

ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ УЧЕБНИК ФИЗИКИ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ
АКАДЕМИКА
Г.С.ЛАНДСБЕРГА

ТОМ II

ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ УЧЕБНИК ФИЗИКИ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ
АКАДЕМИКА
Г. С. ЛАНДСБЕРГА

ТОМ II
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО
И МАГНЕТИЗМ

ИЗДАНИЕ ВОСЬМОЕ, СТЕРЕОТИПНОЕ

*Допущено Министерством
высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для слушателей подготовительных отделений
высших учебных заведений*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1972

530.1

З 45

УДК 530.10 (075.4)

2-3-1
110-72

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму изданию	9
Глава I. Электрические заряды	11
§ 1. Электрическое взаимодействие	11
§ 2. Проводники и изоляторы	13
§ 3. Разделение тел на проводники и изоляторы	16
§ 4. Положительные и отрицательные заряды	18
§ 5. Что происходит при электризации?	20
§ 6. Электронная теория	23
§ 7. Электризация трением	24
§ 8. Электризация через влияние	27
§ 9. Электризация под действием света (фотоэлектрический эффект)	31
§ 10. Закон Кулона	32
§ 11. Единица заряда	36
Глава II. Электрическое поле	39
§ 12. Действие электрического заряда на окружающие тела	39
§ 13. Понятие об электрическом поле	41
§ 14. Напряженность электрического поля	43
§ 15. Сложение полей	45
§ 16. Электрическое поле в диэлектриках и в проводниках	46
§ 17. Графическое изображение полей	48
§ 18. Основные особенности электрических карт	52
§ 19. Применение метода силовых линий к задачам электростатики	53
§ 20. Работа при перемещении заряда в электрическом поле	56
§ 21. Электрическое напряжение, или разность потенциалов	59
§ 22. Эквипотенциальные поверхности	63
§ 23. В чем смысл введения разности потенциалов, или электрического напряжения?	65
§ 24. Условия равновесия зарядов в проводниках	67
§ 25. Электромметр	69
§ 26. В чем различие между электрометром и электроскопом?	72
§ 27. Соединение с Землей	73
§ 28. Измерение разности потенциалов в воздухе. Электрический зонд	75
§ 29. Электрическое поле Земли	76

§ 30. Простейшие электрические поля	78
§ 31. Распределение зарядов в проводнике. Клетка Фарадея	80
§ 32. Поверхностная плотность заряда	84
§ 33. Конденсаторы	85
§ 34. Различные типы конденсаторов	91
§ 35. Параллельное и последовательное соединение конденсаторов	94
§ 36. Диэлектрическая постоянная	96
§ 37. Почему электрическое поле ослабляется внутри диэлектрика? Поляризация диэлектрика	100
§ 38. Энергия заряженных тел (электрического поля)	102
Г л а в а III. Постоянный электрический ток	106
§ 39. Электрический ток и электродвижущая сила	106
§ 40. Признаки электрического тока	112
§ 41. Направление тока	116
§ 42. Величина тока	117
§ 43. «Скорость электрического тока» и скорость движения носителей заряда	119
§ 44. Гальванометр	121
§ 45. Распределение напряжения в проводнике с током	122
§ 46. Закон Ома	124
§ 47. Сопротивление проволок	126
§ 48. Зависимость сопротивления от температуры	129
§ 49. Сверхпроводимость	132
§ 50. Последовательное и параллельное соединение проводников	134
§ 51. Реостаты	137
§ 52. Распределение напряжения в цепи. «Потеря» в проводах	139
§ 53. Вольтметр	141
§ 54. Каким должно быть сопротивление вольтметра и амперметра?	143
§ 55. Шунтирование измерительных приборов	144
Г л а в а IV. Тепловые действия тока	147
§ 56. Нагревание током. Закон Джоуля — Ленца	147
§ 57. Работа, совершаемая электрическим током	148
§ 58. Мощность электрического тока	150
§ 59. Контактная сварка	152
§ 60. Электрические нагревательные приборы. Электрические печи	153
§ 61. Понятие о расчете нагревательных приборов	155
§ 62. Лампы накаливания	157
§ 63. Короткое замыкание. Плавкие предохранители	158
§ 64. Электрическая проводка	161
Г л а в а V. Прохождение электрического тока через электролиты	164
§ 65. Первый закон Фарадея	164
§ 66. Второй закон Фарадея	167
§ 67. Ионная проводимость электролитов	169
§ 68. Движение ионов в электролитах	171
§ 69. Элементарный электрический заряд	172

§ 70. Первичные и вторичные процессы при электролизе	174
§ 71. Электролитическая диссоциация	175
§ 72. Градуировка амперметров при помощи явления электролиза	177
§ 73. Технические применения электролиза	179
Глава VI. Химические и тепловые генераторы тока	183
§ 74. Введение. Открытие Вольта	183
§ 75. Правило Вольта. Гальванический элемент	185
§ 76. Как возникают э. д. с. и ток в гальваническом элементе?	189
§ 77. Поляризация электродов	194
§ 78. Деполяризация в гальванических элементах	196
§ 79. Аккумуляторы	198
§ 80. Закон Ома для замкнутой цепи	201
§ 81. Напряжение на зажимах источника и э. д. с.	203
§ 82. Соединение источников тока	206
§ 83. Термозлементы	211
§ 84. Термозлементы в качестве генераторов	214
§ 85. Измерение температуры с помощью термозлементов	216
Глава VII. Прохождение электрического тока через металлы	220
§ 86. Электронная проводимость металлов	220
§ 87. Строение металлов	223
§ 88. Причина электрического сопротивления	225
§ 89. Поверхностная разность потенциалов	226
§ 90. Испускание электронов накаливаемыми телами	227
Глава VIII. Прохождение электрического тока через газы	230
§ 91. Самостоятельная и несамостоятельная проводимость газов	230
§ 92. Несамостоятельная проводимость газа	231
§ 93. Искровой разряд	235
§ 94. Молния	239
§ 95. Коронный разряд	240
§ 96. Применения коронного разряда	242
§ 97. Грозоотвод	244
§ 98. Электрическая дуга	245
§ 99. Применение дугового разряда	248
§ 100. Тлеющий разряд	249
§ 101. Что происходит при тлеющем разряде?	251
§ 102. Катодные лучи	252
§ 103. Природа катодных лучей	254
§ 104. Каналовые лучи	260
§ 105. Электронная проводимость в высоком вакууме	261
§ 106. Электронные лампы (радиолампы)	262
§ 107. Электроннолучевая трубка	266
Глава IX. Прохождение электрического тока через полупроводники	269
§ 108. Природа электрического тока в полупроводниках	269
§ 109. Движение электронов в полупроводниках. Полупроводники с электронной и «дырочной» проводимостью	274

§ 110. Полупроводниковые выпрямители	279
§ 111. Полупроводниковые фотоэлементы	284
Г л а в а X. Основные магнитные явления	286
§ 112. Естественные и искусственные магниты	286
§ 113. Полюсы магнита и его нейтральная зона	289
§ 114. Магнитные действия электрического тока	292
§ 115. Магнитные действия токов и постоянных магнитов одинаковы	295
§ 116. Происхождение магнитного поля постоянных магнитов. Опыт Кулона	302
§ 117. Гипотеза Ампера об элементарных электрических токах	306
Г л а в а XI. Магнитное поле	309
§ 118. Магнитное поле и его проявления	309
§ 119. Напряженность магнитного поля. Единица напряженности	310
§ 120. Как действует магнитное поле на стрелку?	311
§ 121. Измерение напряженности магнитного поля с помощью стрелки	314
§ 122. Сложение магнитных полей	317
§ 123. Силовые линии магнитного поля	318
§ 124. Приборы для измерения напряженности магнитного поля	320
Г л а в а XII. Магнитные поля электрических токов	322
§ 125. Магнитное поле прямолинейного тока и кругового витка. Правило буравчика	322
§ 126. Магнитное поле соленоида. Эквивалентность соленоида и полосового магнита.	325
§ 127. Магнитное поле внутри соленоида как эталонное поле. Единица напряженности магнитного поля	328
§ 128. Магнитное поле движущихся зарядов	332
Г л а в а XIII. Магнитное поле Земли	334
§ 129. Магнитное поле Земли	334
§ 130. Элементы земного магнетизма	336
§ 131. Магнитные аномалии и магнитная разведка полезных ископаемых	340
§ 132. Изменение элементов земного магнетизма с течением времени. Магнитные бури	340
Г л а в а XIV. Силы, действующие в магнитном поле на проводники с током	342
§ 133. Введение	342
§ 134. Действие магнитного поля на прямолинейный ток. Правило левой руки	342
§ 135. Действие магнитного поля на виток или соленоид, по которому проходит ток	348
§ 136. Гальванометр, основанный на взаимодействии магнитного поля и тока	354

§ 137. Силы Лорентца	356
§ 138. Силы Лорентца и полярные сияния	360
Г л а в а XV. Электромагнитная индукция	363
§ 139. Условия возникновения индуцированного тока . .	363
§ 140. Направление индуцированного тока. Правило Ленца .	369
§ 141. Электродвижущая сила индукции	374
§ 142. Количественный закон электромагнитной индукции . .	376
§ 143. Электромагнитная индукция и силы Лорентца . . .	380
§ 144. Индуцированные токи в сплошных проводниках (токи Фуко)	382
Г л а в а XVI. Магнитные свойства тел	386
§ 145. Магнитная проницаемость железа.	386
§ 146. Магнитная проницаемость различных тел. Тела парамагнитные и диамагнитные	390
§ 147. Движение парамагнитных и диамагнитных тел в магнитном поле. Опыты Фарадея.	393
§ 148. Молекулярная теория магнетизма	395
§ 149. Магнитная защита	396
§ 150. Особенности ферромагнитных тел.	399
§ 151. Основы теории ферромагнетизма	403
Г л а в а XVII. Переменный ток	406
§ 152. Постоянная и переменная электродвижущая сила . . .	406
§ 153. Опытное исследование формы переменного тока. Осциллограф	411
§ 154. Амплитуда, частота и фаза синусоидального переменного тока и напряжения	414
§ 155. Величина переменного тока	418
§ 156. Амперметры и вольтметры переменного тока	419
§ 157. Самоиндукция	420
§ 158. Индуктивность катушки	423
§ 159. Прохождение переменного тока через конденсаторы и катушки с большой индуктивностью	425
§ 160. Закон Ома для переменного тока. Емкостное и индуктивное сопротивление	429
§ 161. Сложение токов при параллельном включении сопротивлений в цепь переменного тока.	432
§ 162. Сложение напряжений при последовательном соединении сопротивлений в цепи переменного тока	436
§ 163. Сдвиг фазы между током и напряжением	437
§ 164. Мощность переменного тока	443
§ 165. Трансформаторы	445
§ 166. Централизованное производство и распределение электрической энергии	451
§ 167. Выпрямление переменного тока	456
Г л а в а XVIII. Электрические машины: генераторы, двигатели, электромагниты	461
§ 168. Генераторы переменного тока	461
§ 169. Генераторы постоянного тока	466

§ 170. Генераторы с независимым возбуждением и динамомашины	474
§ 171. Трехфазный ток	480
§ 172. Трехфазный электродвигатель (электромотор)	486
§ 173. Электродвигатели (моторы) постоянного тока	495
§ 174. Основные рабочие характеристики и особенности двигателей постоянного тока с параллельным и последовательным возбуждением	499
§ 175. Коэффициент полезного действия генераторов и двигателей	506
§ 176. Обратимость электрических генераторов постоянного тока	507
§ 177. Электромагниты	508
§ 178. Применение электромагнитов	510
§ 179. Реле и их применения в технике и автоматике	513
Ответы и решения к упражнениям	515
Список таблиц	
1. Диэлектрические постоянные некоторых веществ	98
2. Удельное сопротивление некоторых веществ при 0° С . . .	129
3. Среднее значение температурных коэффициентов сопротивления $\alpha_{ср}$ некоторых проводников	132
4. Максимальная допустимая нагрузка обмотки в нагревательных приборах и реостатах	156
5. Электрохимические эквиваленты некоторых веществ . . .	166
6. Термоэлектродвижущие силы некоторых пар	213
7. Значения магнитной проницаемости μ для некоторых парамагнитных и диамагнитных веществ	391
8. Преимущества, недостатки и области применения двигателей различных типов	505

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Основные соображения, руководившие нами при подготовке 2-го издания «Элементарного учебника физики», изложены в предисловии, предпосланном первому тому. Настоящий 2-й том Учебника содержит в основном тот же материал, что и соответствующий том первого издания. Однако том этот подвергся довольно значительной переработке.

Введена новая глава — «Прохождение электрического тока через полупроводники», которая в элементарной форме знакомит с основными физическими явлениями в полупроводниках и важнейшими техническими применениями полупроводников (выпрямители и фотоэлементы). В настоящее время, когда значение полупроводников в науке и технике возрастает с каждым днем, нет надобности объяснять необходимость введения этой главы в «Элементарный учебник физики». Сильно расширены и переработаны две последние главы учебника, представляющие собой краткое изложение физических основ электротехники. В новую программу средней школы в связи с поисками путей политехнизации введен курс электротехники.

Указанные главы нашего учебника отнюдь не ставят задачей излагать *электротехнические* вопросы как таковые. Но мы стремились в возможно доступной форме дать основные *физические принципы* учения о переменных токах, генераторах и электродвигателях. В ряде других глав изменен порядок изложения, написан заново или сильно переработан ряд параграфов. Много внимания уделено выяснению вопроса об электродвижущей (или электроразделительной) силе. Хотя в первом издании целая глава носила название «Электродвижущая сила», но она представляла собой главным образом описание разных типов химических и термиче-

ских генераторов тока, а само понятие электродвижущей силы не получило достаточно полного разъяснения. В новом издании мы попытались углубить изложение этого вопроса, выделив описание тепловых и химических генераторов тока в отдельную главу. Глава «Прохождение электрического тока через электролиты» содержит весь относящийся сюда материал, тогда как в первом издании законы электролиза были распределены между III и VI главами. Добавлен параграф о первичных и вторичных процессах при электролизе и вся глава предшествует главе, посвященной току в металлах, поскольку механизм прохождения тока через электролиты более нагляден. В главе I добавлен параграф, поясняющий механизм явления «электризации трением». В главе III введен параграф «Скорость электрического тока и скорость движения носителей заряда» и сделана попытка дать более ясное представление о смысле существования проводников с сопротивлением, равным нулю. Глава VIII начинается с параграфов, посвященных выяснению понятий о самостоятельной и несамоостоятельной проводимости газов, что позволяет более ясно изложить вопрос о разных формах прохождения электрического тока через газы. В главе XVI добавлен параграф об основах теории ферромагнетизма. Изложение в ряде мест изменено и переработано, добавлен ряд новых упражнений. Все эти изменения, по нашему мнению, делают настоящий 2-й том Учебника более «современным».

Главная работа по переработке этого тома лежала на Л. А. Тумермане, который вместе с С. Г. Калашниковым является автором первого издания этого тома. Большую помощь в редакционной работе над этим томом оказала Е. Л. Старокадомская. Общее редактирование всего тома выполнено, как и ранее, мною.

Гр. Ландсберг

Москва, 28/VIII 1956 г.

ГЛАВА I

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ

§ 1. Электрическое взаимодействие. Подвесим на шелковой нити легкий грузик, например бумажную гильзу. Потрем о шелковую материю стеклянную палочку и поднесем ее к нашему грузику.

Мы увидим, что гильза сначала притянется к стеклянной палочке, но затем, после соприкосновения со стеклом, будет от него отталкиваться (рис. 1).

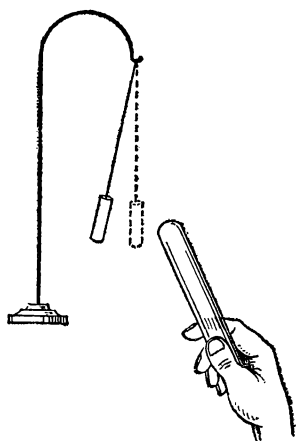


Рис. 1. Бумажная гильза отталкивается от зарядившей ее стеклянной палочки.

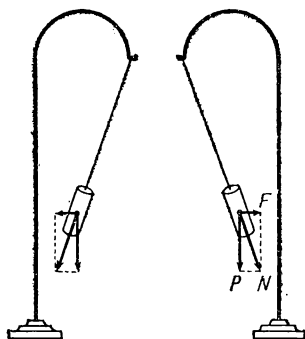


Рис. 2. Две подвешенные на шелковинках бумажные гильзы, заряженные от стеклянной палочки, отталкиваются друг от друга. Показано разложение силы N , действующей на гильзу и уравнивающей натяжение нити: P — вес гильзы, F — электрическая сила.

Прикоснемся теперь той же натертой стеклянной палочкой к другой такой же гильзе, уберем стекло и приблизим гильзы друг к другу. Они оттолкнутся друг от друга и отклонятся в разные стороны (рис. 2).

До соприкосновения с натертой стеклянной палочкой подвешенные грузики под действием силы тяжести и натяжения нити оказывались в вертикальном положении. Теперь их положение равновесия иное. Следовательно, кроме уже упомянутых сил, теперь на грузики действуют еще какие-то силы. Силы эти отличны от сил тяжести, от сил, возникающих при деформации тел, от сил трения и других сил, изучавшихся нами в механике. В только что описанных простых опытах мы встречаемся с проявлением новых сил, которые получили название электрических.

Тела, которые действуют на окружающие предметы электрическими силами, мы называем электризованными, или заряженными, и говорим, что в этих телах находятся электрические заряды.

В описанных опытах мы заряжали стекло посредством трения о шелк. Мы могли бы, однако, вместо стекла выбрать

сургуч, эбонит, плексиглас, янтарь и заменить шелковую материю кожей, резиной и другими предметами. Опыт показывает, что посредством трения можно зарядить всякое тело.

На явлении электрического отталкивания заряженных тел основано устройство электроскопа — прибора для обнаруживания электрических зарядов. Он состоит из металлического стержня, к которому привешен весьма тонкий алюминиевый или бумажный листочек

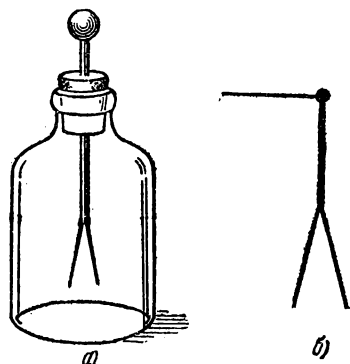


Рис. 3. Простой электроскоп: а) общий вид; б) схематическое изображение.

(иногда два листочка, рис. 3, а). Стержень укреплен при помощи эбонитовой или янтарной пробки внутри стеклянной банки, предохраняющей листок от движения воздуха. На рис. 3, б дано схематическое изображение электроскопа, которым мы и будем пользоваться в дальнейшем.

Коснемся стержня электроскопа заряженным телом, например натертой стеклянной палочкой. Его листочек оттолкнется от стержня (или от другого листочка) и отклонится на некоторый угол. Если теперь удалить заряженное стекло,

то листочек останется все-таки отклоненным, а это значит, что при соприкосновении с заряженным телом на стержень и листочек электроскопа переходит некоторый заряд.

Зарядим электроскоп при помощи стеклянной палки, заметим отклонение его листочка, коснемся электроскопа еще раз новым местом заряженного стекла и опять уберем палку. Отклонение листочка увеличится. После третьего касания оно будет еще больше, и т. д. Мы видим, что электрические силы, обуславливающие отклонения листочка, могут быть и больше и меньше, а, следовательно, и заряд на электроскопе может быть больше или меньше. Таким образом, можно говорить о величине заряда, находящегося на том или ином теле, в нашем примере — на электроскопе.

§ 2. Проводники и изоляторы. Мы видели в предыдущих опытах, что, прикасаясь заряженным телом к незаряженным предметам, мы сообщаем им электрический заряд. Мы пользовались этим, когда заряжали электроскоп. Таким образом, электрические заряды могут переходить с одного тела на другое.

Электрические заряды могут также и перемещаться по телу. Так, например, когда мы заряжали электроскоп, мы касались стеклянной палкой верхнего конца металлического стержня. Тем не менее и нижний конец стержня и листочек, прикрепленный к этой части стержня, оказывались заряженными; а это значит, что заряды перемещались вдоль всего стержня.

Однако перемещение зарядов по различным телам происходит различно. Рассмотрим следующий опыт: расположим на некотором расстоянии друг от друга два электроскопа, зарядим один из них и соединим стержни электроскопов куском медной проволоки, держа последнюю при помощи двух шелковых нитей (рис. 4, а). Отклонение листочков заряженного электроскопа немедленно уменьшится, и одновременно с этим листочки второго электроскопа отклонятся, обнаруживая появление заряда. Электрические заряды легко перемещаются вдоль медной проволоки.

Повторим теперь этот опыт, но используем вместо медной проволоки шелковую нить (рис. 4, б). При этом концы нити можно держать непосредственно в руках. Мы увидим, что в этом случае заряженный электроскоп будет долго сохранять неизменной величину своего заряда, а второй

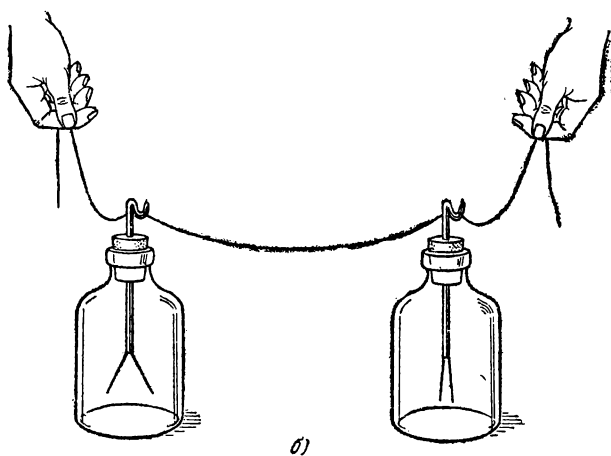
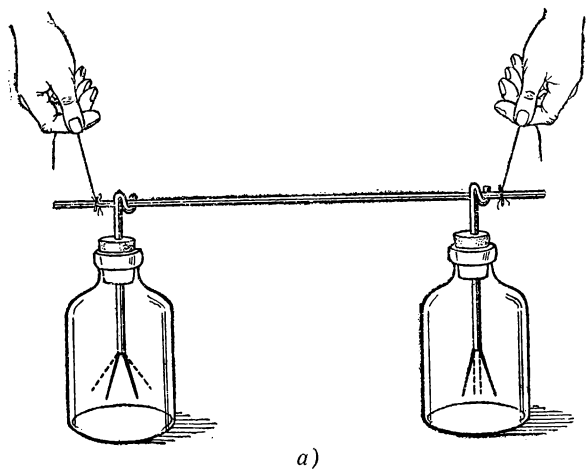


Рис. 4. а) Электрические заряды легко перемещаются вдоль металлической проволоки: при соединении электрометров проволокой заряд левого электрометра уменьшается, а правого увеличивается. б) Электрические заряды не проходят сквозь шелковую нить: при соединении электрометров шелковой нитью левый электрометр сохраняет заряд, а правый остается незаряженным.

электроскоп будет оставаться по-прежнему незаряженным. Электрические заряды не могут перемещаться вдоль шелковой нити. Сделав тот же опыт с обыкновенной (белой бумажной) ниткой, мы получим промежуточный результат: заряд будет переходить с одного электроскопа на другой, но очень медленно ¹⁾).

Вещества, по которым электрические заряды легко перемещаются, мы называем **проводниками**. Вещества, не обладающие этим свойством, называются **изоляторами**, или **диэлектриками**.

Хорошими проводниками являются все металлы: водные растворы солей и кислот и многие другие вещества. Хорошей проводимостью обладают также раскаленные газы: если приблизить к заряженному электроскопу пламя горелки, то воздух вокруг электроскопа делается проводящим, заряд с электроскопа переходит на окружающие тела и листочки быстро спадают (рис. 5).

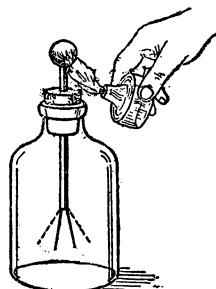


Рис. 5. Листочки электроскопа быстро спадают при поднесении пламени.

Проводником, хотя и не очень хорошим, является также человеческое тело. Если прикоснуться к заряженному электроскопу, то электроскоп разряжается, и его листочек падает. Мы говорим при этом, что заряд электроскопа через наше тело, пол и стены комнаты «уходит в землю». В § 27 мы разберем подробнее, что при этом происходит.

