а) $3 \cdot 10^4$ н/к; б) 3750 н/к. 314. а) 0; б) 6480 н/к. 315. а) $1,05 \cdot 10^{10}$
 см/сек²; б) $4,4 \cdot 10^{-8}$ сек. 317. 0,02 дж. 318. 140 кдж. 319. 150 000 в/м. 320. 15 кв.
 321. 153 в. 322. 0,05 мкф. 323. $4 \cdot 10^{-4}$ к. 324. 3,5 в. 325. 150 см. 326. Увеличится
 в 4 раза. 327. 1500 см. 328. 7. 329. а) 2 пф; б) 2 пф; в) 2,7 пф; г) 1,5 пф. 331. При
 заданном размере пластинок фольги надо взять 5 пластинок. Получится не-
 сколько меньше 900 пф. 332. 0,048 дж. 333. 0,000031 дж. 335. 2,8 в. 336. 0,005 а.
 337. 2,2 ом. 338. 6 в. 339. 216 в. 340. 121 а, 103 в. 341. 21 ом. 342. $28 \cdot 10^{-8}$ ом · м.
 343. 0,54 ом, 67 мм². 344. 40 мм². 345. 3,5 м. 346. 550 000 км. 347. 1,14 ом.
 348. Увеличится в 4 раза. 349. 1,07 Т. 351. 69° С. 353. а) 110 в; б) 146 в и 73 в.
 354. 15 ом. 355. Уменьшится в 2,5 раза. 356. 3 ом. 357. В первом случае в 1,5 раза
 больше. 362. а) 4,5 в, 0,9 ом; б) 1,5 в, 0,9 ом; в) 1,5 в, 0,1 ом. 363. Да. 1,4 в, вклю-
 чение согласное; 9,4 в. 364. 6,6 в. 365. При двух генераторах. 366. 17 в. 367.
 0,5 в. 368. 2,5 ом. 369. 3,75 в. 371. 300 а. 372. а) $-1,2$ в и $+0,3$ в. Первый эле-
 мент играет роль источника тока в цепи, а второй потребляет энергию так же,
 как и остальные части внешней цепи; б) увеличится. 373. 36 вт. 374. Увеличится.
 375. Уменьшится на 10%. 376. Нельзя. 377. а) 160 ом; б) 64 ом; в) 480 ом.
 378. 81%. 379. 82%. 380. 22,5 квт. 381. 840 дж. 382. а) 22 коп.; б) 57,6 руб.
 383. 0,16 ом. 384. а) 1 вт; б) 1,12 вт; в) 1 вт; г) 0. 385. 97%. 386. а) Нет, так как
 лампа перегорит; б) перегорит плитка. 387. Нет, так как количество теплоты
 пропорционально квадрату тока. 390. $3 \cdot 10^9$ дж, 720 ккал. 391. $18 \cdot 10^4$ дж,
 43,2 ккал. 392. 1,5 м. 393. 37 мин, 15 коп. 394. ~ 4 а. 395. 820 км/сек. 396.
 0,03 зв. 397. 9100° К. 398. Вниз. 399. На восток. 401. Влево. 402. 4,2 н. 403.
 0,6 н/а · м. 404. $9 \cdot 10^{-4}$ н · м. 406. 8 н. 407. $12 \cdot 10^{-4}$ н/а · м. 408. а) 0 и $2 \cdot 10^{-4}$
 н/а · м; б) $1,4 \cdot 10^{-4}$ н/а · м. 409. 0,0047 н/а · м. 410. 0,002 вб. 411. 0,025 вб.
 412. 0,00314 вб. 413. 80 дж. 414. а) Нет. б) Да. 415. 0,3 дж. 416. 0,82 дж. 417.
 а) 0,04 а; б) 50 см. 418. а) 2 а, 3 а; б) 2 в, 1,5 в. 419. 0,5 в. 420. 0,48 ма. 427. 308 в.
 428. 180 в. 429. 7 а. 430. 357 в. 431. $16 \cdot 10^2$ ом. 432. 0,14 а. 433. 16 ом; 0,94 а.
 434. Повышается. 435. 3750. 436. В квартирах 1 и 2 лампы будут гореть в пол-
 накала, а в квартире 3 — полным накалом. 437. На звезду. 438. 1200 к. 439.
 11 сек. 440. 0,27 мг/к. 441. 17 мг. 442. $8 \cdot 10^{-18}$ н. 443. 330 н. 445. 2 вт. 447.
 а) $2,5 \cdot 10^{-6}$ дж; б) $1,6 \cdot 10^{-5}$ дж. 449. $3,8 \cdot 10^{-8}$ сек. 450. 3,4 мкф. 451. а) 300 м;
 б) 6000 км. 452. 1140 м. 453. 0,000014 гн. 454. 1,28 сек. 455. 75 св. 456. 314 лм.
 457. 12,5 лк, 200 лк. 458. 52 св. 459. 38 лк. 460. 30 лк. 461. 15 св. 463. 45°, 30°, 0°.
 465. Под углом 65° к горизонту. 466. 6 рад/сек. 467. 3 м. 468. 0,86 м. 469. 40 см,
 80 см. 475. 0,75. 476. 225 000 км/сек. 479. 24°. 490. 20 дп, 0,5 дп. 491. 40 см.
 492. Уменьшится. 494. 20 см. 495. а) 40 см; б) — 120 см. 496. 11 см. 497. 4,8 дп.
 498. Тень в виде кольца с наружным диаметром 14 см и внутренним
 2 см. 501. Светлое кольцо с наружным диаметром 10 см и внутренним диаметром
 6 см. 503. Короткофокусный. 504. 14 см, 8 раз. 505. Увеличить на 2,4 см. 506. Изо-
 бражение конькобежца размыто по направлению его движения на 1,6 мм
 508. 2,5 и 25. 509. 16 дп. 510. 234. 511. 68. 515. 24. 516. 53. 517. Объектив
 28,7 см, окуляр 1,3 см. 519. $5,5 \cdot 10^{14}$ гц. 520. В 1,9 раза. 521. 0,5 мк,
 0,57 мк. 525. Свет от встречных фар ослаблен, отраженный свет от своих фар