Примерами хороших изоляторов являются янтарь, фарфор, стекло, эбонит, резина, шелк и газы при комнатных температурах. Отметим, что многие твердые изоляторы, например стекло, **х о р о ш о и з о л и р у ю т** только в **с у х о м** воздухе и делаются плохими изоляторами, если влажность воздуха велика. Это объясняется тем, что во влажном воздухе на поверхности изоляторов может образоваться проводящая пленка воды. Осторожным нагреванием эту пленку можно удалить, после чего изолирующая способность снова восстанавливается.

¹⁾ Если вместо белой нитки взять черную, то заряд будет переходить с одного электроскопа на другой гораздо быстрее, потому что черная краска, которой окрашена нитка, сама является веществом, в котором заряд перемещается довольно легко.

Когда в каком-либо теле происходит перемещение зарядов, мы говорим, что в этом теле имеется **э л е к т р и ч е с к и й т о к**. Так, например, при соединении электроскопов в медной проволоке (рис. 4, а) возникает кратковременный электрический ток, который принципиально ничем не отличается от тока в осветительной проводке или в трамвайном проводе.

В современных применениях электричества и проводники, и изоляторы играют огромную роль. Металлические провода линии электропередачи представляют собой те «каналы», по которым мы заставляем двигаться заряды. При этом важно, чтобы в местах крепления проводов заряды не уходили с проводов в окружающие предметы. Поэтому провода всегда располагаются на специальных изолирующих креплениях — «изоляторах», без которых современные линии электропередачи были бы невозможны.

§ 3. Разделение тел на проводники и изоляторы. Мы говорили, что стекло не проводит электричества. Однако это утверждение нельзя понимать безоговорочно. Тщательное наблюдение показывает, что через стекло, равно как и через всякий другой «изолятор», могут проходить электрические заряды. Однако при одних и тех же условиях через тела, именуемые изоляторами, проходит за тот же срок **н е с р а в н е н н о м е н ь ш и й** электрический заряд, чем через проводники тех же размеров и формы. Когда мы говорим, что какое-либо вещество является изолятором, то это значит только, что **п р и д а н н ы х е г о п р и м е н е н и я х** мы можем пренебречь проходящими через него зарядами.

Так, например, через янтарную пробку электроскопа, несмотря на то, что янтарь является наилучшим из известных изоляторов, все же проходит некоторое количество электричества. Однако заряд, прошедший через пробку за время эксперимента, всегда бывает ничтожно мал по сравнению с полным зарядом электроскопа, и поэтому янтарь является подходящим изолятором для электроскопа. Совсем не то наблюдалось бы в электроскопе с изоляцией из фарфора. В этом случае заряды, утекающие через фарфоровую пробку за несколько минут опыта, были бы сравнимы с зарядом электроскопа, и мы увидели бы, что листок электроскопа заметно опадает. Фарфор является недостаточным изолятором для этих целей. Однако тот же фарфор оказы-

вается прекрасным материалом для технических изоляторов, так как заряд, проходящий через изолятор за некоторый промежуток времени, ничтожно мал по сравнению с огромными зарядами, протекающими через провода за то же время. Мы видим, что разделение на проводники и изоляторы — условно. И может даже оказаться, что одно и то же вещество в одних случаях должно рассматриваться как изолятор, а в других случаях — как проводник.

До сравнительно недавнего времени в электротехнике применялись почти исключительно либо металлы, по которым заряд распространяется чрезвычайно легко, либо вещества с очень высокими изолирующими свойствами — такие, как фарфор, стекло, эбонит, янтарь и т. п. Из металлов изготавливаются провода, из изоляторов — опоры, предотвращающие утечку заряда с проводов. Подавляющее большинство тел природы не принадлежит, однако, ни к той, ни к другой группе; эти тела являются так называемыми полупроводниками, т. е. по своим свойствам занимают промежуточное положение между очень хорошими проводниками и очень хорошими изоляторами. Они мало пригодны поэтому и для изготовления проводов и для изолирующих опор. Однако в последние десятилетия обнаружен и изучен ряд совершенно особых свойств полупроводников, что открыло возможность чрезвычайно важных и многообещающих применений их в различных областях науки и техники. Подробнее об этих свойствах полупроводников будет сказано в гл. IX.

Изолирующие свойства вещества зависят также от его состояния и могут сильно изменяться. На рис. 6 изображен опыт, показывающий, что стекло совершенно утрачивает изолирующие свойства при высокой температуре. Разрежем один из проводов, идущих к электрической лампочке, и, считив изоляцию, прикрутим образовавшиеся концы к стеклянной палочке. При включении лампочка не накаливается, так как при комнатной температуре стекло является достаточно хорошим изолятором. Если, однако, сильно нагреть стеклянную палочку при помощи горелки, лампочка начинает светиться; следовательно, через нагретую стеклянную палочку ток проходит. При этом можно наблюдать еще одно явление. Электрический ток, проходя через стеклянную палочку, сам нагревает ее, притом тем значительно, чем сильнее ток. Поэтому если взять лампочку достаточно мощ-

ную, т. е. такую, что через нее может проходить сильный электрический ток, то этот электрический ток будет сильно разогревать палочку. Горелку можно будет убрать, а стекло останется горячим и хорошо проводящим; нагревание стекла все время увеличивается, и в конце концов стекло расплавится.

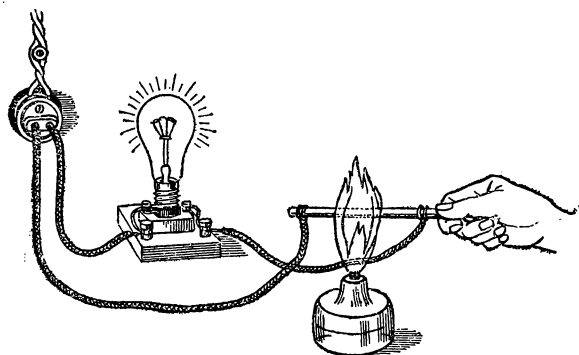


Рис. 6. При разогревании стекло становится проводником и лампочка начинает светиться.

§ 4. Положительные и отрицательные заряды. Зарядим при помощи стеклянной палки, потертой о шелк, легкую

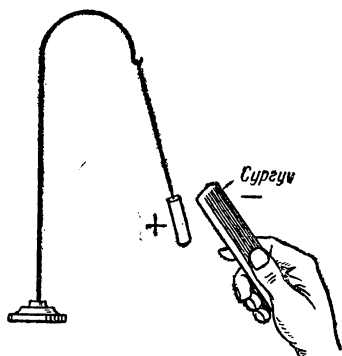


Рис. 7. Бумажная гильза, заряженная от стекла, притягивается к наэлектризованному сургучу.

гильзу, подвешенную на шелковинке, и поднесем к ней кусок сургуча, заряженного трением о шерсть. Гильза будет притягиваться к сургучу (рис. 7). Однако мы видели (§ 1), что эта же подвешенная гильза отталкивается от зарядившего ее стекла. Это показывает, что заряды, возникающие на стекле и сургуче, различаются по качеству.

Следующий опыт показывает это еще нагляднее. Зарядим два одинаковых по размерам и устройству электроскопа при помощи стеклянной палки и соединим их стержни металлической проволокой, держа последнюю за изоли-

рующую ручку. Если электроскопы вполне одинаковы, то после соединения их отклонения делаются равными, указывая этим, что полный заряд распределяется поровну между обоими электроскопами. Зарядим теперь один из электроскопов при помощи стекла, а другой — при помощи сургуча, и притом до одинакового отклонения листочков, и опять соединим их (рис. 8). Мы найдем, что оба электроскопа окажутся вовсе не заряженными, а значит, заряды стекла и заряды сургуча, взятые в равных количествах, нейтрализуют, или компенсируют друг друга.

Если бы в этих опытах мы использовали другие заряженные тела, то нашли бы, что часть из них действует как заряженное стекло, т. е. они отталкиваются от зарядов стекла и притягиваются к зарядам сургуча, а остальные — как заряженный сургуч, т. е. они притягиваются к зарядам стекла и отталкиваются от зарядов сургуча. Несмотря на обилие различных веществ, в природе существует только два разных рода электрических зарядов.

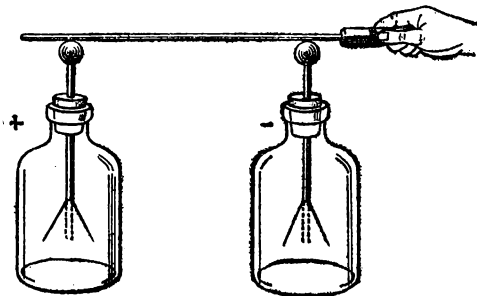


Рис. 8. Если два одинаковых электроскопа, заряженных разноименными зарядами, соединить проводником, то они оба разряжаются: равные количества разноименных зарядов при соединении не дают никакого заряда.

Мы видим, что заряды стекла и сургуча могут компенсировать друг друга. Но величинам, которые при сложении уменьшают друг друга, принято приписывать разные знаки. Поэтому условились приписывать и электрическим зарядам не только величину, но и знак, разделяя заряды на положительные и отрицательные (рис. 8).

Положительно заряженными называют тела, которые действуют на другие заряженные предметы так же, как

стекло, наэлектризованное трением о шелк. Отрицательно заряженными называют тела, которые действуют так же, как суреуч, наэлектризованный трением о шерсть. Из опытов, описанных выше, следует, что одноименные заряды отталкиваются, разноименные — притягиваются¹⁾.

У п р а ж н е н и я. 4.1. К электроскопу, заряженному при помощи сургучной палочки, прикасаются заряженным стеклом. Как изменится отклонение листочка?

4.2. При натирании о шелк латунного стержня, зажатого в руке, последний не электризуется. Если, однако, произвести этот опыт, изолировав стержень от руки, например, обернув его в резину, на нем возникают заряды. Объясните различие результатов в этих двух опытах.

4.3. Каким образом, имея под руками горелку, можно удалить электрические заряды с изолятора, например, с наэлектризованной стеклянной палочки?

4.4. Станьте на деревянную доску, положенную на четыре изолирующие подставки, например на крепкие стеклянные стаканы, возьмите в руку кусок меха и начните бить мехом по деревянному столу. При поднесении руки ваш товарищ может извлечь из вашего тела искру. Объясните, что при этом происходит.

4.5. Как доказать на опыте, что шелк при трении о стекло электризуется и притом отрицательно?

§ 5. Что происходит при электризации? До сих пор мы совершенно не интересовались тем, что именно происходит с телом, когда мы создаем на нем электрические заряды. Сейчас мы рассмотрим, это подробнее.

Прежде всего покажем, что при электризации заряжаются **о б а т е л а**. Для этого укрепим на хорошо изолирующих ручках две пластинки: эбонитовую и деревянную, оклеенную сукном. Для более точного суждения о величине заряда пластинок мы будем не просто касаться ими стержня электроскопа, а предварительно укрепим на электроскопе металлическое ведерко (рис. 9). В § 31 мы увидим, что если внести заряженное тело **в н у т р ь** замкнутой проводящей полости, даже не касаясь телом ее стенок, то на внешней поверхности полости появляется заряд, в точности равный внесенному внутрь заряду. Приблизительно это будет верно и для полости с небольшим отверстием, например для узкого высокого ведерка.

Поместим каждую из пластинок в ведерко. Электроскоп не дает отклонения; это доказывает, что обе пластинки **вн**

¹⁾ Выбор названия «положительный для зарядов, возникающих на стекле, и «отрицательный» — для зарядов на сургуче совершенно случаен.

чале незаряжены. Затем потрем пластинки друг о друга и будем снова вносить их по р о з н ь в ведерко. При внесении к а ж д о й пластинки электроскоп обнаружит большое отклонение, указывающее, что при трении зарядились как эбонит, так и сукно.

Внесем теперь о б е потертые друг о друга пластинки в ведерко электроскопа одновременно. Электроскоп не будет давать никакого отклонения. Если, однако, удалить какую-либо из пластинок, оставив вторую внутри ведерка, электроскоп даст большой отброс, указывающий, что каждая из пластинок по-прежнему сильно заряжена. То обстоятельство, что при помещении в ведерко двух заряженных пластинок электроскоп не обнаруживает заряда, означает, что заряды обеих пластинок в точности равны по абсолютной величине, но противоположны по знаку, так что с у м м а з а р я д о в о б е и х пластинок и после электризации равна нулю.

Этот важный опыт наводит на мысль, что ни положительные, ни отрицательные заряды не создавались при трении; они были в каждой из наших пластинок уже до опыта, но в равных количествах и поэтому не могли быть обнаружены. Электризация сводится к тому, что положительные и отрицательные заряды каким-то образом разделяются, так что на одной пластинке (сукно) оказывается избыток положительных зарядов, а на другой (эбонит) — такой же избыток отрицательных зарядов. Поэтому хотя каждая из пластинок заряжена, но общая

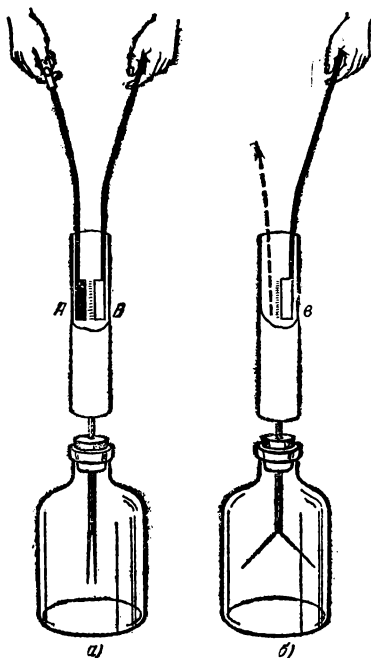


Рис. 9. а) В ведерко электроскопа внесены эбонитовая пластинка А и покрытая сукном пластинка В, заряженные противоположно. Электроскоп не дает никакого отклонения. б) При удалении одной из пластинок листочки электроскопа расходятся.

сумма положительных и отрицательных зарядов по-прежнему равняется нулю.

В дальнейших главах мы покажем, что представление об электризации как о разделении зарядов действительно правильно. Мы увидим, что отрицательное электричество существует в природе в виде мельчайших частичек — электронов. Масса отдельного электрона ничтожно мала и составляет приблизительно $\frac{1}{2000}$ долю массы водородного атома. Поэтому можно придать телу или отнять от него очень большое количество электронов без заметного изменения его массы.

В настоящее время также известно, что в состав любого атома входит определенное количество электронов. Такой атом в естественном состоянии не кажется нам заряженным, так как внутри него имеется еще и положительная заряженная часть — атомное ядро, представляющее основу всякого атома. При этом сумма отрицательных зарядов всех электронов по величине в точности равна положительному заряду ядра (рис. 10, а).

Если однако, тем или иным способом мы удалим из атома один или несколько электронов, то у атома окажется избыток положительного заряда; другими словами, он будет заряжен положительно. Атом в таком состоянии называется

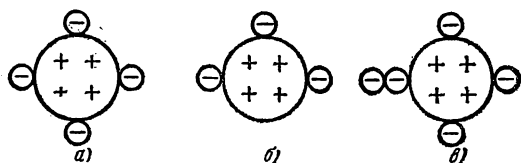


Рис. 10. Очень грубые схемы: а) нейтрального атома; б) положительного иона; в) отрицательного иона.

положительным ионом. (рис. 10, б). Точно так же, если в атом попадут избыточные электроны, мы получим отрицательно заряженный атом, или отрицательный ион (рис. 10, в). Процесс электризации представляет собой либо отделение, либо перенесение на тело электронов или ионов. При этом ясно, что при электризации любого тела должен всегда возникнуть заряд и на каком-либо другом теле, и притом одинаковый по величине, но противоположный по знаку. Именно это мы и наблюдали в описанных опытах.

§ 6. Электронная теория. Теория, объясняющая различные электрические свойства тел присутствием в них электронов и их движением, носит название **э л е к т р о н н о й т е о р и и**. Эта теория очень просто и весьма наглядно объясняет многие электрические явления и поэтому при изучении электричества целесообразно с самого же начала ввести электронные представления. Разберем с этой точки зрения некоторые опыты, описанные выше.

В § 2 мы видели, что через металлы и другие проводники заряды могут легко переходить с одного тела на другое. Это значит, что в проводниках электрические частицы могут свободно перемещаться. И обратно: всякое тело, в котором электрические частицы могут легко перемещаться, должно оказаться хорошим проводником. Наоборот, из того факта, что стекло плохо проводит электричество, мы можем заключить, что внутри стекла (и других изоляторов) перемещение электрических частиц от одного места к другому весьма затруднено. В хорошо проводящих растворах, например растворах поваренной соли, легко перемещаются как положительные, так и отрицательные ионы. Наоборот, в металлах ни положительные, ни отрицательные ионы передвигаться не могут, и единственными переносчиками заряда в металлах являются **э л е к т р о н ы**. Эти электроны, свободно перемещающиеся по металлу, называют иногда **с в о б о д н ы м и э л е к т р о н а м и**, или **э л е к т р о н а м и п р о в о д и м о с т и**.

Когда мы заряжаем какое-нибудь тело, то мы создаем на нем либо недостаток, либо избыток электронов по сравнению с их нормальным количеством, при котором тело незаряжено. При этом электроны **з а и м с т в у ю т с я** от какого-либо другого тела или **у д а л я ю т с я** из нашего тела, но отнюдь не **у н и ч т о ж а ю т с я** и не **с о з д а ю т с я** в н о в ь. Таким образом, явление заряжения и разряжения тел сводится к перераспределению электронов без изменения общего числа их.

Мы знаем, что при соединении заряженного проводника с незаряженным заряд распределяется между обоими телами. С электронной точки зрения это происходит следующим образом. Если первое тело заряжено отрицательно, то электроны под действием взаимного отталкивания переходят на второе тело. Если же первое тело заряжено положительно, то оно притягивает к себе электроны второго тела. В обоих случаях заряд будет уменьшаться на первом теле

и увеличиваться на втором до тех пор, пока вновь не наступит равновесие.

Наконец, мы видели (§ 4), что положительные и отрицательные заряды компенсируют друг друга, так что, соединяя равные количества разноименных зарядов, мы получаем отсутствие всякого заряда. С электронной точки зрения это очевидно: соединяя два проводника, в одном из которых не хватает столько же электронов, сколько их содержится в избытке в другом, мы получим нормальное количество электронов в каждом из проводников, т. е. каждый из проводников окажется незаряженным. Появление положительных и отрицательных зарядов при электризации тел трением представляет более сложный процесс, в деталях еще не вполне выясненный; но и в этом случае дело сводится именно к разделению зарядов, а не к образованию их.

§ 7. Электризация трением. Основной причиной явления, которое мы называем «электризацией трением», является тот факт, что при

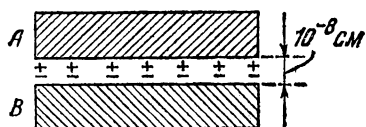


Рис. 11. Возникновение двойного электрического слоя при тесном соприкосновении двух различных тел *A* и *B*.

тесном соприкосновении двух различных тел часть электронов переходит с одного тела, скажем с тела *A* на рис. 11, на другое тело *B*. В результате этого на поверхности первого тела оказывается положительный заряд (не-

достаток электронов), а на поверхности второго тела — отрицательный заряд (избыток электронов). Смещение электронов при этом очень мало, оно равно межуатомным расстояниям в теле, т. е. нескольким стотысячным долям сантиметра (10^{-8} см). Поэтому возникший на границе тел *A* и *B* так называемый двойной электрический слой ничем не проявляет себя во внешнем пространстве. Но если мы тела *A* и *B* раздвинем, то на каждом из них окажется заряд того или иного знака (рис. 12). В этом мы и убеждаемся, внося каждое из этих тел в ведерко электроскопа (рис. 9).

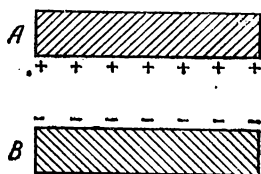


Рис. 12. После раздвижения тел *A* и *B* каждое из них оказывается заряженным.

Говоря о «тесном соприкосновении» двух тел, мы имели в виду такое сближение их, при котором расстояние между частицами разных тел становится примерно таким же, как расстояние между атомами или молекулами одного и того же тела. Только при этих условиях возможен «захват» одним телом электронов другого тела и возникновение двойного электрического слоя. Но тела, с которыми мы имеем дело, никогда не бывают идеально гладкими. Поэтому даже тогда, когда мы прижимаем два тела вплотную друг к другу, действительно тесное соприкосновение их в указанном смысле слова имеет место не на всей поверхности тел, а только в отдельных небольших участках. Когда мы трем тела друг о друга, мы увеличиваем число таких участков тесного соприкосновения, в которых происходит электризация, и тем самым увеличиваем общий заряд, который окажется на каждом из тел, когда мы их раздвинем. Только в этом и заключается роль трения, обычные же силы трения никакого участия в процессе «электризации трением» не играют. «Электризация трением» — это название, имеющее только историческое происхождение.

В том, что дело обстоит именно так и что возникновение электрических зарядов при тесном соприкосновении различных тел происходит и тогда, когда трения между этими телами в обычном смысле слова нет, нас убеждает опыт, изображенный на рис. 13.

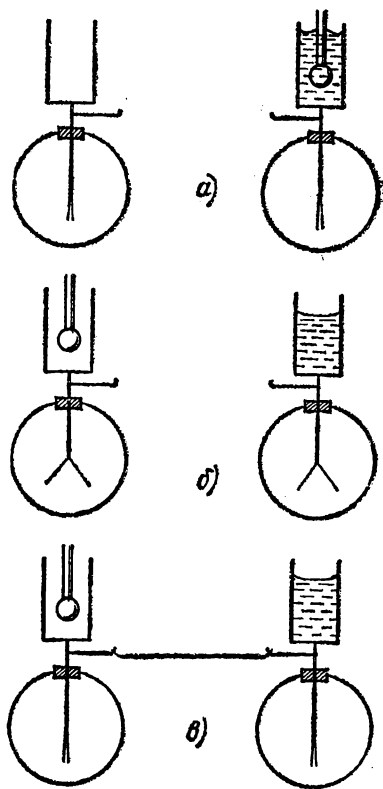


Рис. 13. Электризация воды и парафинового шарика, погруженного в нее. Описание опыта в тексте.

Возьмем два электроскопа и укрепим на стержне каждого из них высокое металлическое ведро, как на рис. 9. В одно из этих ведерок нальем чистую дистиллированную воду и погрузим в нее шарик из парафина, укрепленный на изолирующей ручке (рис. 13, а). Вынув этот шарик из воды, мы увидим, что листочки электроскопа разойдутся (рис. 13, б, справа). Опыт удастся, независимо от того, погрузим мы шарик в воду на малую или на большую глубину и будем ли мы вынимать его из воды медленно или быстро. Это показывает, что заряды возникают при соприкосновении шарика и жидкости и что трение, как таковое, здесь роли не играет.

Перенеся шарик во второй цилиндр (рис. 13, б, слева), мы увидим, что листки второго электроскопа расходятся, т. е. шарик приобрел электрический заряд при соприкосновении с водой. Соединим теперь наши электроскопы проволокой (рис. 13, в); листки обоих электроскопов опадают, и это показывает, что заряды, приобретенные водой и шариком, равны по величине и противоположны по знаку.

Разделение зарядов и возникновение двойного электрического слоя имеет место при соприкосновении всяких двух различных тел: изоляторов или проводников, твердых тел, жидкостей или газов. Мы увидим дальше (§ 76), какое значение имеет этот факт для объяснения ряда важных явлений, в том числе действия гальванических элементов. Почему же, описывая явления электризации трением, мы всегда брали для опыта только хорошие изоляторы — янтарь, стекло, шелк, эбонит и т. п.? Причина этого заключается в том, что в изоляторах заряд остается на том месте, где он возник, и не может через всю поверхность тела перейти на другие соприкасающиеся с данным телом предметы. Впрочем, одно из натираемых тел могло бы быть и куском металла, укрепленным на изолирующей ручке. Однако наш опыт электризации трением не удался бы, если бы оба трущиеся друг о друга тела были металлами, даже если бы оба эти тела были изолированы. Причина заключается в том, что мы практически не можем отделить наши тела одно от другого сразу по всей поверхности. Вследствие неизбежной их шероховатости в момент отрыва всегда будут оставаться какие-то последние точки соприкосновения, и так как электроны свободно движутся через металл, то через эти «мостики» в последний момент все избыточные электроны перетекут с одного куска металла на другой, и оба они окажутся незаряженными.

У п р а ж н е н и я . 7.1. Почему при расчесывании волос пластмассовым гребнем в сухом воздухе волосы «прилипают» к гребню (при этом иногда слышно легкое потрескивание, а в темноте удается наблюдать и маленькие искорки, проскакивающие между волосами и гребнем)?

7.2. Прижмите к теплой кафельной печи лист бумаги и потрите его ладонями. Лист пристанет к поверхности печи. При отрывании слышен треск, и в темноте видны искры между бумагой и печкой. Объясните явление. Почему опыт обычно не удается с холодной нетопленной печью (обратите внимание на сказанное в § 2)?

§ 8. Электризация через влияние. «Электризация трением» не является единственным способом отделения электронов от положительных ионов. Мы рассмотрим в этом и следующем параграфе два новых метода разделения зарядов и получения на телах заряда того или иного знака.

Повторим снова опыт зарядки электроскопа, описанный в § 1, и будем внимательно следить за тем, в какой именно момент листочки электроскопа начинают расходиться. Мы увидим, что это происходит еще до того, как заряженное тело коснется стержня прибора. Это показывает, что проводник заряжается не только при контакте с заряженным телом, но даже и в том случае, когда оно находится на некотором расстоянии. Исследуем подробнее это явление.

Подвесим на изолированном проводнике легкие полоски бумаги (рис. 14). Если вначале проводник не заряжен, бумажки будут в неотклоненном положении. Приблизим теперь к проводнику изолированный металлический шар C , сильно заряженный, например, при помощи стеклянной палки. Мы увидим, что бумажки, подвешенные у концов тела, в точках A и B , отклоняются, хотя заряженное тело и не касается проводника. Наш проводник зарядился через влияние, отчего и само явление получило название **заряджения через влияние**, или **электри-**

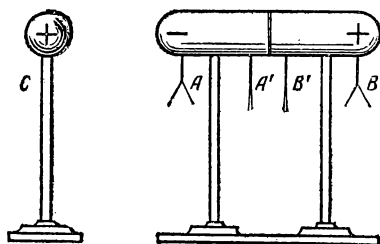


Рис. 14. Электризация через влияние. Два металлических изолированных цилиндра A и B , составленных вместе, образуют один проводник. При приближении заряженного шара C бумажки на A и B отклоняются, что указывает на появление зарядов на концах проводника A и B . Бумажки, подвешенные у середины проводника, в точках A' и B' , не расходятся. Здесь заряда нет.

ческой индукции. Заряды, полученные посредством электрической индукции, называют наведенными, или индуцированными. Бумажки, подвешенные у середины тела, в точках A' и B' , не отклоняются. Значит, индуцированные заряды возникают только на концах нашего тела, а середина его остается нейтральной, или незаряженной. Поднося к бумажкам A и B наэлектризованную стеклянную палочку, легко убедиться, что бумажки B от нее отталкиваются, а бумажки A притягиваются. Это значит, что на удаленном конце проводника возникает заряд того же знака, что и на шаре, а на близлежащих частях возникают заряды другого знака. Удалив заряженный шар, мы увидим, что бумажки опустятся. Явление протекает совершенно аналогичным образом, если повторить опыт, зарядив шар C отрицательно (например, при помощи сургуча).

С точки зрения электронной теории эти явления легко объясняются существованием в проводнике свободных электронов. При поднесении к проводнику положительного заряда электроны к нему притягиваются и накапливаются на ближайшем конце проводника. На нем оказывается известное количество «избыточных» электронов, и эта часть проводника заряжается отрицательно. На удаленном конце образуется недостаток электронов и, следовательно, избыток положительных ионов: здесь появляется положительный заряд.

При поднесении к проводнику отрицательно заряженного тела электроны накапливаются на удаленном конце, а на ближнем конце получается избыток положительных ионов. После удаления заряда, вызывающего перемещение электронов, они вновь распределяются по проводнику, так что все участки его оказываются по-прежнему незаряженными.

Перемещение зарядов по проводнику и их накопление на концах его будет продолжаться до тех пор, пока взаимное притяжение избыточных зарядов на концах проводника не уравновесит те исходящие из тела C электрические силы, под влиянием которых происходит эта передвигка электронов. Отсутствие заряда у середины тела показывает, что здесь уравновешены силы, исходящие из тела C , и силы, с которыми действуют на свободные электроны избыточные заряды, накопившиеся у концов проводника.

Индуцированные заряды можно закрепить в соответствующих частях тела, «уловить», если в присутствии

заряженного тела разделить проводник на части. Такой опыт изображен на рис. 15. В этом случае сместившиеся электроны уже не могут вернуться обратно после удаления заряженного шара, так как между обеими половинами A и B проводника находится изолятор (воздух). Избыточные электроны в A распределяются по всему левому телу; недостаток электронов в B частично пополняется из области B' , так что каждая половинка нашего проводника

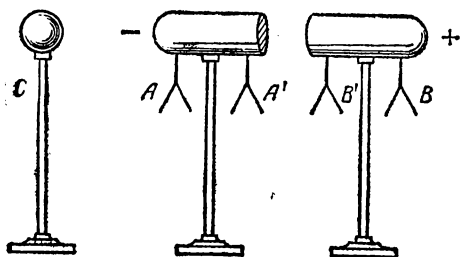


Рис. 15. Те же изолированные металлические цилиндры A и B отделены друг от друга в присутствии заряженного шара C . Бумажки в A , A' , B' и B остаются отклоненными и после удаления шара C .

оказывается заряженной: левая — зарядом, по знаку противоположным заряду тела C , правая — зарядом, одноименным с телом C . Расходятся не только бумажки в точках A и B , но и остававшиеся прежде неподвижными бумажки в A' и B' .

Этим обстоятельством часто пользуются на практике для заряжения проводников. Для того чтобы этим способом зарядить электроскоп, мы можем приблизить к нему заряженную палочку сургуча (несущую отрицательный заряд) и коснуться стержня электроскопа пальцем. При этом некоторое количество электронов под влиянием отталкивания от сургуча уйдет через наше тело в землю, а на стержне и на листочке электроскопа установится некоторый недостаток электронов. Если теперь, предвзятельно отняв палец, убрать сургучную палку, электроскоп окажется заряженным и притом положительным зарядом (рис. 16, a , b , $в$). В этом опыте роль второй половины проводника играет наше тело, соединенное с землей.

На зарядении проводников посредством электризации через влияние основаны так называемые электрические индукционные машины (иначе электростатические машины) (рис. 17). Такая машина позволяет непрерывно разделять положительные и отрицательные заряды, создавая на одном из двух изолированных проводников *А* и *В* недостаток электронов, а на другом — избыток. Это достигается вращением машины, например, от

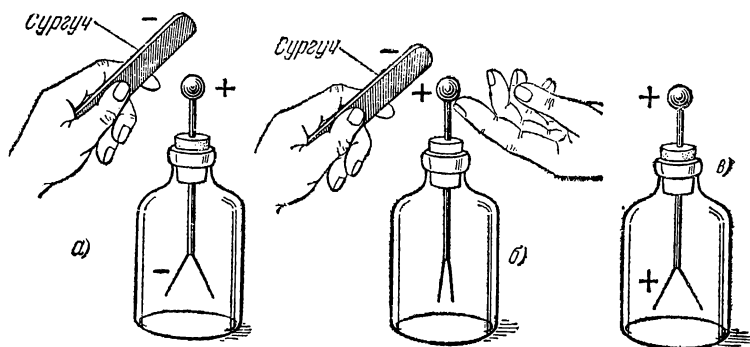


Рис. 16. Различные стадии зарядения тела через влияние. *а*) Приближая к шарiku электроскопа отрицательно заряженный сургул, мы вызываем на шарике электроскопа положительный заряд, а на бумажных листочках — отрицательный заряд; *б*) не убирая сургула с отрицательным зарядом, прикасаемся рукой к шарiku электроскопа и отводим часть отрицательного заряда электроскопа через свое тело в землю. Листочки электроскопа спадают; *в*) убрав палец, а затем убрав сургул, мы оставляем на электроскопе только положительный заряд, который распределяется между шариком и листочками.

руки или при помощи моторчика. Устройство таких машин изобилует рядом довольно сложных деталей, и мы не будем их рассматривать.

Отметим, что, пользуясь явлением индукции, можно определить знак заряда электроскопа. Приблизим к электроскопу тело с зарядом известного знака, например стеклянную палочку. Нетрудно сообразить, каков знак заряда электроскопа, наблюдая, увеличивается или уменьшается при этом отклонение листочка (рис. 18).

Упражнения. 8.1. Объясните способ определения знака заряда электроскопа, изображенный на рис. 18.

8.2. Электроскоп заряжается через влияние при помощи стеклянной палки. Как будут перемещаться при этом электроны?

8.3. К шарiku заряженного электроскопа подносят, не касаясь его, незаряженное металлическое тело. Как изменится отклонение листочка? Объясните, почему.

8.4. К положительно заряженному электроскопу подносят тело, заряженное отрицательно. По мере приближения тела отклонение листочка электроскопа постепенно уменьшается и спадает до нуля. При дальнейшем приближении тела, однако, отклонение вновь появляется. Что при этом происходит?

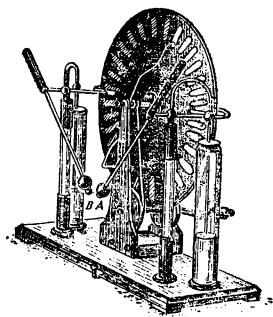


Рис. 17. Электрическая индукционная машина.

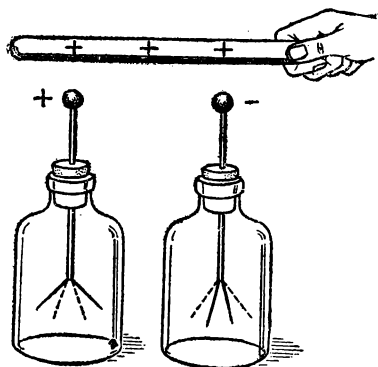


Рис. 18. Определение знака неизвестного заряда. При приближении одноименного заряда электроскопа отклоняются еще более; при приближении разноименного заряда они спадают.

8.5. При поднесении руки к заряженному грузику, подвешенному на шелковинке, он притягивается к руке. Почему это происходит?

§ 9. Электризация под действием света (фотоэлектрический эффект). Проводники могут заряжаться также и под действием света. Явление заключается в том, что под действием света электроны могут вылетать из проводника в окружающее пространство, благодаря чему проводник заряжается положительно. Это явление получило, название фотоэлектрического эффекта, или фотоэффекта.

На рис. 19 изображен опыт, который в простейшей форме позволяет обнаружить и наблюдать возникновение на проводниках электрического заряда под действием света. Укрепим на стержне электроскопа хорошо очищенную от окислов металлическую (лучше всего цинковую) пластинку и зарядим электроскоп отрицательно. Если его изоляция достаточно хороша, то избыточные электроны будут хорошо удерживаться на электроскопе, и его листочек будет долго оставаться в отклоненном положении.

Осветим теперь цинковую пластинку дуговой лампой проекционного фонаря. Листочек немедленно опадет, а это значит, что цинковая пластинка *т е р я е т* при этом свои избыточные электроны. Эти электроны под действием света вырываются за пределы металла и, отталкиваемые отрицательно заряженной пластинкой, разлетаются в окружающее пространство.

Зарядим теперь пластинку *п о л о ж и т е л ь н о* и попробуем сделать тот же опыт. Мы найдем, что в этом случае освещение не вызывает никакого действия, и листочек электроскопа остается в отклоненном положении. Освобождающиеся электроны теперь не могут покинуть

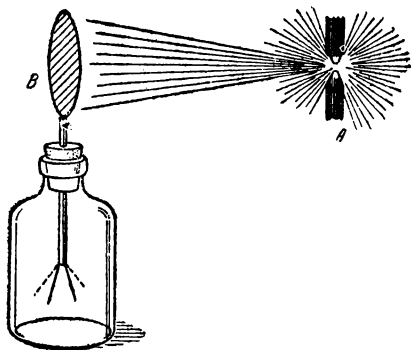


Рис. 19. Электрическая дуга *А* освещает отрицательно заряженную металлическую пластинку *В* на электроскопе. Под влиянием света электроны вырываются на пластинки, отрицательный заряд электроскопа уменьшается и листочки его спадают.

пластину, так как они удерживаются сильным притяжением к положительному заряду. Положительные же заряды под действием света не освобождаются из металла.

Этот результат показывает, что положительные и отрицательные заряды связаны с металлом с различной прочностью. Под действием света могут освобождаться только *о т р и ц а т е л ь н ы е* заряды — электроны.

Если проделать опыт с *н е з а р я ж е н н о й* пластинкой, то заметного отброса обычного электроскопа не наблюдается. Однако, применив достаточно чувствительный электроскоп, мы обнаружим, что на пластинке под действием света возникает небольшой положительный заряд, скоро достигающий

своего предела. Нетрудно понять, почему зарядение пластинки под действием света приостанавливается. После того как некоторое число электронов покинет пластинку и она зарядится положительно, дальнейшее удаление электронов в окружающее пространство делается невозможным, как было объяснено выше. В отделе «Оптика» явление фотоэффекта будет изучено подробнее. Пока же ограничимся упоминанием, что и этот способ зарядения тел представляет собой также *р а з д е л е н и е* электронов и положительных зарядов, которые существовали в теле *и д о о с в е щ е н и я*.

§ 10. Закон Кулона. Для более глубокого понимания электрических явлений необходимо познакомиться с *к о л и ч е с т в е н н ы м* законом взаимодействия электрических зарядов, т. е. выяснить, *к а к* зависит величина силы, действующей между заряженными телами, от зарядов на них и от расстояния между ними.

Взаимодействие заряженных тел выражается особенно просто, если их размеры весьма малы по сравнению с взаимным расстоянием. Такие заряженные тела мы будем называть «точечными зарядами». Приблизительно точечные заряды можно осуществить на опыте, заряжая достаточно маленькие тельца, например шарики.

Закон взаимодействия двух точечных зарядов был установлен на опыте Кулоном¹⁾ в 1785 г. Устройство прибора, с которым Кулон произвел свои опыты, показано на рис. 20, а. На очень тонкой серебряной нити l подвешена легкая, хорошо изолирующая стрелка c , имеющая на одном из концов бузинный шарик a , а на другом противовес b . Верхний конец нити закреплен на вращающейся головке прибора, угол поворота которой можно точно отсчитывать. Внутри прибора имеется еще второй, такого же размера, шарик d , неподвижно укрепленный на изолирующей ножке e . Указанные части заключены в большой стеклянный цилиндр, предохраняющий стрелку от движения воздуха. На поверхности цилиндра нанесена шкала, позволяющая определить расстояние между шариками a и d при различных их положениях.

Головка прибора показана отдельно на рис. 20, б. В предварительных опытах точно определяется вращающий момент (т. I, «Механика»), необходимый для закручивания

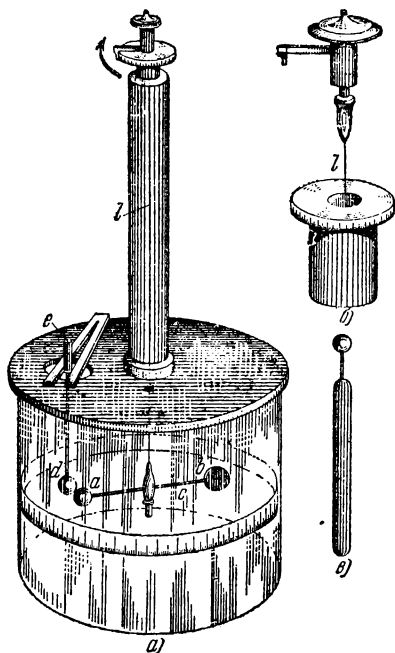


Рис. 20. Крутильные весы Кулона: а) прибор в целом; б) головка прибора; в) проводник для нанесения заряда на шарик d .

¹⁾ Шарль Кулон (1736—1806) — французский физик.

нити на определенный угол. Зная длину стрелки, можно вычислить и силу, приложенную к шарiku a , которая обуславливает такой же вращающий момент.

Свои опыты сам Кулон описывает следующим образом: «Заряжают маленький проводник, который представляет собой не что иное, как обыкновенную булавку с большой головкой, воткнутую в палочку сургуча. Эту булавку вдвигают в отверстие прибора и приводят в соприкосновение с шариком d , который, в свою очередь, касается шарика a . После удаления булавки оба шарика имеют одинаковые заряды и отталкиваются на некоторое расстояние, которое измеряют, отмечая соответствующее деление шкалы. Вращая затем указатель головки в направлении стрелки, закручивают нить подвеса l и замечают те расстояния, до которых сближаются шарики при разных углах закручивания нити. Сравнивая затем различные значения силы кручения с соответствующими им расстояниями между шариками, получают закон отталкивания». Заряжающий проводник изображен на рис. 20, в. Поступая подобным образом. Кулон решил первую часть задачи: он нашел закон, определяющий зависимость силы электрического взаимодействия от расстояния между телами. Оказалось, что *сила отталкивания двух маленьких одноименно заряженных шариков обратно пропорциональна квадрату расстояния между центрами обоих шариков*¹⁾. Если обозначить через F силу отталкивания, через r — расстояние между шариками, то этот результат можно записать математически так:

$$F \sim \frac{1}{r^2}$$

(значок \sim обозначает «пропорционально»).

Труднее было установить, каким образом влияет на силу взаимодействия величина обоих зарядов, потому что мы не установили еще единицу электрического заряда и не знаем, как измерить величину заряда на том или ином теле, т. е. как сравнить этот заряд с зарядом, принятым нами за единицу. Можно, однако, поступить так: задать каждому из шариков некоторый заряд q (пока нам неизвестный), установить оба шарика на определенном расстоянии и измерить

¹⁾ Указанный закон был еще в 1771 г. установлен английским физиком Генри Кавендишем (1731—1810) менее прямыми, но более точными опытами.

угол закручивания нити. Затем надо коснуться какого-либо из них третьим, незаряженным шариком такой же величины и удалить его. При соприкосновении равных по величине шариков заряд распределится между ними поровну, так что на шарике, которого мы коснулись, останется заряд $q/2$. Теперь мы наблюдаем взаимодействие зарядов q и $q/2$. При этом оказывается, что для сохранения прежнего расстояния необходим угол закручивания в два раза меньший, а следовательно, и сила взаимодействия в два раза меньшая. Итак, мы нашли, что с уменьшением заряда на одном из шариков в два раза уменьшилась в два раза и сила отталкивания.

Поступая таким образом и дальше, мы можем делить заряды любого из шариков и убедиться на опыте, что сила взаимодействия пропорциональна заряду каждого из шариков. Обозначая через q_1 и q_2 заряды шариков, можно написать:

$$F \sim q_1 \cdot q_2.$$

Такие же точно результаты получены и для двух разноименных зарядов, только в этом случае наблюдается сила притяжения.

Подобные опыты привели Кулона к установлению следующего закона:

Сила взаимодействия двух точечных зарядов направлена вдоль прямой линии, соединяющей заряды. Ее величина прямо пропорциональна произведению обоих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Обозначая через f коэффициент пропорциональности, можно записать математически закон Кулона следующим образом ¹⁾:

$$F = f \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}. \quad (1,1)$$

Закон Кулона совершенно аналогичен по форме закону всемирного тяготения (т. I, «Механика»). При этом роль тяжелых масс играют электрические заряды.

¹⁾ В таком виде закон Кулона выражает силу взаимодействия между двумя точечными зарядами в пустоте. Если же пространство между зарядами заполнено каким-либо диэлектриком, например спиртом или керосином, то в формуле (1,1) появляется еще величина, зависящая от природы диэлектрика. К этому вопросу мы вернемся в § 36, формула (2,13).

§ 11. Единица заряда. Формула (1,1) не позволяет еще вычислить силу взаимодействия, так как мы не определили значения коэффициента пропорциональности f . Она выражает пока только тот опытный факт, что эта сила возрастает пропорционально увеличению каждого из зарядов и уменьшается в n^2 раз при n -кратном увеличении расстояния между шариками.

Значение f зависит от выбора единиц, которыми мы измеряем все входящие в формулу величины, т. е. в данном случае заряды, расстояния и силы. Измеряя, например, r один раз в метрах, а другой раз в сантиметрах, мы получим для f числа, различающиеся в десять тысяч раз. Поэтому мы должны условиться, в каких единицах измерять величины, входящие в формулу (1,1).

В системе СГС расстояние измеряется в *см*, а сила — в *дин*. Установив эти единицы для r и F , мы можем выбрать для измерения заряда такую единицу, чтобы коэффициент f в формуле (1,1) обратился в 1. Такая единица заряда получила название абсолютной электростатической единицы. Иначе:

абсолютная электростатическая единица заряда есть такой заряд, который действует в пустоте на равный ему заряд, удаленный на 1 см, с силой в 1 дину (конечно, заряды должны быть точечными, т. е. размеры их должны быть малы по сравнению с расстоянием между зарядами). Применяя для измерения точечных зарядов абсолютные электростатические единицы, мы получим закон Кулона в виде

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}, \quad (1,2)$$

причем расстояние r выражается в сантиметрах, а сила F — в динах.

В электротехнике, однако, принята другая система единиц — практическая система. За единицу заряда в этой системе принимают заряд, равный $3 \cdot 10^9$ (т. е. трем миллиардам) абсолютных единиц. Эта единица заряда получила название кулон (κ):

$$1\kappa = 3 \cdot 10^9 \text{ абс. электростатических единиц заряда.}$$

Совершенно очевидно, что если бы заряд на каждом теле равнялся 1 κ , то сила взаимодействия между ними на расстоянии в 1 см была бы равна $(3 \cdot 10^9)^2 = 9 \cdot 10^{18}$ *дин*. Та-

ким образом, в этих единицах $f=9 \cdot 10^{18}$, и закон Кулона нужно было бы написать в виде

$$F = 9 \cdot 10^{18} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \text{ дин} \quad (1,2')$$

(q — в кулонах, r — в сантиметрах).

В технике, как мы знаем (т. I, «Механика»), в качестве единицы силы часто принимают килограмм-силу (1 $\kappa\Gamma$), причем

$$1 \kappa\Gamma = 980\,000 \text{ дин.}$$

Стало быть, если бы мы в законе Кулона захотели выразить силу в технических единицах (килограммах), то сила взаимодействия между двумя зарядами по 1 κ , отстоящими друг от друга на 1 см, была бы равна $\frac{9 \cdot 10^{18}}{980\,000} = 9,2 \cdot 10^{12} \kappa\Gamma$. Таким образом, при таком выборе единиц коэффициент пропорциональности $f=9,2 \cdot 10^{12}$, и закон Кулона записывается в виде

$$F = 9,2 \cdot 10^{12} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \kappa\Gamma \quad (1,2'')$$

(q — в кулонах, r — в сантиметрах). Если бы и расстояния мы измеряли в метрах, как это принято в технике, а не в сантиметрах, как это принято в физике, то закон Кулона нужно было бы писать в виде

$$F = 9,2 \cdot 10^8 \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \kappa\Gamma \quad (1,2''')$$

(q — в кулонах, r — в метрах).

Выражая единицу электрического заряда через единицы механических величин (длины, силы и времени или же, как в системе СГС, длины, массы и времени), можно определить единицы и всех других электрических и магнитных величин, с которыми мы познакомимся далее, через три основные механические величины. Таким путем строятся так называемые абсолютные системы измерения электрических и магнитных величин. Они обладают некоторыми преимуществами для теоретической физики (где, в частности, система СГС прочно укоренилась) и до последнего времени широко применялись в физике вообще.

Однако практически для электрических и магнитных величин удобнее такие системы, в которых количество основных единиц больше трех, т. е. наряду с единицами длины, массы (или силы) и времени

вводятся еще единицы для одной или двух электрических величин, рассматриваемые как независимые от первых трех. Такова, например, Международная практическая система, в основу которой, кроме метра, килограмма и секунды, берутся еще единицы силы тока и напряжения (т. е. пять основных единиц). Такова же и Международная система единиц или сокращенно СИ (см. т. I, §§ 8 и 44). В системе СИ четыре основных независимых единицы: метр, килограмм (масса), секунда и ампер (единица силы тока). Понятие силы тока и определение ее единицы в системе СИ мы введем позднее (§§ 42 и 134). Здесь же подчеркнем лишь то обстоятельство, что *в системе СИ единица электрического заряда является не основной, а производной, она выражается через единицу силы тока*. Поэтому мы пока не приводим определения единицы заряда в системе СИ, хотя она тоже называется кулоном и с высокой точностью совпадает с кулоном, определенным как $3 \cdot 10^9$ электрических единиц заряда.