почти не ослабляется. 528. Из-за отличия фокусного расстояния для света разных длин волн фокусировка имеет место лишь для одной длины волны и возникает расплывчатая кайма дополнительного цвета. 530. На фотопластинку действуют лучи, не воспринимаемые глазом, — ультрафиолетовые, а для специальных сортов фотозмульсий — инфракрасные. 531. 890 *вт*. 532. 60° С. 534. Спектр будет состоять из ряда цветных светлых линий на темном фоне. Положение этих линий соответствует положениям фраунгоферовых линий в спектре Солнца. 535. а) 1,24 *Мэв*; б) 4000 Å = 400 *ммк*. 536. Нет. Энергия фотонов видимого света 3,1 *эв* — 1,8 *эв*, т. е. меньше чем 4,8 *эв*. 537. E_1 и E_2 . Энергия рассеянного электрона 12,6 — (13,6—3,4) = 2,4 *эв* и 12,6 — (13,6—1,51) = 0,51 *эв*. 538. 6,4 *эв*. 539. $\lambda_1 = 1030$ Å, $\lambda_2 = 1210$ Å; $\lambda_3 = 6550$ Å, $\nu_1 = 2,91 \cdot 10^{15}$ *сек*⁻¹, $\nu_2 = 2,46 \cdot 10^{15}$ *сек*⁻¹, $\nu_3 = 0,45 \times 10^{15}$ *сек*⁻¹, $\nu_1 = \nu_2 + \nu_3$. 540. 0,2 Å. 541. $\frac{A}{\lambda} = 2,86 \cdot 10^{-19}$ *дж*. Полезно используемая доля атома Сг (0,8—0,5) (1—0,2—0,3) = 0,15. Общее число атомов Сг = 1,77 · 10¹⁹. Энергия пучка 0,76 *дж*. Мощность 7,6 · 10⁴ *вт*; $E = 7,6 \times 10^9$ *вт/м*².

$$T = \left(\frac{E}{\sigma} \right)^{1/4} = \left(\frac{7,6 \cdot 10^9}{5,7 \cdot 10^{-8}} \right)^{1/4} = 19\,000^\circ \text{ К.}$$

542. $N_\alpha = \frac{238-206}{4} = 8$. $N_\beta = 2N_\alpha - 92 + 82 = 6$. 543. 6400 лет.

544. $Q = 4,05$ *Мэв*. 545. $\pm 4,2 \cdot 10^{-13}$ *кг*. 546. 1,9 *кг*. 547. Число нейтронов 235+1—90—143=3. Импульсы осколков равны (и противоположно направлены).

Кинетическая энергия $E_1 = \frac{p^2}{2M_1}$, $E_2 = \frac{p^2}{2M_2}$, т. е. $\frac{E_1}{E_2} = \frac{M_2}{M_1}$, $E_1 = 98$ *Мэв*,

$E_2 = 62$ *Мэв*, $v_1 = 1,45 \cdot 10^7$ *м/сек*, $v_2 = 0,91 \cdot 10^7$ *м/сек*. 548. 5% по массе.

549. Да; 0,08 *Мэв*. 550. Обозначим массу ракеты Q . Энергия аннигиляции $0,02 Qc^2 = E$. Импульс равен $K = \sqrt{2EM}$; $M = 0,1 Q$. Скорость = $\frac{K}{Q} =$

$$= \sqrt{2 \cdot 0,02 \cdot 0,1c^2} = 2 \cdot 10^7 \text{ м/сек.}$$