У п р а ж н е н и я. 11.1. С какой силой притягиваются два разноименных заряда в 30 абсолютных электростатических единицах каждый, помещенные на расстоянии 10 см друг от друга?

11.2. Бузиновый шарик, подвешенный на шелковой нити (маятник), имеет заряд 10^{-8} к. Вблизи него, на той же высоте, подвешен другой

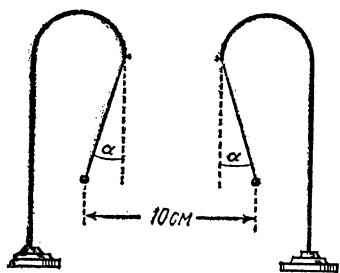


Рис. 21. К упражнению 11.2.

заряженный шарик, несущий такой же заряд (рис. 21). В результате взаимного отталкивания шарiki расходятся на 10 см. На какой угол α отклонен маятник от вертикали? Масса маятника 0,1 г.

11.3. Два одинаковых маятника с бузиновыми шариками были подвешены на одном крючке и заряжены. После этого они оказались отклоненными от вертикали на угол в $5,7^\circ$. Длина нитей маятника равна 10 см, вес каждого из шариков — 0,1 г. Какой заряд находится на каждом шарике?

11.4. Заряд одного электрона равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ к. Вообразим, что от каждой молекулы воды, содержащейся в одном литре, оторвано по одному электрону и затем все электроны удалены от ионов на расстояние, равное расстоянию между полюсами Земли, т. е. на 12 800 км. С какой силой притягивались бы эти заряды? (Напомним, что число молекул в 1 граммолекуле равно $6,02 \cdot 10^{23}$.)

11.5. Атом водорода состоит из положительного ядра, вокруг которого вращается единственный электрон. С какой частотой должен вращаться электрон вокруг ядра, чтобы не упасть на ядро, если его орбита — окружность с радиусом $3 \cdot 10^{-8}$ см? Масса электрона равна $9 \cdot 10^{-28}$ г.

ГЛАВА II

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

§ 12. Действие электрического заряда на окружающие тела. Закон Кулона показывает, что сила электрического взаимодействия проявляется только между двумя заряженными телами. Действительно, если в формуле (1,1) положить $q_2=0$, то и $F=0$ при любом значении q_1 . Мы знаем, однако, что заряженное тело (например, натертая палочка сургуча)

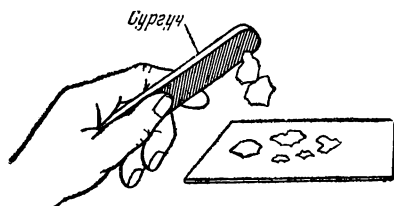


Рис. 22. Притяжение незаряженных бумажек к заряженному сургучу.

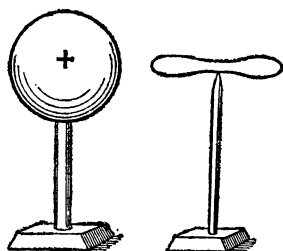


Рис. 23. Заряженное тело действует на незаряженную «стрелку» (небольшое тело удлиненной формы) из металла или из бумаги, поворачивая ее концом к себе.

способно притягивать ненаэлектризованные тельца, например кусочки бумаги (рис. 22) или металлической фольги.

Насадим бумажную или металлическую стрелку на острие, укрепленное на изолирующей подставке так, чтобы стрелка легко могла вращаться на острие. Если вблизи такой стрелки поместить заряженное тело, то она немедленно повернется так, что ось ее будет направлена к заряженному телу (рис. 23). Повернув стрелку рукой и вновь отпустив, мы обнаружим, что она снова возвращается

в прежнее положение. Какой конец нашей стрелки окажется обращенным к заряженному телу — дело случая, но никогда стрелка не останавливается так, чтобы ось ее составила заметный угол с направлением на заряженное тело.

Для объяснения этих взаимодействий между заряженными и незаряженными телами нужно вспомнить явление индукции (§ 8) и закон Кулона (§ 10). Все тела (кусочки бумаги, стрелки) вблизи заряженного тела испытывают электризацию через влияние (индукцию), в результате которой имеющиеся в этих телах заряды перераспределяются так, что в одной части тела накапливаются избыточные заряды одного знака, а в другой — другого (рис. 24 и рис. 25).

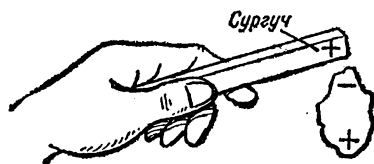


Рис. 24. Объяснение притяжения заряженным сургучом незаряженных бумажек.

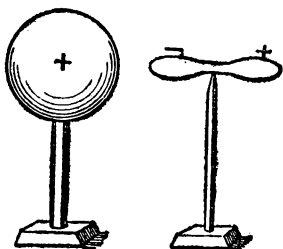


Рис. 25. Объяснение действия заряженного тела на незаряженную стрелку.

При этом ближе к влияющему заряженному телу оказываются заряды, знак которых противоположен знаку его заряда; одноименные же заряды скапливаются в избытке на отдаленном конце. Взаимодействие заряда нашего тела с этими индуцированными (наведенными) зарядами происходит по закону Кулона. Поэтому каждое тело с наведенными зарядами одновременно и притягивается и отталкивается заряженным телом. Но отталкивание, имеющее место между зарядами, находящимися на большем расстоянии, слабее, чем притяжение. В результате наши «незаряженные» тела поворачиваются и притягиваются заряженным телом, как это и наблюдается на опыте.

У п р а ж н е н и е. 12.1. Поднесите заряженную палочку поочередно: а) к кусочку ваты, лежащему на стеклянной пластинке, б) к такому же кусочку ваты, положенному на деревянный стол. Почему кусочки ваты притягиваются к палочке во втором случае сильнее, чем в первом?

У к а з а н и е. Обратите внимание, что дерево гораздо лучший проводник, чем стекло.

§ 13. Понятие об электрическом поле. Действие заряженного тела на окружающие тела проявляется в виде сил притяжения и отталкивания, стремящихся поворачивать и перемещать эти тела по отношению к заряженному телу. Мы наблюдали проявление этих сил в опытах, описанных в предыдущих параграфах. Их можно наблюдать также с особенной наглядностью с помощью поучительного опыта, который мы сейчас опишем.

Нальем в небольшую стеклянную кюветку (рис. 26) какой-либо жидкий диэлектрик (например, масло), к которому подмешан порошок с крупинками удлиненной формы¹⁾. В кюветку поместим два металлических тела, например две металлические пластинки, и соединим их с электрической машиной. Чтобы удобно было следить за поведением взвешенных в масле крупинок, спроектируем изображение всей картины на экран или просто отбросим тень кюветки на потолок, как это показано на рис. 26. При заряджении пластинок можно видеть, что отдельные крупинки, расположенные вначале совершенно беспорядочно, начинают перемещаться и поворачиваться и в конце концов устанавливаются в виде цепочек, тянущихся от одного электрода к другому. На рис. 27 приведено изображение расположения крупинок между двумя параллельными металлическими пластинками, а на рис. 28 — между двумя металлическими шариками.

В этом опыте каждый кристаллик подобен маленькой стрелке. Небольшие размеры кристалликов позволяют разместить их одновременно во многих точках нашей среды и

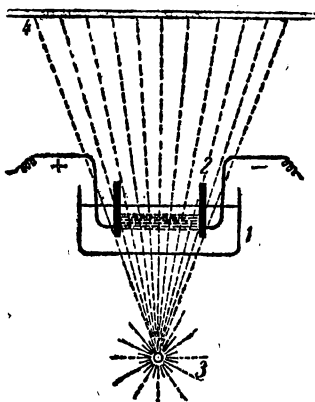


Рис. 26. Установка для экспериментального получения картин электрического поля:

1 — кювета, содержащая касторовое масло с кристалликами хинина; 2 — проводники, соединенные с электрической машиной и создающие электрическое поле; 3 — источник света; 4 — экран, на который проектируется тень от кристалликов. Кристаллики располагаются в виде цепочек. Направление каждого из них указывает направление действия электрических сил в соответствующей точке поля.

¹⁾ Удобно применять взвесь кристалликов сернокислого хинина или манной крупы в касторовом масле.

благодаря этому обнаружить, что действие заряженного тела проявляется во в с е х точках пространства, окружающего наш заряд. Таким образом, мы можем судить о существовании электрического заряда в каком-нибудь месте по действиям, производимым им в различных точках окружающего пространства.

В зависимости от величины заряда и формы заряженного тела действие его в различных точках пространства будет различным. Поэтому для полной характеристики заряда

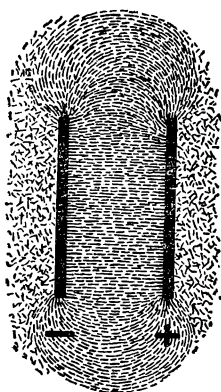


Рис. 27. Расположение кристалликов между двумя параллельными пластинками, заряженными разноименно. За пластинками кристаллики не ориентированы.

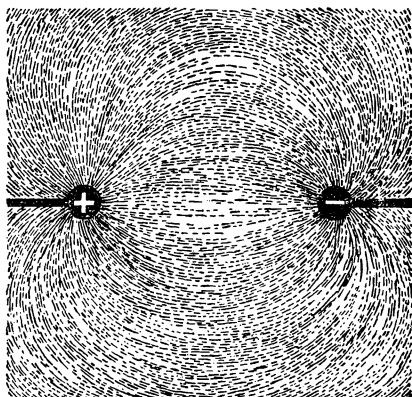


Рис. 28. Расположение кристалликов между двумя металлическими шариками, заряженными разноименно.

надо знать, какое действие он производит во всевозможных точках окружающего пространства или, как часто говорят, надо знать **электрическое поле**, которое возникает вокруг заряда. Таким образом, понятием *«электрическое поле»* мы обозначаем *пространство, в котором проявляются действия электрического заряда.*

Если имеется не один заряд, а несколько расположенных в различных местах, то в любой точке окружающего пространства проявится совокупность действия этих зарядов, электрическое поле, создаваемое всеми этими зарядами.

Заметим, что в начале изучения электричества часто возникает стремление «объяснить» электрическое поле, то есть свести его к каким-либо иным, уже изученным явлениям, подобно тому, как тепловые явления мы сводим к беспорядочному движению атомов и молекул. Однако многочисленные попытки подобного рода в области электричества неизменно оканчивались неудачей. Поэтому мы считаем, что электрическое поле есть самостоятельная физическая реальность, не сводящаяся ни к тепловым, ни к механическим явлениям. Электрические явления представляют собой новый класс явлений природы, с которыми мы знакомимся на опыте, и дальнейшая наша задача должна состоять в изучении свойств электрического поля и его законов.

§ 14. Напряженность электрического поля. Рисунки § 13 дают лишь общую качественную картину электрического поля. Для количественной характеристики электрического поля мы могли бы использовать любое из производимых им действий. Так, например, под влиянием электрического поля заметно изменяются оптические свойства некоторых веществ. Это свойство электрического поля можно было бы применить для количественной оценки поля.

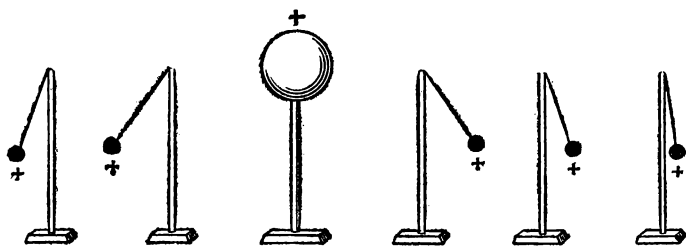


Рис. 29. Исследование электрического поля пробным зарядом. Напряженность поля убывает с расстоянием.

Обычно, однако, для этой цели пользуются механическими действиями поля на заряженные тела. Представим себе, что электрическое поле создано некоторым зарядом Q ; внесем в него «пробный заряд» q и измерим действующую на него силу F . Это можно сделать, нанося, например, «пробный заряд» на легкий шарик, подвешенный на шелковинке (рис. 29) и измеряя угол отклонения шарика. По закону Кулона величина этой силы пропорциональна

величине пробного заряда q . Увеличивая этот заряд в 2, 3 и вообще в n раз, мы будем наблюдать и увеличение силы в 2, 3 или n раз. Поэтому отношение $\frac{F}{q}$ уже не зависит от величины пробного заряда q и характеризует только электрическое поле в той точке, где находится пробный заряд. То же имеет место и в любом другом электрическом поле, а не только в поле заряженного шара.

Это отношение $\frac{F}{q}$, равное силе, действующей на единицу заряда, и принимают за количественную меру поля и называют *напряженностью поля*. Таким же образом будет характеризоваться и поле, созданное не одним каким-либо зарядом Q , а любой совокупностью зарядов. Итак, *напряженность электрического поля в данной точке пространства есть отношение силы, действующей на заряд, помещенный в эту точку, к величине заряда*. Следовательно, напряженность поля численно равна силе, действующей на единичный заряд.

Если обозначить напряженность поля в некоторой точке через E , заряд, находящийся в этой точке, через q , и силу, действующую на заряд, через F , то

$$E = \frac{F}{q}, \quad (2,1)$$

откуда

$$F = E \cdot q. \quad (2,1')$$

Напряженность, равная единице, есть напряженность такого поля, в котором на единичный заряд действует сила, равная единице. Например, в системе СГС *за единицу напряженности принимают напряженность поля, в котором на заряд в 1 абсолютную электростатическую единицу действует сила в 1 дину*.

Мы определили величину напряженности электрического поля как силу, действующую на единичный заряд. Но всякая сила определяется не только своей величиной, но и *направлением*. Поэтому для полной характеристики напряженности поля надо указать также и ее направление. *За направление напряженности поля принимают направление силы, действующей на положительный заряд*. Напряженность поля в некоторой точке можно изобразить графически в виде направленного отрезка, исходящего из данной точки, подобно тому, как это делается при изображении силы и других векторных величин.

Определение единицы напряженности электрического поля в системе СИ мы дадим позже (§ 23).

У п р а ж н е н и я. 14.1. На маленьком шарике находится заряд в 30 абсолютных электростатических единиц. Чему равна напряженность поля на расстоянии 10 см от центра шарика?

14.2. Вычислите напряженность поля, создаваемого зарядом в 5 к на расстоянии 1 км от него.

14.3. В электрическом поле с напряженностью 10 абс. единиц находится заряд в 10^{-8} к. Какая сила действует на этот заряд?

§ 15. Сложение полей. Если электрическое поле создано одним точечным зарядом Q , то напряженность этого поля в какой-либо точке, отстоящей на расстояние r см от заряда, равна, согласно закону Кулона:

$$E = \frac{Q}{r^2} \quad (2,2)$$

и направлена вдоль прямой, соединяющей заряд с этой точкой. Таким образом, напряженность поля точечного заряда изменяется по мере удаления от заряда обратно пропорционально квадрату расстояния. При положительном заряде Q поле направлено вдоль радиуса от заряда, при отрицательном Q — вдоль радиуса по направлению к заряду (рис. 30, а и б).

Посмотрим теперь, чему равна напряженность поля, вызванного двумя точечными зарядами Q_1 и Q_2 . Пусть E_1 — напряженность поля в некоторой точке A (рис. 31), вызванная зарядом Q_1 (когда заряд Q_2 удален), а E_2 — напряженность в той же точке, вызванная зарядом Q_2 (когда удален заряд Q_1). Эти величины определяются формулой (2,2).

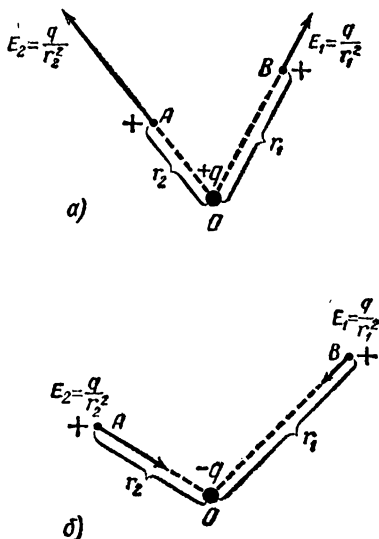


Рис. 30. а) Напряженность поля точечного положительного заряда в разных точках A и B направлена вдоль радиуса OA и OB и различна по величине, б) Напряженность поля точечного отрицательного заряда в разных точках A и B направлена навстречу радиусам OA и OB и различна по величине.

Опыт показывает, что при совместном действии обоих зарядов напряженность поля в точке A может быть найдена по правилу параллелограмма: если из точки A отложить отрезки, изображающие по величине и по направлению напряженности E_1 и E_2 , и на этих отрезках, как и на сторонах, построить параллелограмм, то напряженность E

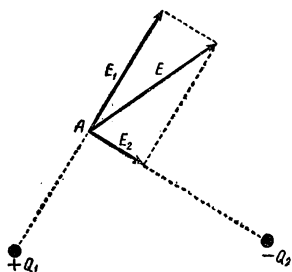


Рис. 31. Определение напряженности для двух точечных зарядов.

резльтирующего поля по величине и по направлению представляется диагональю этого параллелограмма. *Правило сложения напряженностей полей совершенно аналогично правилу сложения сил в механике.* Так же, как и в механике, применимость правила параллелограмма означает *независимость действия электрических полей* (о принципе независимости действия сил см. т. I, «Механика»).

Последовательно применяя правило параллелограмма, можно вычислить напряженность поля не только двух, но и какого угодно числа точечных зарядов.

Подобным же образом можно вычислить и поле, созданное большим протяженным заряженным телом. Для этого нужно мысленно разбить это тело на малые части и каждую часть принять за точечный заряд, а затем сложить по правилу параллелограмма создаваемые этими частями заряда напряженности. При этом, однако, вычисления могут оказаться очень сложными.

Напомним, что с направленными величинами, складывающимися по правилу параллелограмма, мы уже встречались в механике (сила, скорость, ускорение и т. д.). Мы называли их **векторами**. Мы видим, что *напряженность электрического поля есть вектор*.

Упражнение. 15.1. Какая сила действует на положительный заряд A в 60 эл.-ст. единиц, находящийся на расстоянии 15 см от отрицательного заряда B в 75 эл.-ст. единиц и на расстоянии 8 см от положительного заряда C в 32 эл.-ст. единицы? Расстояние между зарядами B и C равно 17 см (при решении задачи воспользоваться циркулем и линейкой).

§ 16. Электрическое поле в диэлектриках и в проводниках. Само собой разумеется, что электрическое поле может существовать не только в пустоте, но и внутри вещества, ибо

электрические силы могут действовать и внутри различных тел. При этом, однако, надо иметь в виду существенное различие между проводниками и изоляторами (диэлектриками). В проводнике имеются электрические заряды, свободно перемещающиеся под действием электрических сил. В изоляторе же движение зарядов под действием электрических сил происходить не может. Поэтому если в проводнике возникло электрическое поле, то свободные заряды проводника придут в движение под действием этого поля, т. е. через проводник будет идти электрический ток.

В гл. III мы ознакомимся с условиями поддержания длительного электрического тока в проводнике. Но в опытах с заряджением отдельных проводников мы не наблюдаем длительного тока, т. е. заряды на проводнике после некоторых перемещений приходят в состояние равновесия. Равновесие будет достигнуто, когда заряды распределятся по проводнику таким образом, чтобы создаваемое ими внутри проводника электрическое поле как раз уничтожало (компенсировало) внешнее поле, вызвавшее перемещение зарядов. Пока такая компенсация не наступила, электрические заряды, благодаря их подвижности в проводнике, будут продолжать движение. Таким образом, при *равновесии зарядов напряженность электрического поля в проводнике равна нулю*, т. е. электрическое поле в проводнике отсутствует.

В диэлектрике наличие электрического поля не препятствует равновесию зарядов. Сила, действующая на заряды в диэлектрике со стороны электрического поля, уравнивается внутримолекулярными силами, удерживающими заряды в пределах молекулы диэлектрика, так что в диэлектрике возможно равновесие зарядов, несмотря на наличие электрического поля. Конечно, как мы уже указывали в § 3, разделение тел на проводники и изоляторы (диэлектрики) условно. При достаточно сильной напряженности поля и в изоляторе возможно заметное перемещение зарядов, ведущее, например, к пробое изолятора. Однако при общепринятом разделении тел на проводники и диэлектрики (изоляторы), мы можем сказать, что в случае равновесия зарядов электрическое поле внутри проводника (например, металла) не может иметь места, а электрическое поле в диэлектрике (например, в стекле) может существовать.

§ 17. Графическое изображение полей. Существует очень удобный способ наглядного описания электрического поля. Этот способ сводится к построению сети линий, при помощи которой изображают величину и направление напряженности поля в различных точках пространства.

Выберем в электрическом поле какую-либо точку A (рис. 32, a) и проведем из нее небольшой прямолинейный отрезок AB так, чтобы его направление совпадало с направлением напряженности поля в точке A . Затем из какой-нибудь точки B этого отрезка проведем отрезок BC , направление которого совпадает с направлением поля в точке B ,

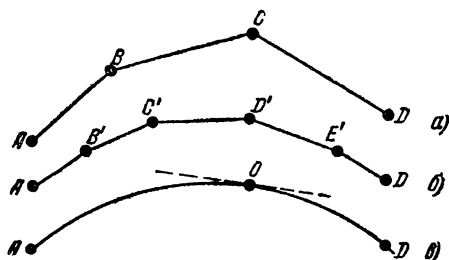


Рис. 32. Ломаная a) показывает направление поля только в точках A , B , C и D . Ломаная $б$) показывает направление поля в большем числе точек: A' , B' , C' , D' , E' и D . Кривая $в$) показывает направление поля во всех своих точках. Пунктирная линия показывает направление поля в точке O .

и т. д. Мы получим ломаную линию, которая показывает, какое направление имеет поле в точках A , B , C ,... этой линии.

Построенная таким образом ломаная не вполне точно определяет направление поля во всех точках. Действительно, отрезок AB точно направлен вдоль поля лишь в точке A (по построению); но в какой-либо другой точке этого же отрезка поле может иметь уже несколько другое направление. Это построение будет, однако, тем точнее передавать направление поля, чем ближе друг к другу выбранные точки. На рис. 32, $б$ направление поля изображается не для четырех, а для шести точек A , B' , C' ,..., и картина более точна. Изображение направления поля сделается вполне точным, когда точки излома будут неограниченно сбли-

жаться. При этом ломаная переходит в некоторую плавную кривую AD (рис. 32, в). Направление касательной к этой кривой линии в каждой точке совпадает с направлением напряженности поля в этой точке. Поэтому ее обычно называют *силовой линией*. Таким образом, *всякая мысленно проведенная в поле линия, направление касательной к которой в любой точке ее совпадает с направлением напряженности поля в этой точке, называется силовой линией*.

Из двух противоположных направлений, определяемых касательной, мы условимся всегда выбирать то направление, которое совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, и будем отмечать это направление на чертеже стрелками.

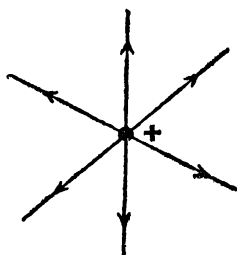


Рис. 33. Силовые линии точечного положительного заряда.

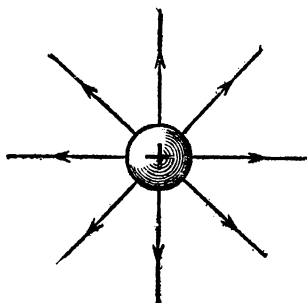


Рис. 34. Силовые линии равномерно заряженного шара.

Вообще говоря, силовые линии являются кривыми. Однако могут быть и прямые силовые линии. Важными примерами этого рода является поле точечного заряда, удаленного от других зарядов (рис. 33), и поле равномерно заряженного шара (рис. 34).

При помощи силовых линий можно не только изображать направление поля, но и характеризовать величину напряженности поля. Рассмотрим опять поле одного точечного заряда (рис. 35). Силовые линии этого поля представляют собой радиальные прямые, расходящиеся от заряда во все стороны. Из места нахождения заряда Q , как из центра, построим ряд шаровых поверхностей. Через каждую из них проходят все силовые линии, проведенные нами. Так как поверхность этих шаров увеличивается пропорционально квадрату радиуса, т. е. квад-

рату расстояния до заряда, то число линий, проходящих через 1 см^2 поверхности шара, уменьшается как квадрат расстояния до заряда. С другой стороны, мы знаем, что так же уменьшается и напряженность электрического поля. Поэтому в нашем примере мы можем судить о напряженности поля по числу силовых линий, проходящих через площадку в 1 см^2 , перпендикулярную к силовым линиям.

Если бы заряд Q был взят в n раз большим, то и напряженность поля во всех точках возросла бы в n раз. Поэтому,

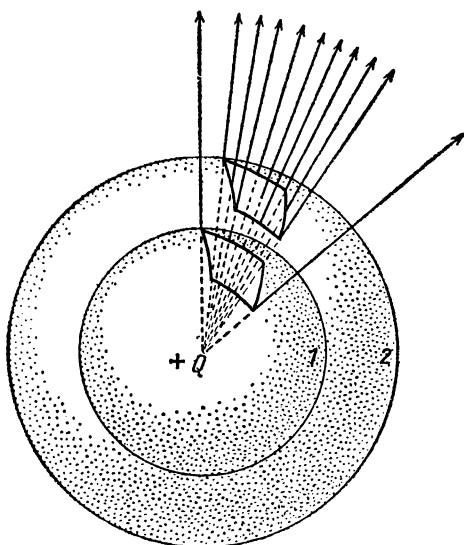


Рис. 35. Шаровые поверхности 1 и 2, проведенные вокруг положительного точечного заряда Q . На каждой из них показана площадка в 1 см^2 .

чтобы и в этом случае можно было судить о напряженности поля по густоте силовых линий, условимся проводить из заряда тем больше линий, чем больше величина заряда. При таком способе изображения густота силовых линий может служить для количественного описания напряженности поля. Мы сохраняем этот способ изображения и в том случае, когда поле образовано не одним единичным зарядом, а имеет более сложный характер.

Само собой разумеется, что от нашего произвола зависит,

сколько линий проведем мы через 1 см^2 для изображения поля данной напряженности. Необходимо только, чтобы при изображении разных мест одного и того же поля или при изображении нескольких сравниваемых между собой полей была сохранена густота линий, принятая для изображения поля, напряженность которого равна единице.

На наших чертежах (например, на рис. 36) мы можем изображать не распределение силовых линий в пространстве, а лишь сечение этой картины плоскостью чертежа,

т. е. получаем, так сказать, «электрические карты». Но и такие карты дают очень наглядное представление о том, как распределяется данное электрическое поле в пространстве.

Там, где напряженность поля велика,— линии проводятся густо, там, где поле слабое,— густота линий невелика.

Поле, напряженность которого во всех точках имеет одну и ту же величину и направление, называется однородным. Силовые линии однородного поля представляют собой

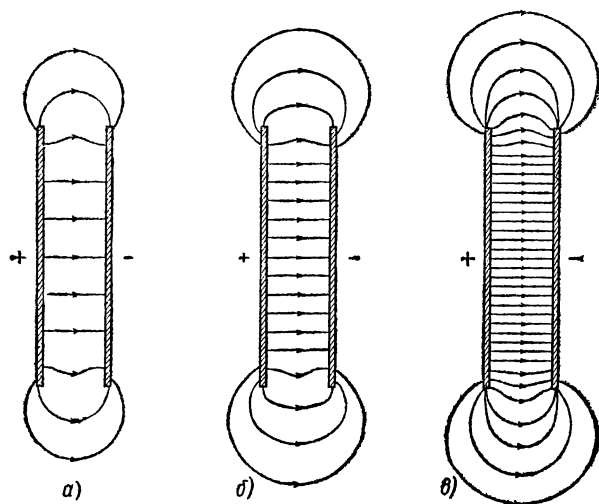


Рис. 36. Три примера полей между разноименно заряженными пластинками. В средней части поле однородно. Заряд на пластинках и напряженность поля в средней части меньше всего в а), несколько больше в б) и больше всего в в); в соответствии с этим линии наиболее редки в а), гуще в б) и наиболее густы в в).

п а р а л л е л ь н ы е прямые. На наших чертежах однородное поле также представится рядом параллельных и равноотстоящих прямых, проходящих тем гуще, чем сильнее изображаемое ими поле (рис. 36, а, б, и в).

Отметим, что цепочки, образуемые кристалликами в опыте § 13, имеют ту же форму, что и силовые линии. Это естественно, так как каждый удлиненный кристаллик располагается по направлению напряженности поля в соответствующей точке. Поэтому рис. 27 и 28 дают п о д о б и е

карты силовых линий между параллельными пластинами и возле двух заряженных шаров. Применяя тела различной формы, можно с помощью таких опытов легко найти картины распределения силовых линий для различных полей.

§ 18. Основные особенности электрических карт. При построении электрических карт нужно иметь в виду следующее:

1) Так как электрическое поле существует во всех точках пространства, то *через любую точку пространства всегда можно провести силовую линию.*

2) При заданном распределении электрических зарядов напряженность электрического поля в любой точке будет совершенно определенной как по величине, так и по направлению. Это значит, что через каждую точку поля можно провести силовую линию только вполне определенного направления, т. е. всего одну силовую линию. Другими словами, *силовые линии не пересекаются.*

3) Пересечение силовых линий может иметь место только у точечного заряда (рис. 33): из положительного заряда линии *исходят* (начало силовых линий), у отрицательного заряда силовые линии *сходятся* (конец силовых линий). *Силовые линии нигде не обрываются*; они направлены от положительных зарядов к отрицательным и проходят сквозь диэлектрики (изоляторы).

4) Так как при равновесии зарядов электрическое поле внутри проводников отсутствует, то *внутри проводников нет силовых линий.* Силовые линии не проходят внутрь проводников, но начинаются и кончаются на их поверхности. Так как началом и концом силовой линии являются электрические заряды, то на поверхности проводника, откуда *начинаются* силовые линии, располагаются *положительные* заряды, а на поверхностях, где кончаются силовые линии, лежат *отрицательные* заряды.

5) *Силовые линии направлены перпендикулярно к поверхности проводника.* Действительно, силовые линии указывают направление сил, действующих на заряд. Если бы они были наклонены к поверхности проводника, то у поверхности силы имели бы составляющую, направленную *вдоль* поверхности проводника. Под действием этой составляющей электрической силы происходило бы перемещение зарядов *вдоль* поверхности. Равновесие зарядов возможно лишь в том случае, когда силовые линии начинаются

и оканчиваются перпендикулярно к поверхности проводника.

§ 19. Применение метода силовых линий к задачам электростатики. Пользуясь изложенными правилами (§ 18), мы можем с помощью силовых линий удобно решать многочисленные задачи электростатики. Проведем от каждого

заряда такое число линий, чтобы густота их выражала численно напряженность поля (§ 17). Так как с увеличением заряда напряженность поля возрастает пропорционально заряду, то число линий, исходящих от заряда, должно быть также пропорционально заряду; поэтому от равных зарядов мы проводим одинаковое число силовых линий. Но силовые линии, начинаясь на положительных зарядах, оканчиваются на отрицательных. Таким образом, у всех линий, начинающихся на положительных зарядах, на концах будут отрицательные заряды, причем общая величина отрицательных и положительных зарядов будет одинакова. Это заключение вполне соответствует наблюдению (§ 5), что электризация всегда есть разделение равных положительных и отрицательных зарядов.

Проследим с помощью картины силовых линий явление индукции. Вообразим электрический заряд Q , например положительный, помещенный внутрь замкнутой металлической полости S (рис. 37). На обращенной к заряду Q поверхности полости индуцируются заряды противополож-

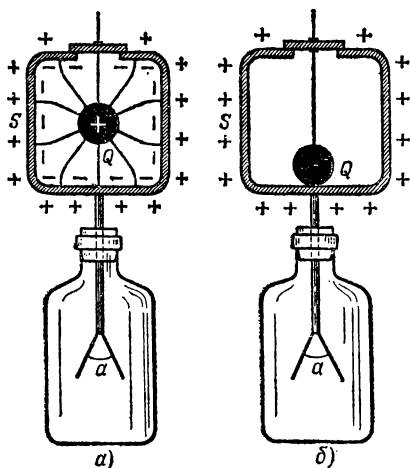


Рис. 37. а) Заряженное тело Q внутри полости. На внутренней поверхности индуцирован заряд $-Q$, на внешней поверхности, соединенной с электроскопом, расположен заряд $+Q$. б) Заряженное тело Q касается внутренней поверхности полости. Заряд тела Q и заряд, индуцированный на внутренней поверхности, нейтрализованы. На внешней поверхности, соединенной с электроскопом, располагается заряд $+Q$, как и в случае а).

ного знака; а так как все силовые линии, начинающиеся на Q , должны кончаться на внутренней поверхности полости (ибо силовые линии не проходят сквозь проводник), то величина индуцированного заряда должна численно равняться индуцируемому заряду Q . На наружной поверхности нашей металлической оболочки (частью которой является и стержень электроскопа с листочками) распределяется положительный индуцированный заряд, численно равный отрицательному, индуцированному на внутренней поверхности и, следовательно, равный внесенному заряду Q . Если внесенный заряд Q привести в соприкосновение с внутренней поверхностью, на которой индуцирован заряд — Q ; то эти два равных и противоположных заряда взаимно нейтрализуются и на поверхности оболочки останется заряд $+Q$ (рис. 37, б).

Понятно, что на рис. 37, б от всех положительных зарядов на поверхности полости следовало бы провести силовые линии, изображающие окружающее электрическое поле, но мы этого не будем делать, так как для этой цели надо знать, как располагаются все окружающие предметы.

Таким образом легко объясняется, что при введении заряда внутрь металлической полости мы полностью передаем этот заряд нашей оболочке. В то же время становятся понятными опыты (§ 5), когда мы использовали полость, соединенную с электроскопом, для того, чтобы проверить равенство двух противоположных зарядов, образующихся при трении.

Если бы полость, в которую внесен заряд Q , была не вполне замкнутая (рис. 38, а), то часть силовых линий, исходящих от Q , могла выйти через отверстие полости и закончиться на других телах. Таким образом, на внутренней поверхности полости кончались бы не все линии, исходящие от Q , т. е. индуцированный на этой поверхности отрицательный заряд Q' был бы меньше Q . Такая незамкнутая полость не является вполне совершенным прибором для опытов § 5. Но если отверстие полости невелико и удалено от места расположения заряда Q , то практически все линии кончаются на внутренней поверхности полости и ее можно рассматривать как замкнутую (узкий и глубокий цилиндр или «ведерко Фарадея», рис. 38, б).

Упражнения. 19.1. Начертите силовые линии точечного отрицательного заряда и укажите их направление.

19.2. Чему равна напряженность поля внутри равномерно заряженной сферической поверхности?

19.3. Чему равна напряженность поля в центре равномерно заряженного проволочного кольца, имеющего форму окружности?

19.4. Желая знать, находятся ли линии электропередачи под током, на практике иногда навешивают на провода легкие бумажные флаж-

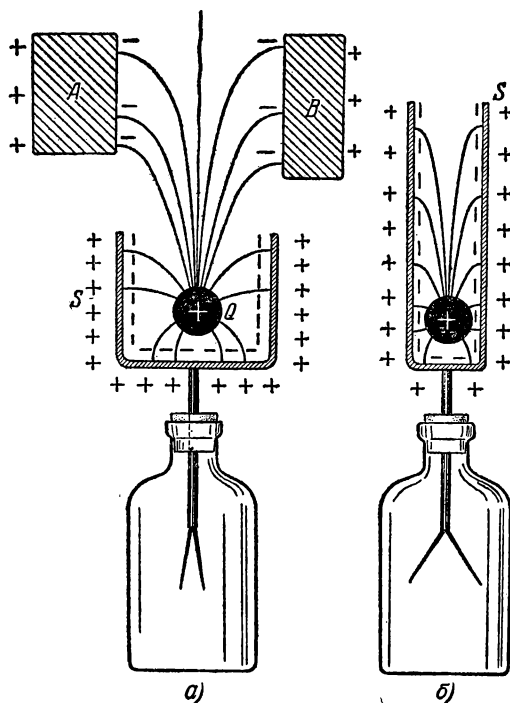


Рис. 38. а) Часть силовых линий, идущих от Q , не попадает на внутреннюю поверхность полости S и оканчивается на каких-нибудь других проводниках A и B , находящихся поблизости. На внутренней поверхности S индуцируется заряд $-Q'$, численно меньший заряда Q . На внешней поверхности, соединенной с электроскопом, располагается заряд $+Q$, так что $Q' < Q$. б) Полость S настолько глубока и узка, что на внутренней поверхности ее индуцируется заряд $-Q$, а на внешней, соединенной с электроскопом, заряд $+Q$, равный заряду, внесенному в полость.

ки, которые при включенной линии выходят из вертикального положения и поворачиваются на некоторый угол. Почему это происходит?

19.5. Рассмотрите опыты, изображенные на рис. 37, а и б, если ящик S был предварительно заряжен: а) ящик S заряжен

положительно, вносится положительный заряд Q ; б) ящик S заряжен положительно, вносится отрицательный заряд Q . Нарисуйте картины силового поля для обоих случаев.

§ 20. Работа при перемещении заряда в электрическом поле. На всякий заряд, находящийся в электрическом поле, действует сила, и поэтому при движении заряда в поле совершается определенная работа. Величина этой работы зависит от распределения напряженности в разных точках поля и от перемещения заряда. Но если заряд описывает замкнутую кривую, т. е. возвращается в исходное положение, то совершаемая при этом работа всегда равна нулю, как бы ни было сложно поле и по какой бы прихотливой кривой не происходило движение.

Это важное свойство электрического поля нужно несколько пояснить. Для этого рассмотрим сначала движение тела в поле силы тяжести. Работа, как мы знаем (т. I, «Механика»), равна произведению силы на перемещение и на косинус угла между ними ($A = F \cdot s \cdot \cos \alpha$). Если этот угол острый ($\alpha < 90^\circ$), то работа положительна, т. е. совершается силой F , если же он тупой ($\alpha > 90^\circ$), то работа отрицательна, т. е. совершается против силы F . В первом случае мы получаем работу за счет действия силы F , во втором — затрачиваем работу на преодоление этой силы. Представим себе, что в поле сил тяжести, т. е. в пространстве вблизи земной поверхности, где действуют силы притяжения к Земле, перемещается какое-нибудь тело.

Мы предполагаем, что при этом перемещении нет трения, так что наше тело не испытывает изменений состояния, которые могут сопровождаться изменениями его внутренней энергии: тело не нагревается, не распадается на части, не изменяет своего агрегатного состояния, не испытывает пластической деформации и т. д. (т. I, «Механика»). В таком случае всякое перемещение тела в поле силы тяжести может сопровождаться лишь изменением потенциальной и кинетической энергии. Если тело опускается, то потенциальная энергия системы Земля — тело уменьшается, а кинетическая энергия тела увеличивается на соответствующую величину; наоборот, при подъеме тела происходит возрастание потенциальной энергии и одновременно уменьшение кинетической энергии. При этом *полная механическая энергия*, т. е. сумма потенциальной и кинетической, *остается постоянной* (т. I, «Механика»). Как бы ни был сложен путь тела в поле сил тяжести (подъем и опускание

по вертикальной, наклонной или криволинейной траектории, передвижение по горизонтальному направлению), но если в конце концов тело приходит в исходную точку, т. е. описывает замкнутый путь, то система Земля — тело возвращается в исходное положение и имеет ту же самую энергию, какой она обладала до начала перемещения тела. Это означает, что сумма положительных работ, совершившихся силой тяжести при опускании тела, в точности равна сумме тех отрицательных работ, которые производились против сил тяжести на участках пути, соответствующих подъему тела. Иными словами, алгебраическая сумма всех работ на отдельных участках пути, или *полная работа на замкнутом пути равна нулю*.

Из изложенного ясно, что наш вывод справедлив лишь в том случае, если в процессе участвовали лишь силы тяжести и отсутствовали силы трения и всевозможные другие силы, могущие вызвать указанные выше изменения внутренней энергии. Таким образом, силы поля тяжести в отличие от многих других сил, например сил трения, обладают свойством, которое мы можем сформулировать так: *работа, совершаемая силами тяжести при перемещении тела по замкнутому пути, равна нулю*. Нетрудно видеть, что это свойство сил тяжести является выражением закона сохранения (консервации) полной механической энергии. В связи с этим силовые поля, которые обладают указанным свойством, называют консервативными.

Подобно полю сил тяжести, *электрическое поле, создаваемое покоящимися электрическими зарядами, также является консервативным*. Когда в нем перемещается заряд, то на тех участках пути, где направление перемещения составляет с силовой линией поля, т. е. с направлением силы, острый угол (например, в точке *a* на рис. 39), работу совершают силы поля, т. е. она положительна. Напротив, там, где этот угол тупой (точка *b*), работа отрицательна, т. е. совершается против сил поля, затрачивается на их преодоление. Когда заряд, пройдя по замкнутому пути, вернется в исходную точку, то полная работа на этом пути, представляющая собой алгебраическую сумму положительных работ на одних участках и отрицательных на других, равна нулю.

Строгое математическое доказательство консервативности электрического поля в общем случае довольно сложно, и мы ограничимся

поэтому доказательством этого свойства поля для простейшего случая — поля, создаваемого одним точечным зарядом.

Пусть в электрическом поле неподвижного точечного заряда Q второй заряд q движется вдоль произвольной замкнутой кривой $ACDBGEA$ (рис. 39) и после обхода вдоль кривой возвращается в исходную точку A . Для подсчета совершаемой при этом работы проведем

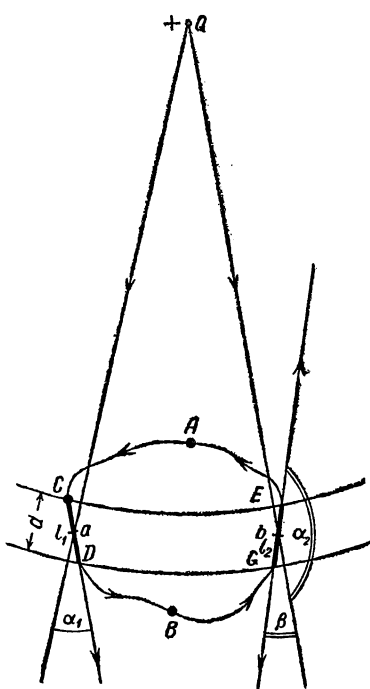


Рис. 39. К доказательству независимости работы в электрическом поле от формы пути.

Кроме того, из чертежа видно, что

$$l_1 \cdot \cos \alpha_1 = l_2 \cdot \cos \alpha_2 = d,$$

так как каждая из этих величин равна расстоянию d между сферами, заключающими отрезки l_1 и l_2 . Поэтому мы находим, что

$$A_{CD} = -A_{GE},$$

т. е. что алгебраическая сумма работ на обоих участках CD и GE равна нулю. Такой же результат мы получим и для любой другой пары соответствующих отрезков пути, заключенных между другими сферами. Поэтому и полная работа при обходе по замкнутому контуру, равная сумме работ на отдельных отрезках, тоже будет равна нулю.

мысленно ряд сфер с центром в заряде Q , которые разобьют весь путь заряда на малые отрезки, и рассмотрим два таких отрезка: $CD = l_1$ и $GE = l_2$, лежащие между одними и теми же сферами. Если отрезки l_1 и l_2 достаточно малы, то можно считать, что сила, действующая на заряд q , во всех точках каждого из отрезков постоянна. Так как оба отрезка находятся на равном расстоянии от заряда Q , то согласно закону Кулона эта сила имеет на обоих отрезках одинаковую величину и отличается только направлением, образуя разные углы α_1 и α_2 с направлением перемещения. Наконец, при достаточной малости l_1 и l_2 эти отрезки можно считать прямолинейными. Поэтому работа A_{CD} , совершаемая электрическими силами на пути CD , будет равна произведению силы на путь и на косинус угла между направлениями силы и перемещения, т. е.

$$A_{CD} = F \cdot l_1 \cdot \cos \alpha_1.$$

Точно так же работа A_{GE} , совершаемая на пути GE , равна

$$A_{GE} = F \cdot l_2 \cdot \cos \alpha_2.$$

Но $\cos \alpha_2 = \cos (180^\circ - \beta) = -\cos \beta$, так что $A_{GE} = -F \cdot l_2 \cdot \cos \beta$.

Мы получили этот результат для случая электрического поля одного точечного заряда. Он оказывается справедливым для любого электростатического поля, т. е. поля, созданного неподвижными зарядами, так как поле, создаваемое любым распределением заряда, можно свести к полю совокупности точечных зарядов.

Итак, в электрическом поле работа при перемещении заряда по замкнутому контуру всегда равна нулю.

Так как работа на пути $ACDBGEA$ равна нулю, то, следовательно, работа на пути $ACDB$ равна по величине и противоположна по знаку работе на пути $BGEA$. Но работа при перемещении заряда на пути $BGEA$ равна и противоположна по знаку работе при перемещении того же заряда во встречном направлении, т. е. по пути $AEGB$. Отсюда следует, что работа на пути $ACDB$ (рис. 39) равна по величине и по знаку работе по пути $AEGB$. Так как выбранный криволинейный путь совершенно произволен, то полученный результат можно выразить еще и так:

Работа при перемещении заряда между двумя точками в электрическом поле не зависит от формы пути. Она определяется только положением начальной и конечной точек пути.

У п р а ж н е н и е. 20.1. Укажите по возможности больше черты сходства и различия между электрическим полем и гравитационным полем (полем сил тяжести).

§ 21. Электрическое напряжение, или разность потенциалов. Выберем в электрическом поле, например в поле между положительно заряженной пластинкой и отрицательным шариком, две какие-либо точки A и B (рис. 40) и перенесем положительный заряд $+q$ по произвольному пути ACB из точки A в точку B . Мы уже знаем (§ 20), что работа, совершаемая электрическими силами при движении заряда, не зависит от формы пути, по которому перемещается заряд. Поэтому работа на пути ACB будет такая же, как и на пути ADB , и вообще на любом пути, проведенном между точками A и B . Так как сила, действующая на заряд q , пропорциональна величине этого заряда (§ 14), то и работа на каждом отрезке пути, а следовательно, и полная работа A будут также пропорциональны q . Поэтому работа, совершаемая при движении единичного заряда, будет равна A/q . При заданном положении точек A и B работа перенесения единичного заряда зависит только от электрического поля и поэтому может служить его характеристикой.

Эта величина играет важную роль в физике и электротехнике; она получила название *электрического напряжения*¹⁾, или *разности потенциалов*, между точками *A* и *B*. Таким образом *разность потенциалов, или электрическое напряжение, между точками A и B есть отношение работы, которую совершают электрические силы при перемещении заряда из точки A в точку B, к величине этого заряда.*

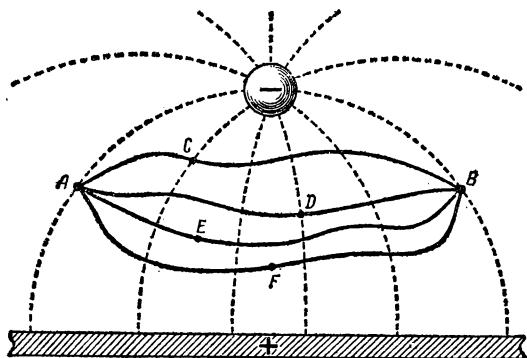


Рис. 40. К понятию разности потенциалов.

Если обозначить через U_{AB} электрическое напряжение, или разность потенциалов между точками *A* и *B*, то величина работы, совершаемой электрическими силами при переходе заряда q из точки *A* в точку *B*, выразится формулой

$$A = q \cdot U_{AB}. \quad (2,3)$$

Заряд q в формуле (2,3) есть величина алгебраическая, т. е. имеющая знак $+$ или $-$. Точно так же работу A мы считаем положительной, если она совершается силами поля (выигрывается), и отрицательной, если она совершается против сил поля (затрачивается). Поэтому для того, чтобы формула (2,3) давала нам правильный знак работы, мы должны условиться считать разность потенциалов между *A* и *B* (т. е. U_{AB})

¹⁾ Следует весьма остерегаться смешения понятий *напряженности поля*, т. е. силы, действующей на единичный заряд, и *напряжения* между данными точками, равного работе при перемещении единичного заряда между этими точками.

положительной, если при перемещении положительного заряда из точки A в точку B работа будет совершаться силами поля, т. е. будет получаться выигрыш работы. Другими словами, разность потенциалов между точками A и B равна работе электрических сил при переходе единичного положительного заряда из точки A в точку B . Очевидно, что при перемещении положительного заряда из точки B в точку A нам придется затратить, т. е. совершить против сил поля, такую же по абсолютной величине работу, т. е.

$$U_{BA} = -U_{AB}. \quad (2,4)$$

Если разность потенциалов U_{AB} была положительна, то, очевидно, разность потенциалов U_{BA} будет отрицательна.

Из определения разности потенциалов следует (рис. 40):

$$U_{AB} = U_{AC} + U_{CB}; \quad U_{AC} = U_{AB} - U_{CB} = U_{AB} + U_{BC}. \quad (2,4')$$

Применяя это соотношение, мы должны только внимательно следить за знаками. Если, например, $U_{AC} = +10$ единиц, а $U_{CB} = -15$ единиц, то $U_{AB} = -5$ единиц. Если $U_{AB} = +5$ единиц, а $U_{BC} = +7$ единиц, то $U_{AC} = +12$ единиц и т. п.

Если мы положим в формуле (2,3) $q=1$ и $A=1$, то $U=1$. Это значит, что мы принимаем напряжение (разность потенциалов) между двумя точками за единицу, если при перемещении единичного заряда между этими точками совершается единица работы. В системе СГС за единицу напряжения принимается такое напряжение, при котором перенесение 1 положительной абсолютной электрической единицы требует со стороны электрических сил затраты работы в 1 эрг. Практическая единица напряжения (разности потенциалов) получила название вольт (обозначается в или V).

Как мы уже знаем, в практической системе единиц, а также в Международной системе СИ заряд измеряется в кулонах, а работа в джоулях. Поэтому в обеих этих системах 1 вольт есть такая разность потенциалов (или такое напряжение) между двумя точками, при котором перемещение положительного заряда в 1 кулон между этими точками требует со стороны электрических сил затраты работы в 1 джоуль (10^7 эрг). Таким образом, если в формуле (2,3) выражать напряжение в вольтах, а заряд в кулонах, то

работа получится выраженной в джоулях. Так как $1 \kappa = 3 \cdot 10^9$ абс. эл.-ст. единиц заряда и $1 \text{ дж} = 10^7 \text{ эрг}$, то $1 \text{ вольт} = 1/300 \text{ абс. эл.-ст. единицы разности потенциалов}$.

Напомним, что используемая при определении вольта единица заряда (кулон) в системе СИ не является основной. Ее определение в этой системе будет дано ниже (§ 42).

Из сказанного выше ясно, что физический смысл имеет только *р а з н о с т ь* потенциалов, или напряжение, между *д в у м я* какими-либо точками в электрическом поле, так как работа по переносу заряда в поле определена только тогда, когда заданы и начало и конец этого пути переноса. Поэтому, когда мы говорим об электрическом напряжении, то мы всегда имеем в виду *д в е т о ч к и*, между которыми существует это напряжение. *Когда по некоторой небрежности речи говорят о напряжении или потенциале в одной какой-либо точке, то всегда подразумевают разность потенциалов между этой точкой и какой-то другой, выбранной заранее.*

Иногда совершенно условно приписывают какой-либо точке поля, от которой отсчитывают разности потенциалов для всех других точек, потенциал, равный нулю, а каждой другой точке поля приписывают потенциал, равный разности потенциалов поля между данной точкой и «нулевой». Такое приписывание каждой точке поля определенного «потенциала» имеет совершенно условный характер. Оно совершенно аналогично тому условию, каким пользуются геодезисты при нивелировке местности, приписывая каждой точке на земной поверхности определенную «высоту» и разумея при этом его высоту над уровнем моря, который произвольно принимается за нуль для отсчета высот. Мы могли бы, однако, с таким же успехом отсчитывать все высоты не от уровня моря, а от любой иной точки, например, от восточной вершины Эльбруса. Уровню моря соответствовала бы при этом высота, равная — 5,4 км, а высоты всех пунктов на земле уменьшились бы на столько же, но это не имело бы никакого значения, ибо реальное физическое значение имеет только *р а з н о с т ь* в ы с о т двух точек, которая, конечно, остается прежней. Точно так же, выбрав для отсчета разностей потенциалов иную «нулевую» точку, мы получили бы для точки, значение потенциала которой ранее принималось равным нулю, какое-то иное значение, скажем, $+100 \text{ в}$ (или -30 в). Все значения «потенциалов»

в отдельных точках поля увеличились бы тоже на 100 в (или уменьшились на 30 в), но это не имело бы никакого значения, ибо разность потенциалов между любыми точками осталась бы прежней, а, как мы подчеркивали выше, реальный физический смысл имеет только разность потенциалов, или электрическое напряжение между двумя точками. Конечно, удобство измерения требует, чтобы потенциал избранной точки во все время измерения оставался неизменным; иначе отсчитанные от этой точки значения потенциалов других точек поля были бы несравнимы между собой, что крайне затруднило бы пользование этим способом характеристики поля. Положение было бы столь же неудобным, как положение геодезиста, который при нивелировке принял бы за нуль высоты высоту движущегося воздушного шара.

§ 22. Эквипотенциальные поверхности. Подобно тому, как мы графически изображаем силовыми линиями напряженность поля, можно графически изобразить и разность потенциалов (напряжение).

Вообразим поверхность, для любой пары точек которой разность потенциалов равна нулю. Такая поверхность называется *эквипотенциальной поверхностью*, или *поверхностью равного потенциала*. Пересекаясь с плоскостью чертежа, эта поверхность образует некоторую линию — *эквипотенциальную линию*. Согласно формуле (2,3) при перемещении заряда вдоль такой поверхности (или линии) работа электрических сил равна нулю. Это может быть только в том случае, если направление перемещения все время перпендикулярно к действующей силе, а значит, *эквипотенциальная поверхность в любой точке перпендикулярна к силовым линиям*. И обратно, всякая поверхность, перпендикулярная в любой точке к силовым линиям, есть эквипотенциальная поверхность, так как перемещение заряда вдоль этой поверхности вследствие перпендикулярности силы и перемещения не будет сопровождаться работой электрических сил.

На плоском чертеже мы изображаем не самые эквипотенциальные поверхности, а лишь их сечение плоскостью чертежа, т. е. *эквипотенциальные линии*. С их помощью мы получаем наглядное представление о том, как изменяется разность потенциалов в данном поле. Их удобно чертить таким образом, чтобы разность потен-

циалов для любых двух соседних линий была одна и та же, например 1 в. Для того чтобы эту разность потенциалов показать на чертеже, мы выберем произвольную эквипотенциальную линию, отметим ее цифрой 0 и будем проставлять возле всех остальных цифры 1, 2, 3 и т. д., указывающие разность потенциалов в вольтах между точками данной эквипотенциальной линии и линии, выбранной нами за нулевую. При этом выбор нулевой линии (нулевой поверхности) совершенно произволен, так как физический смысл имеет только разность потенциалов для двух каких-либо поверхностей (§ 21), а эта разность, очевидно, не зависит от выбора нулевой поверхности.

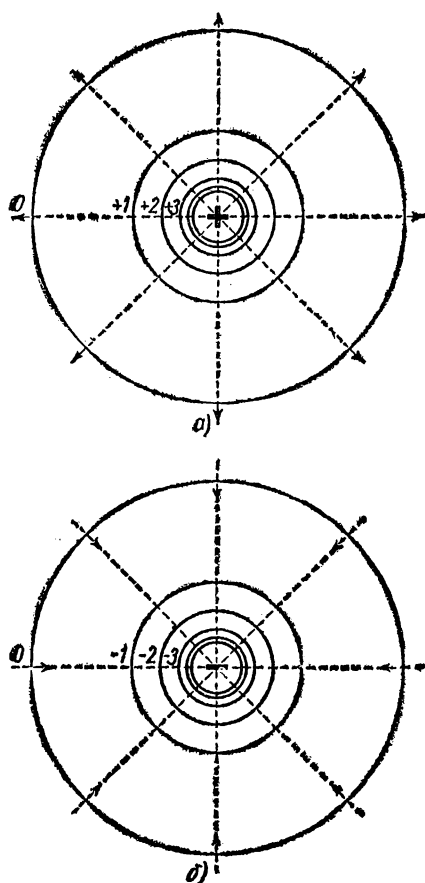


Рис. 41. а) Карта эквипотенциальных поверхностей точечного положительного заряда. б) Карта эквипотенциальных поверхностей точечного отрицательного заряда.

Рассмотрим в качестве примера поле точечного положительного заряда. В этом случае силовые линии — радиальные прямые, и поэтому эквипотенциальные поверхности — concentricкие сферы, которые в каждой точке перпендикулярны силовым линиям. Эквипотенциальные линии — concentricкие окружности, изображенные на рис.

41, а. При построении этого чертежа за нулевую линию была выбрана произвольная окружность и затем построены окружности с разностью потенциалов (относительно нулевой

окружности) 1, 2, 3 и т. д. вольт. На рис. 41, б показаны построенные таким образом эквипотенциальные линии точечного отрицательного заряда.

§ 23. В чем смысл введения разности потенциалов, или электрического напряжения? В § 21 мы ввели новую величину — разность потенциалов. Для чего же служит эта величина и в чем заключается ее польза?

Зная разность потенциалов для всех точек поля, т. е. имея график эквипотенциальных поверхностей, можно просто определить и напряженность этого поля. Действительно, пусть A, B, C, D, E и т. д. (рис. 42) — эквипотенциальные поверхности.

Они в каждой своей точке перпендикулярны силовым линиям (§ 22), и поэтому, прочерчивая линии LM , перпендикулярные к эквипотенциальным поверхностям, мы сразу находим силовые линии данного поля, т. е. определяем направление поля в каждой точке ¹⁾.

Для того чтобы найти величину напряженности поля в точке a , лежащей на некоторой эквипотенциальной поверхности AA , перенесем мысленно заряд q из точки a вдоль силовой линии в соседнюю точку b , лежащую на другой эквипотенциальной поверхности BB . Пусть разность потенциалов поверхностей A и B равна U_{AB} , а длина отрезка ab (т. е. расстояние между этими поверхностями) равна l . Тогда работа, совершаемая электрическими силами при этом перемещении, согласно формуле (2,3) равна $U_{AB} \cdot q$. С другой стороны, эта же работа равна произведе-

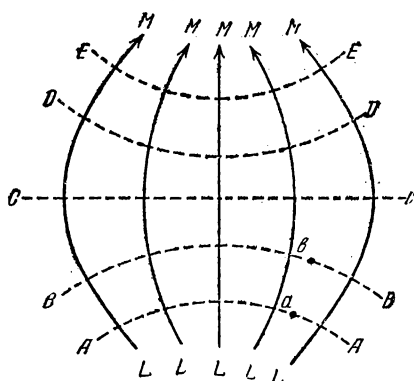


Рис. 42. Построение силовых линий LM по эквипотенциальным поверхностям A, B, C, D, E .

¹⁾ Конечно, рис. 42 плоский, так что, собственно говоря, мы изображаем на нем лишь эквипотенциальные линии и силовые линии, лежащие в плоскости чертежа. Для полной характеристики электрического поля в пространстве надо было бы строить пространственную модель, что, к сожалению, слишком затруднительно.

нию силы F на величину перемещения l , т. е. равна $F \cdot l$, так как направления перемещения и направление силы в этом случае все время совпадают. Но согласно формуле (2,1) $F = q \cdot E$. Поэтому искомая работа есть

$$q \cdot E \cdot l = U_{AB} \cdot q,$$

и отсюда

$$E = \frac{U_{AB}}{l}. \quad (2,5)$$

Если напряженность поля в разных точках отрезка l различна, то формула (2,5) определяет среднюю напряженность поля на отрезке l . Для получения истинной напряженности в данной точке надо выбирать l достаточно малым.

Величина U_{AB}/l представляет собой разность потенциалов между концами силовой линии длиной в 1 см, или, как еще принято говорить, *напряжение на 1 см длины силовой линии*. Мы видим, что *напряженность в каком-либо месте поля равна напряжению на 1 см длины силовой линии*.

С другой стороны, если эквипотенциальные поверхности прочерчены через 1 в, то в формуле (2,5)

$$U_{AB} = 1 \text{ и } E = \frac{1}{l},$$

т. е. напряженность поля равна обратной величине от расстояния между соседними эквипотенциальными поверхностями. Другими словами, *чем теснее расположены эквипотенциальные поверхности, тем больше напряженность поля в данном месте*.

Из формулы (2,5) следует, что для поля, напряженность которого равна единице, напряжение на сантиметр длины равно единице. Поэтому практическая единица напряженности поля получила название «*вольт на сантиметр*» (в/см).

В Международной системе СИ за единицу длины взят метр, и поэтому за единицу напряженности электрического поля принимается напряженность $1 \text{ в/м} = 0,01 \text{ в/см}$.

Мы видим, что, зная разность потенциалов между любыми двумя точками поля (или, как иногда говорят, зная распределение потенциала поля), мы можем определить в каждой точке поля и напряженность электрического поля, т.е. найти силы, действующие на заряды в этом поле.

У п р а ж н е н и я . 23.1. Две параллельные плоские пластины, находящиеся на расстоянии 10 см друг от друга, заряжены до разности потенциалов 1000 в. Какая сила будет действовать на заряд в 0,0001 к, помещенный между пластинами?

23.2. Опыт показывает, что у поверхности Земли имеется электрическое поле, направленное к Земле, напряженность которого около 1,3 в/см. Какая сила действует на положительный ион водорода вблизи Земли и куда эта сила направлена? Во сколько раз она больше веса этого иона? Масса атома водорода равна $1,6 \cdot 10^{-24}$ г. Заряд электрона равен $1,60 \cdot 10^{-19}$ к.

Из формулы (2,5) следует, что если U_{AB} положительно, то и E положительно. Мы условились считать положительным направлением напряженности поля то направление, в котором сила поля действует на положительный заряд (§ 13); поэтому п о л о ж и т е л ь н ы й з а р я д стремится двигаться в сторону у б ы в а н и я п о т е н ц и а л а . Наоборот, на отрицательный заряд поле действует так, что стремится передвинуть его в сторону возрастания потенциала.

Таким образом, при помощи разности потенциалов можно охарактеризовать электрическое поле так же полно, как и при помощи напряженности. График эквипотенциальных линий представляет собой такую же «электрическую карту», как и график силовых линий. Зная один из этих графиков, можно, согласно сказанному в § 22, без труда построить другой график. Относительно густоты проведения эквипотенциальных поверхностей можно повторить то же самое, что сказано в § 17 относительно густоты силовых линий. Если известно распределение потенциалов в поле, то можно очень просто разрешать важные задачи, относящиеся к электрическому полю. Во многих случаях решение таких задач с помощью распределения потенциалов проще, чем с помощью силовых линий.

В § 25 мы увидим также, что разность потенциалов гораздо легче измерить на опыте, чем напряженность поля. Поэтому описание поля при помощи разности потенциалов есть очень важный и полезный прием.

§ 24. Условия равновесия зарядов в проводниках. Рассмотрим условия равновесия зарядов в проводнике, воспользовавшись понятием разности потенциалов. Как уже указывалось в § 16, при равновесии зарядов напряженность поля в проводнике должна равняться нулю (т. е. электрическое поле в проводнике отсутствует). Но на основании (2,5) это означает, что *разность потенциалов между*

любыми точками проводника равна нулю. Это относится также и ко всем точкам поверхности проводника.

Следовательно, поверхность проводника является эквипотенциальной поверхностью.

Так как силовые линии поля перпендикулярны ко всем эквипотенциальным поверхностям (§ 22), то силовые линии перпендикулярны к поверхности проводника, — вывод, который мы уже получили в § 18.

Если мы имеем два изолированных проводника A и B (рис. 43), то поверхность каждого из них должна быть

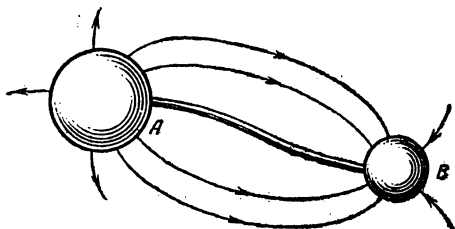


Рис. 43. При соединении проводников, между которыми существует некоторая разность потенциалов, заряды не могут находиться в равновесии, так как в соединительной проволоке существует электрическое поле. В результате соединения заряд перетекает с одного тела на другое до тех пор, пока разность потенциалов между A и B не становится равной нулю.

эквипотенциальной поверхностью. Но между поверхностями этих двух проводников может существовать разность потенциалов. Что произойдет, если эти два проводника соединить металлической проволокой? Между концами этой проволоки будет иметься разность потенциалов, равная разности потенциалов наших проводников. Следовательно, вдоль проволоки будет действовать электрическое поле, и поэтому в ней начнет движение свободных электронов, переходящих в сторону возрастания потенциала (§ 23), ибо электроны имеют отрицательный заряд. Вместе с этим движением начнется и перемещение электронов по проводникам A и B , в результате которого имевшаяся вначале разность потенциалов между проводниками будет уменьшаться. Движение электронов, т. е. электрический ток в проводниках и в соединяющей их

проводе, будет продолжаться до тех пор, пока разность потенциалов между всеми точками этих проводников не станет равной нулю и поверхности обоих проводников и проволоки между ними не сделаются одной эквипотенциальной поверхностью.

Наш земной шар в целом является проводником. Поэтому поверхность Земли есть также эквипотенциальная поверхность. При построении эквипотенциальных поверхностей нередко выбирают в качестве нулевой эквипотенциальную поверхность, совпадающую с поверхностью Земли, и иногда говорят вместо «разность потенциалов» просто «потенциал» в данной точке. При этом имеют в виду ту разность потенциалов, которая существует между этой точкой и какой-либо точкой поверхности Земли. Как уже было разъяснено в § 22, выбор поверхности Земли в качестве нулевой эквипотенциальной поверхности является вполне условным.

У п р а ж н е н и я . 24.1. Начертите приблизительный вид эквипотенциальных поверхностей и силовых линий поля возле положительного точечного заряда (маленького шарика), помещенного над земной поверхностью.

24.2. Начертите приблизительный вид эквипотенциальных поверхностей и силовых линий поля, возникающего между заряженным металлическим шаром и стенами комнаты.

24.3. Изменится ли электрическое поле, создаваемое зарядом, если этот заряд окружить тонкой незаряженной металлической поверхностью, совпадающей с одной из эквипотенциальных поверхностей?

§ 25. Электрометр.

Посмотрим теперь, каким образом можно измерить на опыте разность потенциалов. Для этого рассмотрим прибор, изображенный на рис. 44. Он представляет

собой не что иное, как обычный электроскоп с листочками, который, однако, имеет металлический корпус. Соединим корпус этого прибора с Землей и коснемся его стержня каким-либо заряженным телом. При

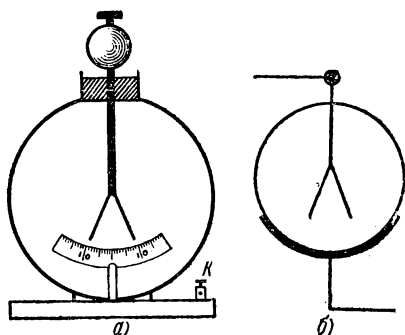


Рис. 44. Электрометр: K — зажим для присоединения провода, соединяющего металлический корпус с Землей; а) изображение; б) условная схема.

этом часть заряда перейдет на стержень и листочки разойдутся на некоторый угол. От чего зависит величина отклонения листочков?

При заряджении листочков внутри прибора возникает электрическое поле. Силовые линии этого поля показаны на рис. 45, *а* и *б* пунктиром, а его эквипотенциальные поверхности — сплошными линиями. Поверхность металлического корпуса есть эквипотенциальная поверхность (§ 24); то же относится к поверхности стержня и листочков; но, конечно, это — две р а з л и ч н ы е эквипотенциальные

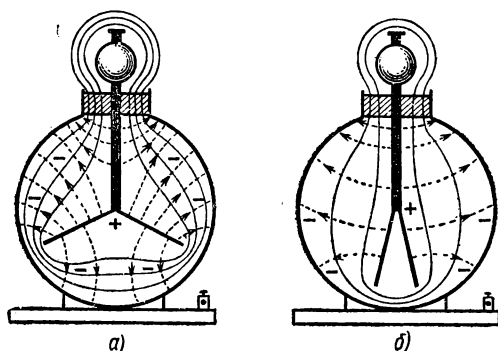


Рис. 45. *а)* Электрическое поле внутри электрометра при большой разности потенциалов между листочками и корпусом. *б)* Электрическое поле внутри электрометра при малой разности потенциалов между ними.

поверхности, между которыми имеется некоторая разность потенциалов, соответствующая полю внутри прибора. Между ними размещаются другие эквипотенциальные поверхности.

На наших чертежах мы прочертили их через одно и то же число вольт. Поэтому число изображенных на чертеже эквипотенциальных поверхностей зависит от разности потенциалов между листочками и корпусом. Если эта разность потенциалов велика, то эквипотенциальные поверхности, расположены очень г у с т о, и поэтому падение потенциала на единицу длины значительно; следовательно, согласно § 23, напряженность поля вокруг листочков тоже велика. Если, наоборот, разность потенциалов между листочками и корпусом мала, то падение напряжения невелико и напряженность поля возле листочков мала.

Отклонение листочков зависит от действующей на них силы, т. е. в конечном счете от напряженности электрического поля возле них. Чем больше разность потенциалов, тем больше напряженность поля возле листочков, тем больше и их отклонение. Создавая одинаковую разность потенциалов между листочками и корпусом, мы будем наблюдать и одинаковое отклонение листочков. Мы видим, что отклонение листочков в данном приборе зависит от разности потенциалов между ними и корпусом прибора. Приделав к нашему прибору шкалу, мы можем по отклонению листочков судить о разности потенциалов.

Приборы для измерения разности потенциалов называются **электрометрами**. На рис. 46 показан один из типов электрометра. Его можно **проградировать**, т. е. определить, какой разности потенциалов, выраженной в вольтах, соответствуют различные углы отклонения листочков, и тогда по отклонению листочков можно сразу же определить эту разность потенциалов, выраженную в вольтах. Из сказанного следует, что *электрометр всегда измеряет разность потенциалов между его листочками и корпусом*.

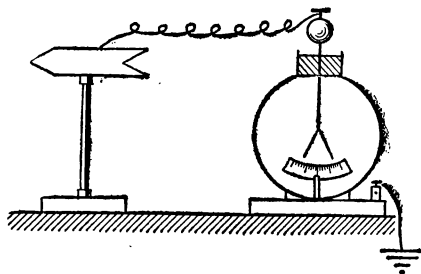


Рис. 46. Измерение разности потенциалов между проводником и Землей при помощи электрометра.

Для того чтобы при помощи электрометра измерить разность потенциалов между какими-либо двумя проводниками, например проводником (рис. 46) и Землей, нужно стержень (листочки) электрометра соединить с этим проводником, а его корпус — с Землей. Через очень короткое время стержень электрометра окажется при том же потенциале, что и соединенный с ним проводник, а потенциал корпуса электрометра сравняется с потенциалом Земли (см. далее § 27). Таким образом, показания электрометра дадут разность потенциалов между проводником и Землей. Перемещая конец проволоки, ведущей к электрометру, по поверхности проводника, можно убедиться, что отклонение листочков совершенно не меняется, т. е. что в согласии с § 24

поверхность проводника является эквипотенциальной поверхностью, какую бы сложную форму она не имела.

Можно, конечно, поступать наоборот: соединить с Землей стержень электрометра, а корпус его, тщательно изолировав (например, поставив на кусок парафина), соединить с изучаемым проводником (рис. 47).

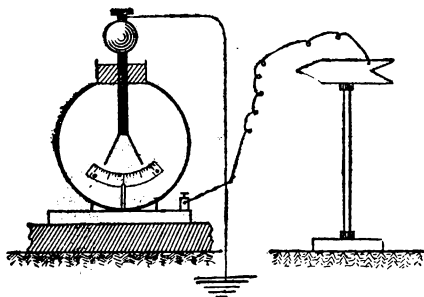


Рис. 47. Другой способ измерения разности потенциалов между проводником и Землей при помощи электрометра.

Показания электрометра в этом случае дают разность потенциалов между его стержнем и корпусом, а следовательно, разность потенциалов между нашим проводником и Землей.

§ 26. В чем различие между электрометром и электроскопом? Удаляя металлический корпус электрометра или заменяя его стеклянным колпаком, мы получим простой электроскоп (§ 1). При этом силовые линии электрического поля, исходящие от зарядов, будут, проходя через стекло, оканчиваться на окружающих предметах (рис. 48, а и б), и роль корпуса будут играть стены и потолок комнаты, тело экспериментатора и т. п. В этом случае расположение эквипотенциальных поверхностей вокруг листочков, а значит, и электрическое поле будут зависеть от положения этих предметов и при одной и той же разности потенциалов могут быть весьма различными. Отклонение листочков будет зависеть от случайного расположения окружающих тел, и поэтому электроскоп не пригоден для точного суждения о разности потенциалов. Жесткий (не меняющий формы) металлический корпус является принципиально необходимой частью электрометра, отличающей его от электроскопа.

Упражнение 26.1. При поднесении к заряженному электроскопу куска незаряженного стекла отклонение листочков уменьшается. Объясните это.

Мы видим, что отклонение листочков электроскопа в сущности зависит, так же как и у электрометра, от разности потенциалов (между листочками и окружа-

ющими их предметами). Между тем во всех предыдущих опытах мы употребляли электроскоп для суждения о величине заряда. Однако в этом нет никакого противоречия, так как указанная разность потенциалов зависит от величины заряда, сообщенного листочкам. Чем больше этот заряд, тем больше будет и разность потенциалов между листочками и окружающими проводниками, тем сильнее разойдутся листочки. Поэтому, переводя на электроскоп заряд с какого-либо тела, например, помещая это тело в металлическое ведерко, скрепленное с электроскопом (рис. 9), мы можем по отклонению листочков судить о величине заряда этого тела. То же самое, очевидно, относится и к электрометру. Каждый данный электрометр можно проградуировать не только на величину разности потенциалов, но и на величину заряда, выраженного, например, в кулонах.

§ 27. Соединение с Землей.

Мы уже знаем (§ 1), что при соединении с Землей стержня заряженного электроскопа он полностью разряжается и его листочки опадают. То же самое происходит и с любым иным проводящим телом: для того чтобы его можно было зарядить, оно обязательно должно быть изолировано от Земли и, наоборот, после соединения заряженного проводника с Землей вокруг него перестают наблюдаться всякие электрические действия, т. е. тело становится незаряженным. Сейчас мы можем разобрать подробнее, что при этом происходит.

В § 26 мы видели, что у электроскопа роль корпуса играют окружающие предметы, обычно заземленные: стены,

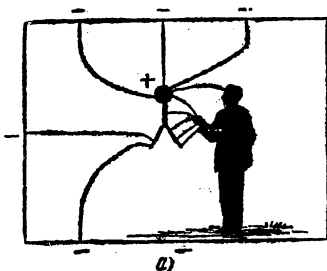


Рис. 48. а) Силовые линии электрического поля вокруг заряженного электроскопа в комнате (схематически). Для наглядности стеклянная банка электроскопа не изображена, а размеры электроскопа увеличены. б) При заземлении электроскопа электрическое поле вокруг него исчезает.

потолок и т. п. (рис. 48, а). Это значит, что силовые линии, берущие начало у заряженных листочков электроскопа, заканчиваются на проводниках, находящихся неподалеку от него и соединенных с Землей. При соединении электроскопа с Землей между ними происходит перемещение зарядов до тех пор, пока разность потенциалов между листочками и Землей, а следовательно, и любым из окружающих

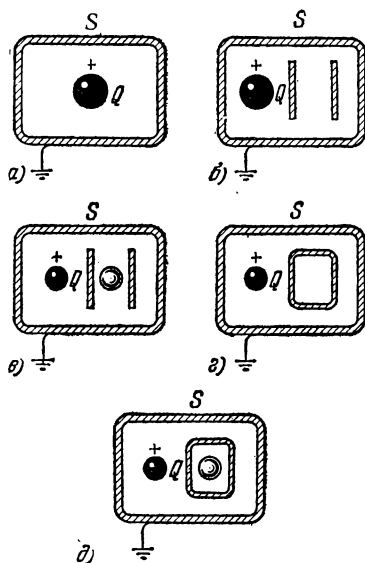


Рис. 49. К упражнению 27.4. Все тела внутри ящика являются проводниками.

заземленных тел, не делается равной нулю. При этом исчезает и электрическое поле, подымавшее листочки (рис. 48, б), и они опадают. То же происходит и при заземлении электрометра, корпус которого соединен с Землей (рис. 46). Если же корпус изолирован (рис. 47), то соединение с Землей стержня электрометра не обязательно ведет к спадаанию листочков.

Совершенно то же происходит и при заземлении любого тела. Мы судим о заряде тела по тем электрическим действиям, которые оно вызывает (например, по электрическому притяжению или отталкиванию), т. е. по тому электрическому полю, которое существует вокруг тела. При соединении заряженного проводника с Землей перестают

наблюдаться всякие электрические действия, так как разность потенциалов между телом и Землей становится равной нулю и, следовательно, в нуль обращается и напряженность окружающего поля. Именно это и с ч е з н о в е н и е п о л я мы и имеем в виду, когда говорим о том, что т е л о р а з р я д и л о с ь. Сам же электрический заряд при этом, конечно, не исчезает, а только п е р е р а с п р е д е л я е т с я между телом и Землей.

У п р а ж н е н и я. 27.1. Соединим листочки электрометра (стержень) и его корпус куском медной проволоки, изолируем его от Земли, поставив на стеклянную пластинку, и станем заряжать электрометр,

прикасаясь к нему сильно наэлектризованной эбонитовой палкой. Отклонятся ли его листочки?

27.2. Для того чтобы разрядить электроскоп, обычно достаточно коснуться его пальцем (рис. 48). Будет ли происходить то же самое, если поблизости от электроскопа находится изолированное от Земли заряженное тело?

27.3. Изменится ли показание электрометра в опыте, изображенном на рис. 46, если, изолировав электрометр от Земли, соединить с проводником его корпус, а с Землей — стержень с листочками?

27.4. Начертите картину силового поля для случаев, изображенных на рис. 49, когда положительный заряд внесен в заземленный металлический ящик.

§ 28. Измерение разности потенциалов в воздухе. Электрический зонд. Для измерения разности потенциалов между каким-нибудь изолированным металлическим проводником и Землей достаточно присоединить стержень электрометра металлической проволокой к проводнику, а корпус — к Земле. После такого присоединения листочки электрометра принимают тот же потенциал, что и наш проводник, ибо в металлах имеются свободные электроны, которые будут перемещаться, пока разность потенциалов между стержнем электрометра и проводником не сделается равной нулю. Таким образом, электрометр, показывающий разность потенциалов между стержнем и корпусом, одновременно будет показывать разность потенциалов между изучаемым проводником и Землей.

Труднее обстоит дело, если нам надо измерить разность потенциалов между какой-либо точкой в воздухе и Землей. Подводя от стержня электрометра проволоку к этой точке, мы еще не обеспечим уравнивания потенциала между этим участком воздуха и стержнем, ибо в воздухе, в обычных условиях, нет свободных зарядов, которые перемещались бы под действием поля до тех пор, пока разность потенциалов между исследуемым участком воздуха и проволокой, ведущей к электрометру, не станет равной нулю. Для того чтобы обеспечить такое выравнивание, надо снабдить соответствующий участок воздуха свободными зарядами, т. е. превратить его в проводник. Этого можно достигнуть различными способами, например при помощи пламени. Внутри пламени всегда имеется значительное число положительных и отрицательных ионов, которые и сообщат воздуху, соприкасающемуся с пламенем, необходимые свойства проводника. Если пламя невелико, то с его помощью мы снабдим ионами

небольшой участок воздуха в том месте, где помещено пламя.

Вводя конец проволоочки, идущей от стержня электрометра, в маленькое пламя, мы получаем возможность уравнивать разность потенциалов между стержнем электрометра

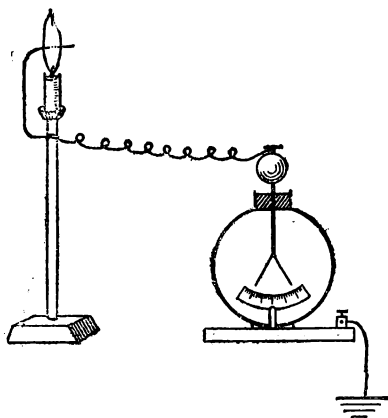


Рис. 50. Пламенный зонд.

и тем участком воздуха, куда мы помещаем пламя. Таким образом, мы можем измерить разность потенциалов между соответствующим участком воздуха и Землей. Помещая пламя в разные точки, мы можем «прощупать» расположение эквипотенциальных поверхностей в воздухе и вообще обследовать все распределение потенциала в электрическом поле в воздухе. Поэтому такое устройство получило название электрического щупа, или зонда (пламенный зонд, рис. 50). Оно широко применяется при обследовании электрического поля в воздухе, над поверхностью Земли.

Упражнение 28.1. Что будет измерять электрометр, если его листочки соединить металлической проволокой с пламенем одной свечи, а корпус, предварительно изолировав от Земли, соединить проволокой с пламенем другой свечи?

§ 29. Электрическое поле Земли. Опыт показывает, что электрометр, соединенный с зондом, дает заметное отклонение даже и в том случае, когда поблизости нет специально заряженных тел. При этом отклонение электрометра тем больше, чем выше точка над поверхностью Земли. Это значит, что между различными точками нашей атмосферы, находящимися на разной высоте, имеется разность потенциалов, т. е. около земной поверхности существует электрическое поле. Величина изменения потенциала с высотой различна в разное время года и для разных местностей и имеет в среднем вблизи земной поверхности значение около 130 в на каждый метр. Иными словами, напряженность поля вблизи Земли равна $1,3 \text{ в/см}$. По мере подъема над Землей поле это быстро ослабевает, и уже на высоте в 1 км напряженность его равна только $0,4 \text{ в/см}$, а на высоте в 10 км оно становится ничтожно слабым. Знак этого изменения соответствует отрицательному заряду Земли. Таким образом,

мы все время живем и работаем в заметном электрическом поле (см. упражнение 29.1).

Опытное исследование этого поля и соответствующие расчеты показывают, что Земля в целом обладает отрицательным зарядом, средняя величина которого оценивается в полмиллиона кулонов. Этот заряд поддерживается приблизительно неизменным благодаря ряду процессов в атмосфере Земли и вне ее (в мировом пространстве), которые еще далеко не полностью выяснены.

Естественно возникает вопрос: если на поверхности Земли постоянно находится отрицательный заряд, то где расположены соответствующие положительные заряды? Где начинаются те силовые линии электрического поля, которые оканчиваются на земной поверхности? Нетрудно видеть, что эти положительные заряды не могут находиться где-нибудь очень далеко от Земли, например на Луне, звездах или планетах. Если бы это было так, то поле вблизи Земли имело бы такой же вид, как поле изолированного шара на рис. 51. Напряженность этого поля убывала бы обратно пропорционально квадрату расстояния от центра Земли (а не от земной поверхности). Но радиус Земли равен примерно 6400 км, и поэтому изменение расстояния от центра Земли на несколько км или несколько десятков км могло бы лишь ничтожно мало изменить напряженность поля. Опыт же показывает, как мы отмечали выше, что напряженность электрического поля Земли очень быстро падает по мере удаления от нее. Это указывает на то, что положительный заряд, соответствующий отрицательному заряду Земли, находится где-то на не очень большой высоте над поверхностью Земли. Действительно, исследованиями последних лет на высоте нескольких десятков км над Землей обнаружен слой положительно заряженных (ионизованных) молекул. Объемный положительный заряд этого «облака» зарядов компенсирует отрицательный заряд Земли. Линии земного электрического поля идут от этого слоя к поверхности Земли.

Упражнение 29.1. Так как поле вблизи Земли имеет напряженность около 130 в/м, то между точками, в которых находятся голова и ноги каждого из нас, должно было бы быть напряжение свыше 200 в. Почему же мы не ощущаем этого поля, тогда как прикосновение к полюсам батареи или сети с напряжением в 100—120 в весьма болезненно и даже может быть опасно?

29.2. Измерения с электрическим зондом показывают, что изменение потенциала с высотой у поверхности Земли равно в среднем 100 в на каждый метр. Считая, что все это поле вызвано зарядом Земли, вычислите, какой заряд находится на земном шаре (радиус земного шара $R=6400$ км).

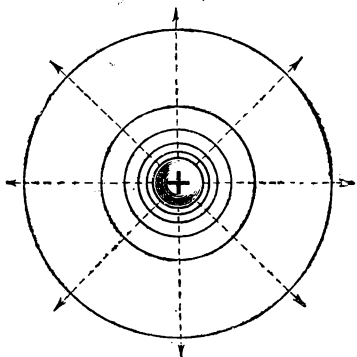


Рис. 51. Экипотенциальные поверхности (сплошные линии) и силовые линии (пунктир) заряженного шара, удаленного от других предметов. Внутри шара, как и внутри всякого проводника, поля нет.

§ 30. Простейшие электрические поля. Помещая электрический зонд в различные точки поля, можно изучить на опыте электрическое поле, обусловленное заряженными телами любой формы. Рассмотрим несколько простых примеров.

1) Заряженный шар, удаленный от других предметов. Если шар достаточно удален от других предметов (например, укреплен на высокой изолирующей ножке или подвешен на длинной нити), то электрометр в опыте

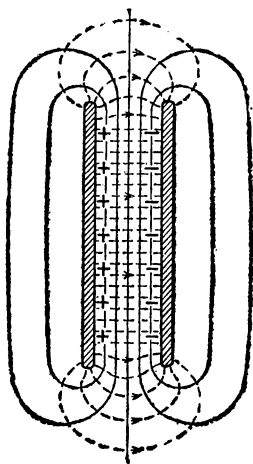


Рис. 52. Эквипотенциальные поверхности (сплошные линии) и силовые линии (пунктир) между двумя параллельными пластинками, заряженными противоположно.

рис. 50 дает одни и те же показания, когда зонд находится в точках, одинаково удаленных от центра шара. Это значит, что эквипотенциальные поверхности в этом случае имеют вид концентрических сфер. Передвигая зонд вдоль радиуса шара, мы находим, наоборот, наиболее быстрое изменение потенциала. Это показывает, что мы движемся вдоль силовой линии. Эквипотенциальные поверхности и силовые линии вокруг заряженного шара изображены на рис. 51. Отметим, что с приближением к другим предметам, например к стенам комнаты, эквипотенциальные поверхности перестают быть сферами и принимают более сложную форму. Однако, как показывает рис. 51, вдали от этих предметов, вблизи шара, и эквипотенциальные поверхности и силовые линии имеют тот же вид, что и для точечного заряда, помещенного в центре шара (рис. 41). Заряженный шар, удаленный от других предметов, создает вокруг себя такое же поле, как если бы его заряд был сосредоточен в центре.

2) Плоские параллельные пластины. На рис. 52 изображены эквипотенциальные поверхности и силовые линии поля между двумя плоскими параллельными пластинами, заряженными до некоторой разности потенциалов друг относительно друга. Мы видим, что эквипотенциальные поверхности имеют довольно сложную форму. Однако между пластинами эквипотенциальные поверхно-

сти почти не отличаются от плоскостей, параллельных поверхности пластин, а силовые линии — от параллельных между собой прямых, перпендикулярных пластинам. Если размеры пластин велики по сравнению с расстоянием между ними, то между пластинами (за исключением областей вблизи краев пластин) поле оказывается однородным, т. е. напряженность в разных точках имеет одну и ту же величину и направление (§ 17).

Мы знаем (§ 23), что напряженность поля равна падению напряжения на 1 см длины силовых линий. Поэтому если обозначить расстояние между пластинами через d (см), а разность потенциалов между ними через U (в), то напряженность поля E между пластинами будет

$$E = \frac{U}{d} \text{ в/см.} \quad (2,6)$$

У п р а ж н е н и е. 30.1. Между пластинами конденсатора, заряженного до 600 в, висит капелька ртути, несущая заряд Q и удерживаемая силами электростатического поля. Найдите заряд Q , если расстояние между пластинами $d=0,5$ см и масса капельки $m=3,8 \cdot 10^{-8}$ г.

3) **Коаксиальные цилиндры.** Рассмотрим в заключение электрическое поле, возникающее между двумя коаксиальными (имеющими общую ось) цилиндрами, заряженными до некоторой разности потенциалов (рис. 53, а). В этом случае эквипотенциальные поверхности в средней части не слишком близко к краям цилиндров имеют также вид коаксиальных цилиндров, а сверху и снизу эти цилиндры замыкаются куполообразными «крышками» (рис. 53, б).

В сечении плоскостью, проходящей через ось цилиндров (рис. 53, б), эквипотенциальные поверхности дают линии, напоминающие по форме линии поля между двумя пласти-

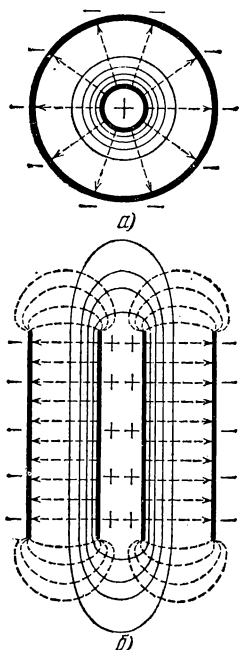


Рис. 53. Эквипотенциальные поверхности (сплошные линии) и силовые линии (пунктир) между двумя коаксиальными цилиндрами, заряженными противоположно.

а) Сечение плоскостью, перпендикулярной к оси цилиндров. б) Сечение плоскостью, проходящей через ось цилиндров.

нами (рис. 52). В средней части цилиндра, вдали от его краев, эти линии имеют вид прямых, параллельных осей цилиндров. Однако, в отличие от случая однородного поля между пластинами, здесь эти эквипотенциальные прямые уже не являются равноотстоящими друг от друга; они сгущаются вблизи внутреннего цилиндра и расположены все реже и реже по мере приближения к внешнему цилиндру. Это показывает, что в радиальном направлении поле не о д н о р о д н о: оно сильнее всего у внутреннего цилиндра и постепенно ослабевает по мере удаления от него. Это же видно и из рис. 53, а. В сечении плоскостью чертежа, перпендикулярной к оси цилиндра, эквипотенциальные поверхности дают эквипотенциальные линии в виде концентрических окружностей. Силовые линии, которые перпендикулярны ко всем эквипотенциальным поверхностям, представляют собой прямые, направленные по радиусам цилиндров. Мы видим, что густота силовых линий в этом поле неодинакова, она имеет наибольшее значение у поверхности внутреннего цилиндра, а наименьшее — у поверхности внешнего цилиндра, а значит, и напряженность поля достигает наибольшего значения у внутреннего цилиндра и постепенно уменьшается с удалением от его оси. Эта неоднородность тем больше, чем меньше диаметр внутреннего цилиндра по сравнению с внешним.

Таким образом, около тонкой нити можно создать электрическое поле очень большой напряженности. Это же будет наблюдаться и возле хорошего о с т р и я. Поле в б л и з и нити изменится незначительно, если изменять размеры внешнего цилиндра или даже менять его форму. В частности, роль внешнего цилиндра могут играть стены комнаты. Вблизи нити поле будет иметь такой же вид, как поле, изображенное на рис. 53. Нить и острие часто используют для создания в некотором месте поля большой напряженности (например, в так называемых с ч е т ч и к а х з а р я д о в).

У п р а ж н е н и я. 30.2. Начертите картину силового поля между двумя параллельными пластинами, заряженными равными и противоположными зарядами, если расстояние между пластинами: а) мало по сравнению с их размерами, б) велико по сравнению с их размерами.

30.3. Начертите такую картину, если между заряженными пластинами помещен металлический шарик или тело иной формы.

§ 31. Распределение зарядов в проводнике. Клетка Фарадея. Мы видели, что поверхность проводника, как

нейтрального, так и заряженного, является эквипотенциальной поверхностью (§ 24) и внутри проводника напряженность поля равна нулю (§ 16). То же относится и к п о л о м у проводнику: поверхность его есть поверхность эквипотенциальная и поле внутри полости равно нулю, как бы сильно ни был заряжен проводник, если, конечно, внутри полости нет изолированных от нашего проводника заряженных тел.

Этот вывод был наглядно продемонстрирован Фарадеем¹⁾, произведшим следующий опыт.

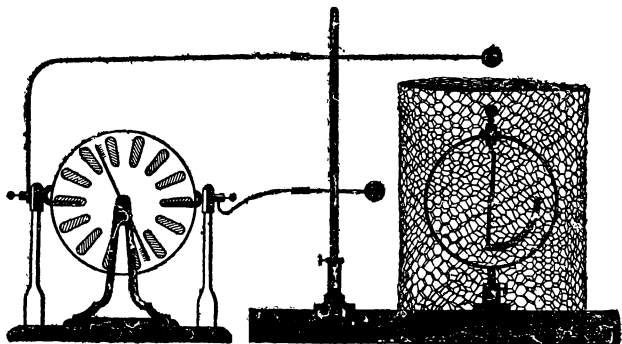


Рис. 54. Опыт Фарадея.

Большая деревянная клетка была оклеена листами ста-ниоля (оловянной бумагой), изолирована от Земли и сильно заряжена при помощи электрической машины. В клетку помещался сам Фарадей с очень чувствительным электро-скопом. Несмотря на то, что с внешней поверхности клетки при приближении к ней тел, соединенных с Землей, выле-тали искры, указывая этим на большую разность потенциа-лов между клеткой и Землёй, электроскоп в н у т р и клетки не показывал никакого отклонения (рис. 54).

Видоизменение этого опыта показано на рис. 55. Если сделать из металлической сетки замкнутую полость и приве-сить бумажные полоски с внутренней и внешней стороны полости, то обнаружим, что отклоняются лишь н а р у ж н ы е листочки. Это показывает, что электрическое поле

¹⁾ Михаил Фарадей (1791—1867) — английский физик, обогатив-ший науку рядом крупнейших открытий.

существует только в пространстве между нашей клеткой и окружающими ее предметами, т. е. снаружи клетки; внутри же полости поле отсутствует.

При заряджении любого проводника заряды распределяются в нем так, что электрическое поле внутри него исчезает, и разность потенциалов между любыми точками обращается в нуль. Посмотрим, каким образом для этого

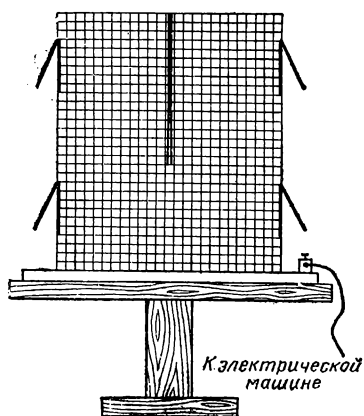


Рис. 55. Видоизменение опыта Фарадея. Металлическая клетка заряжена. Снаружи бумажки отклоняются, указывая на заряд на внешних стенках клетки. Внутри клетки заряда нет: бумажки не расходятся.

должны разместиться заряды.

Зарядим полый проводник, например полый изолированный шар *a* (рис. 56), имеющий небольшое отверстие. Возьмем маленькую металлическую пластинку *b*, укрепленную на изолирующей ручке («пробную пластинку»), коснемся ею какого-либо места внешней поверхности шара и затем приведем в соприкосновение с электроскопом. Листочки электроскопа разойдутся на некоторый угол, указывая этим, что пробная пластинка при соприкосновении с шаром зарядилась. Если мы, однако, коснемся пробной пла-

стинкой внутренней поверхности шара, то пластинка будет оставаться вовсе незаряженной, как бы сильно ни был заряжен шар. П о ч е р п н у т ь заряды можно только с внешней поверхности проводника, а с внутренней это оказывается невозможным. Более того: если мы предварительно зарядим пробную пластинку и коснемся ею внутренней поверхности проводника, то весь заряд перейдет на этот проводник. Это происходит независимо от того, какой заряд уже имелся на проводнике. В § 19 мы подробно разъяснили это явление. И так, в состоянии равновесия заряды распределяются только на внешней поверхности проводника. Конечно, если бы мы повторили с нашим проводником опыт, изображенный на рис. 46, присоединяя к проводнику конец проволоки, ведущей к электрометру, то мы убедились

бы, что вся поверхность проводника, как внешняя, так и внутренняя, есть поверхность одного потенциала: распределение зарядов по внешней поверхности проводника есть результат действия электрического поля; только когда весь заряд перейдет на поверхность проводника, установится равновесие, т. е. внутри проводника напряженность поля делается равной нулю и все точки проводника (внешняя поверхность, внутренняя поверхность и точки в толще металла) будут иметь один и тот же потенциал.

Таким образом, проводящая поверхность вполне защищает область, которую она окружает, от действия электрического поля, созданного зарядами, расположенными на этой поверхности или вне ее. Силовые линии внешнего поля оканчиваются на этой поверхности, в проводящем слое они не могут проходить, и внутренняя полость оказывается свободной от поля. Поэтому такие металлические поверхности называются электростатическими защитами. Интересно отметить, что даже поверхность, сделанная из металлической сетки, может служить защитой, если только сетка достаточно густа.

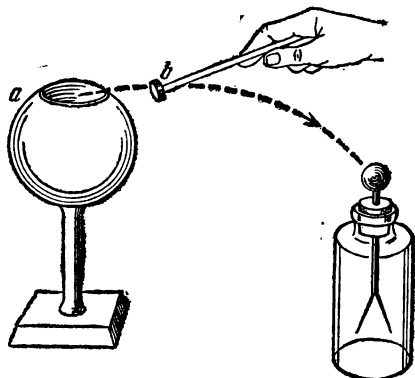


Рис. 56. Исследование распределения заряда в проводнике *a* при помощи пробной пластинки *b*. Внутри полости проводника заряда нет.

Упражнение 31.1. В центре полого изолированного металлического шара находится заряд. Отклонится ли заряженный грузик на шелковинке, помещенный вне шара? Разберите подробно, что при этом происходит. Что будет, если шар заземлен?

31.2. Почему пороховые склады для защиты от удара молний окружают со всех сторон заземленной металлической сеткой? Почему введенные в такое здание водопроводные трубы должны быть также хорошо заземлены?

Тем обстоятельством, что заряды распределяются на внешней поверхности проводника, часто пользуются на практике. Когда желают полностью перенести заряд ка-

кого-нибудь проводника на электроскоп (или электрометр), то к электроскопу присоединяют по возможности замкнутую металлическую полость и вводят заряженный проводник в н у т р ь этой полости. Проводник полностью разряжается и весь его заряд переходит на электроскоп. Это приспособление, в честь Фарадея, называют «ф а р а д е е в ы м ц и л и н д р о м», так как на практике эта полость чаще всего выполняется в виде металлического цилиндра. Мы уже пользовались этим свойством фарадеевого цилиндра (ведерка) в опыте, изображенном на рис. 9, и подробно разъяснили его в § 19.

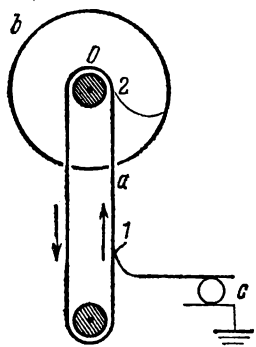


Рис. 57. Принцип устройства машины ван-дер-Граафа.

Ван-дер-Грааф предложил использовать свойства фарадеевого цилиндра для получения очень высоких напряжений. Принцип действия его машины показан на рис. 57. Бесконечная лента *a* из какого-нибудь изолирующего материала, например шелка, движется при помощи мотора на двух роликах и одним своим концом заходит внутрь полового, изолированного от Земли, металлического шара *b*. Вне шара лента при помощи кисточки *1* заряжается каким-либо источником, например батареей или электрической машиной *c*, до напряжения 30 000—50 000 в относительно Земли, если второй полюс батареи или машины заземлен. Вступая внутрь шара *b*, заряженные участки ленты касаются кисточки *2* и полностью отдают шару свой заряд, который сейчас же перераспределяется по внешней поверхности шара. Благодаря этому ничто не препятствует непрерывному переносу заряда на шар. Напряжение между шаром *b* и Землей непрерывно увеличивается. Таким образом, можно получить огромное напряжение в несколько миллионов вольт. Подобные машины применяют в опытах по расщеплению атомных ядер.

У п р а ж н е н и е. 31.3. Мог ли бы описанный в § 31 генератор ван-дер-Граафа работать, если бы шар его был сделан из изолирующего материала или если бы транспортерная лента в нем была проводящей (металлической)?

§ 32. Поверхностная плотность заряда. Исследуем теперь на опыте, каким образом распределяются заряды на внешней поверхности проводника. Для этого мы воспользуемся по-прежнему пробной пластинкой. Она должна быть гибкой или настолько малой, чтобы при соприкосновении с проводником ее можно было рассматривать как часть поверхности проводника. В этом случае на нее перейдет заряд, приходящийся на часть поверхности, совпадающей с пластинкой. Отношение этого заряда к площади, которую он

занимает, измеряет количество электричества, приходящееся на единицу поверхности в исследуемом месте. Эту величину называют *поверхностной плотностью заряда* в данном месте. Перенося пластинку в фарадеев цилиндр электрометра, мы сможем по отклонению листочков судить о величине поверхностной плотности заряда.

Касаясь пробной пластинкой различных точек заряженного шара, можно убедиться, что *поверхностная плотность заряда на шаре одинакова во всех местах*. Заряд распределяется по внешней поверхности шара равномерно.

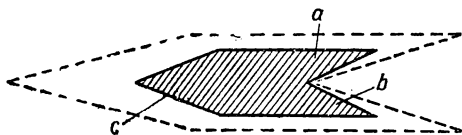


Рис. 58. Распределение поверхностной плотности заряда на проводнике сложной формы. Если для наглядности представить себе, что проводник окружен слоем, толщина которого пропорциональна поверхностной плотности заряда, то получится фигура, изображенная пунктиром.

Для проводников более сложной формы распределение плотности более сложно. Заряжая проводник, изображенный на рис. 58, и касаясь пробной пластинкой его боковой поверхности *a*, внутренних частей *b* и области, оканчивающейся острием *c*, мы найдем, что *поверхностная плотность заряда у проводника произвольной формы различна для разных участков поверхности*. Наименьшую величину она имеет на *внутренней поверхности*, наибольшую — на *выступающих остриях*. Напоминаем еще раз, что хотя поверхность такого проводника является эквипотенциальной поверхностью (§ 22), но *плотность* распределенного заряда на нем может быть весьма неравномерна.

§ 33. Конденсаторы. Возьмем две изолированные металлические пластины *a* и *b* (рис. 59, *a* и *b*), расположенные на некотором расстоянии друг от друга, и зарядим их равными разноименными зарядами. Это можно сделать разными способами. Например, можно присоединить пластины к полюсам электрической машины. На одну из пластин при этом

перейдет некоторый отрицательный заряд, т. е. добавится некоторое избыточное число электронов, а на другой появится равный ему положительный заряд, т. е. соответствующее число электронов будет удалено из пластины. Можно поступить иначе: одну из пластин соединить с Землей (например, соединить ее металлической проволокой с водопроводным краном), а к другой пластине прикоснуться заряженным телом. При этом вследствие индукции (§ 8) на заземленной пластине также появится заряд, равный по величине, но противоположного знака.

При любом способе зарядки пластинок все происходит так, как если бы некоторый положительный заряд был перенесен

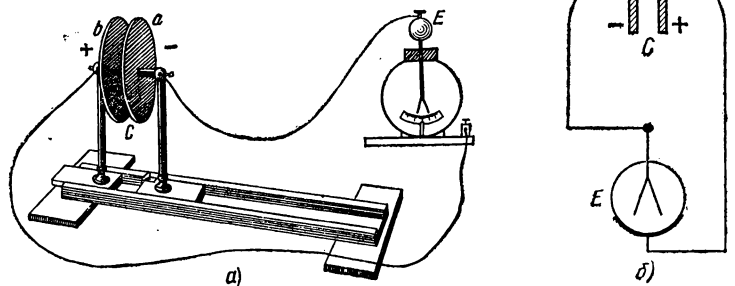


Рис. 59. При сдвигании пластин емкость конденсатора увеличивается: листки электрометра спадают, хотя заряд остается прежним. а) Изображение опыта. б) Схема опыта.

с одной пластины на другую. Система двух разноименно заряженных проводников называется конденсатором, а величина заряда, который надо перенести с одного проводника на другой, чтобы зарядить один из них отрицательно, а другой положительно, называется зарядом конденсатора. В частности, плоским конденсатором называется конденсатор, состоящий из двух параллельных пластин, расстояние между которыми мало по сравнению с размерами пластин.

Разность потенциалов между пластинами конденсатора, конечно, зависит от величины заряда конденсатора. Присоединив к пластинам a и b конденсатора C электрометр E и увеличивая заряд конденсатора повторной зарядкой, мы найдем, что показания электрометра тем больше, чем боль-

ший заряд мы сообщаем конденсатору. Измеряя величину заряда q (например, по методу § 10) и разность потенциалов U (например, с помощью электрометра), мы убедимся на опыте, что разность потенциалов U между пластинами прямо пропорциональна заряду q , находящемуся на каждой из них, и поэтому зависимость между этими величинами может быть представлена формулой

$$q = C \cdot U. \quad (2,7)$$

Здесь C — коэффициент, характеризующий наш конденсатор. Нетрудно видеть, какой физический смысл имеет этот коэффициент C . Если мы подберем такой заряд q_1 , чтобы между пластинами нашего конденсатора возникла разность потенциалов, равная единице ($U=1$), то из формулы (2,7) получим $C=q$. Таким образом, величина C определяет собой тот заряд, который необходим, чтобы зарядить наш конденсатор до разности потенциалов, равной единице. Поэтому коэффициент C носит название *э л е к т р о е м к о с т и* к о н д е н с а т о р а, или его е м к о с т и. Отсюда следует, что *емкость конденсатора есть отношение заряда конденсатора к той разности потенциалов, которую этот заряд сообщает конденсатору*, т. е.

$$C = \frac{q}{U}. \quad (2,7')$$

В зависимости от того, в каких единицах измеряется заряд и напряжение, мы получим ту или иную единицу для емкости. В практической системе единиц, как и в Международной системе СИ, мы измеряем напряжение в вольтах, а заряд в кулонах. Поэтому в обеих этих системах *единица емкости есть емкость такого конденсатора, между пластинами которого возникает напряжение в 1 вольт при заряде на его пластинах в 1 кулон*. В честь Фарадея эта единица получила название «*ф а р а д а*», она обозначается буквой *ф* или *F*. Для практических целей эта единица слишком велика, и на практике чаще применяются более мелкие единицы емкости — *м и к р о ф а р а д а* (*мкф* или μF), равная одной миллионной доле фарады, и *п и к о ф а р а д а* (*пф*, или pF), равная одной миллионной части микрофарады. Таким образом

$$1 \text{ ф} = 10^6 \text{ мкф} = 10^{12} \text{ пф}; \quad 1 \text{ мкф} = 10^{-6} \text{ ф};$$

$$1 \text{ пф} = 10^{-6} \text{ мкф} = 10^{-12} \text{ ф}.$$

В абсолютной электростатической системе единицей емкости является емкость такого конденсатора, в котором заряд, равный одной абсолютной электростатической единице заряда (1 СГС эл.-ст. единица заряда) создает разность потенциалов, равную одной абсолютной электростатической единице напряжения (1 СГС эл.-ст. единица напряжения). Так как 1 кулон = $3 \cdot 10^9$ СГС эл.-ст. единиц заряда и $1 \text{ вольт} = \frac{1}{300}$ СГС эл.-ст. единиц напряжения, то

$$1 \text{ ф} = 9 \cdot 10^{11} \text{ СГС эл.-ст. единиц емкости};$$

$$1 \text{ мкф} = 9 \cdot 10^5 \text{ СГС эл.-ст. единиц емкости};$$

$$1 \text{ нф} = 0,9 \text{ СГС эл.-ст. единиц емкости}.$$

У п р а ж н е н и е. 33.1. Конденсатор емкостью в 0,001 мкф заряжен до напряжения 1000 в. Какой заряд находится на каждой из его обкладок?

Простой опыт показывает, что емкость конденсатора зависит от формы, размеров и взаимного расположения составляющих его тел; в частности, емкость плоского конденсатора зависит от расстояния между его пластинами и от их площади. Зарядим снова при помощи индукции или с помощью электрической машины плоский конденсатор, изображенный на рис. 59, а затем, отъединив его от машины, станем изменять расстояние между пластинами, раздвигая или сдвигая их. Если наши пластины достаточно хорошо изолированы от всех окружающих тел, то имеющийся на них заряд, очевидно, не может измениться. Однако, соединенный с пластинами электрометр E показывает, что напряжение между пластинами не будет оставаться неизменным. Напротив, если мы раздвинем пластины, то электрометр покажет, что разность потенциалов между пластинами **в о з р о с л а**. Согласно формуле (2.7) это означает, что емкость конденсатора уменьшилась. Восстановив прежнее расстояние между пластинами, мы вновь получим прежнее показание электрометра и, следовательно, прежнее значение емкости. Уменьшив расстояние между пластинами, мы убедимся, что напряжение между пластинами **уменьшилось**, т. е. емкость конденсатора увеличилась. Вместо того, чтобы отдалять пластины друг от друга, мы можем сдвинуть одну из них в сторону, уменьшив этим величину площади пластинок, расположенных друг против друга.

Мы увидим, что при этом электрометр тоже показывает увеличение разности потенциалов, т. е. уменьшение емкости.

Описанные опыты ясно показывают, что *емкость характеризует не отдельную пластину, а систему обеих пластинок в их взаимном расположении друг по отношению к другу*. Поэтому, говоря об электроемкости, мы всегда имеем в виду емкость системы из двух тел, между которыми установилась разность потенциалов. Понятно, что это связано с тем обстоятельством (§ 21), что физический смысл имеет только разность потенциалов между двумя точками (в частности, между двумя проводниками; в нашем случае между двумя пластинами, составляющими плоский конденсатор).

Электрометр также представляет собой конденсатор; одним из проводников его является стержень с листочками, а вторым корпус. Емкость электрометра зависит от размеров и взаимного расположения его частей. Так как в электрометре эти части не изменно закреплены, то емкость данного электрометра будет вполне определенной (небольшим изменением емкости, связанным с перемещением листочков, можно пренебречь, если листочки достаточно удалены от кожуха). Именно поэтому мы и можем пользоваться электрометром для измерения имеющегося на нем заряда (§ 25). Расхождение листочков электрометра определяется полем между ними и корпусом прибора, т. е. разностью потенциалов U между этими телами. Но согласно формуле (2,7) заряд электрометра q равен $C \cdot U$, где C — электроемкость электрометра, являющаяся для данного прибора постоянной.

Таким образом, по расхождению листочков мы можем судить и о величине заряда электрометра. Мы можем градуировать наш прибор либо в единицах напряжения (вольтах), либо в единицах заряда (кулонах).

В случае электроскопа, у которого нет жесткого металлического кожуха, стержень и листочки являются одним проводником, а вторым служат стены и другие окружающие предметы, в частности тело экспериментатора, сообщаемое с поверхностью Земли. Заряд, помещенный на электроскопе, определяет разность потенциалов между стержнем электроскопа и этими окружающими телами. Разделив величину заряда на эту разность потенциалов, получим емкость конденсатора, составленного стержнем электроскопа и окружающими телами, или, как иногда говорят,

емкость электроскопа по отношению к окружающим телам. Но емкость эта уже не будет постоянной, как в случае электрометра, а будет зависеть от случайного расположения окружающих электроскоп тел. Меняя их положение по отношению к электроскопу, например заставляя экспериментатора приближаться или удаляться от электроскопа, мы будем менять емкость нашей системы, что проявится в изменении показания электроскопа (§ 26).

Конечно, то же самое относится к любому телу: емкость его по отношению к окружающим телам, в частности по отношению к Земле и соединенным с нею стенам помещения и предметам, зависит от расположения тела по отношению к этим предметам и, вообще говоря, меняется при перемещении тела. Но если окружающие предметы достаточно удалены, то небольшие изменения расстояния данного тела до этих предметов практически не меняют его электроемкости. В таком случае тело можно назвать *уединенным*. Электроемкость системы (конденсатора), состоящей из уединенного тела и других, достаточно удаленных предметов — часто для краткости речи называют просто *электроемкостью уединенного тела*. Она зависит только от формы и размеров данного тела.

В частности, емкость уединенного *шара* зависит только от его радиуса и, как показывают расчеты и измерения, численно равна его радиусу. Так как в системе СГС радиус выражается в сантиметрах, то в системе СГС и емкость измеряют в сантиметрах. Следовательно, *единицей электроемкости в системе СГС является электроемкость уединенного шара с радиусом в 1 см*. Эта емкость мало отличается от пикофарады. Как упоминалось выше, $1 \text{ пф} = 0,9 \text{ см}$.

Совпадение единиц для измерения длины и электроемкости в системе СГС не означает, конечно, совпадения физического смысла выражаемых в этих единицах величин. Мы уже и ранее встречались с подобными случаями. Так, например, в механике *работа* и *момент силы* выражаются в одинаковых единицах (дино-сантиметрах или эргах). Но физически это два совершенно разных понятия.

В том случае, когда мы имеем несколько заряженных тел, изолированных друг от друга, вопрос о емкости становится гораздо более сложным и для определения ее недостаточно простой формулы (2,7). Мы не будем рассматривать этого вопроса. Практически почти всегда приходится иметь дело с двумя проводниками, расположенными очень близко друг по отношению к другу, и поэтому на их взаимную емкость не влияет расположение других более удаленных проводников.

Если бы Земля представляла собой уединенный проводник, то, так как ее можно считать шаром с радиусом в 6400 км, ее электроем-

кость равнялась бы приблизительно 700 мкф. Однако, как мы видели в § 29, электрическое поле Земли показывает, что вблизи поверхности Земли, на расстоянии 100—200 км от нее (в ионосфере), расположены электрические заряды, которые совместно с Землей образуют конденсатор, емкость которого раз в 30—50 больше указанной величины и достигает 20 000—30 000 мкф, т. е. нескольких сотых фарады.

У п р а ж н е н и я. 33.2. Как измерить разность потенциалов двух проводников, например двух изолированных заряженных металлических шаров? Укажите необходимый для этого прибор и начертите, как этот прибор следует применять.

33.3. Почему не убивает током птицу, садящуюся на один из проводов высокого напряжения? У к а з а н и е. Птицу и поверхность Земли рассматривать как обкладки конденсатора очень малой емкости (малая поверхность птицы, большое расстояние до Земли).

§ 34. Различные типы конденсаторов. Мы видели в предыдущем параграфе, что, заряжая любой изолированный проводник, мы одновременно создаем противоположный заряд на окружающих проводниках, соединенных с Землей и образующих вместе с этим телом конденсатор. Однако емкость такого конденсатора мала. Чтобы получить большую емкость, необходимо взять проводники в виде металлических пластин, возможно близко расположенных друг к другу (так называемые **о б к л а д к и к о н д е н с а т о р а**). Мы видели, что емкость плоского конденсатора прямо пропорциональна площади обкладок и обратно пропорциональна расстоянию между ними. Поэтому при **б о л ь ш о й п о в е р х н о с т и** обкладок и при **т о н к о м с л о е** изолятора между ними емкость конденсатора очень велика, и на нем можно накопить («сгустить») значительные заряды даже при небольшом напряжении. Отсюда происходит и название «конденсатор» (от латинского слова «конденсо» — сгущаю).

На рис. 60, *а* изображен самый старинный тип конденсатора — **л е й д е н с к а я б а н к а**. Это название происходит от города Лейдена (Голландия), где впервые был построен в середине XVIII века конденсатор такого типа. Он представляет собой стеклянную банку, оклеенную внутри и снаружи станиолем¹⁾. Соединение с внутренней обкладкой осуществляется металлическим стержнем, укрепленным внутри банки (рис. 60, *б*). Для того чтобы зарядить лейденскую банку, ее держат в руке за внешнюю обкладку (этим осуществляется соединение с Землей) и прикасаются стержнем к какому-либо заряженному телу,

¹⁾ Станиоль — тонко раскатанный лист олова (олово по-латински «станум», отсюда химический символ олова Sn).

лучше всего к одному из полюсов электрической машины. Емкость лейденской банки средних размеров составляет около $1/1000$ мкф.

У п р а ж н е н и я. 34.1. Для заряжения лейденской банки мы обычно соединяем ее внешнюю обкладку с Землей (держим банку в руках) и касаемся ее внутренней обкладкой (стержнем) одного из полюсов электрической машины. Можно ли так же сильно зарядить банку, если, наоборот, держать в руке ее стержень, а коснуться полюса машины

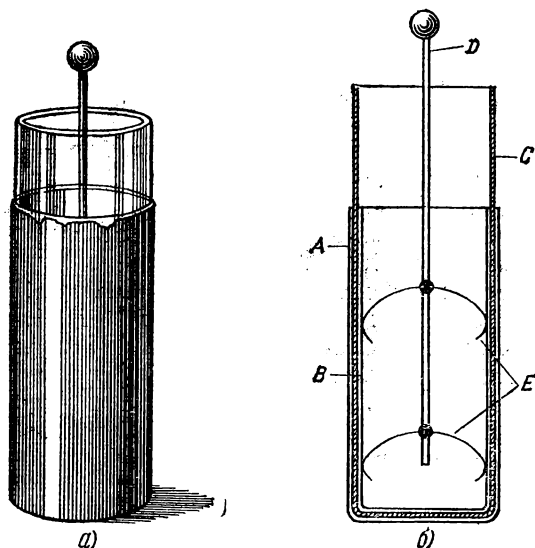


Рис. 60. Лейденская банка: а) внешний вид; б) схема устройства; А и В — станиолевые обкладки; С — стеклянный стакан; D — металлический стержень; E — упругие металлические полоски для контакта.

внешней обкладкой? Что произойдет, если заряженную таким образом банку поставить на стол?

34.2. Можно ли зарядить лейденскую банку, соединяя одну из ее обкладок с полюсом электрической машины, но оставив вторую обкладку изолированной от Земли?

34.3. Соединив внешнюю обкладку заряженной лейденской банки с Землей и коснувшись пальцем ее внутренней обкладки, мы чувствуем сильное электрическое сотрясение. Почему этого не происходит, если мы коснемся внутренней обкладки, стоя на изолирующей скамейке? У к а з а н и е. Человеческое тело на изолирующей скамейке и поверхность Земли рассматривать как обкладки конденсатора, присоединяемого параллельно банке; учесть, что емкость этого конденсатора значительно меньше емкости банки.

Для увеличения емкости конденсаторы часто соединяют в б а т а р е и. На рис. 61 изображена батарея из четырех лейденских банок. Все внешние и все внутренние обкладки соединены между собой, и поэтому батарею можно рассматривать как один большой конденсатор, у которого поверхность обкладок равна сумме поверхностей обкладок отдельных банок. Емкость батареи при таком соединении (оно называется п а р а л л е л ь н ы м соединением) равна сумме емкостей отдельных конденсаторов.

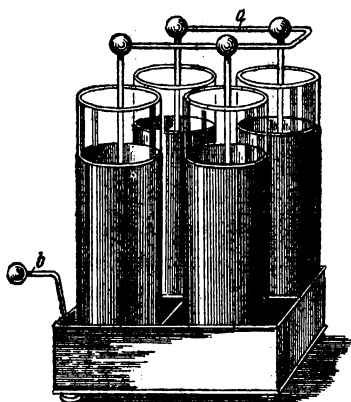


Рис. 61. Батарея из четырех лейденских банок: *a* — стержень для зарядки внутренних обкладок; *b* — стержень для заземления внешних обкладок. Все внутренние обкладки соединены между собой; все внешние обкладки также соединены между собой.

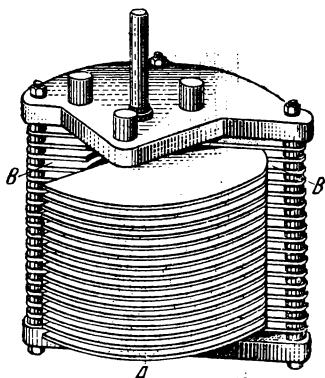


Рис. 62. Конденсатор переменной емкости. Он состоит из двух изолированных систем металлических пластинок *A* и *B*, которые входят друг в друга при вращении рукоятки. Такие конденсаторы употребляются в радиоприемниках для настройки.

На рис. 62 показан конденсатор переменной емкости, широко употребляющийся в радиотехнике. Он состоит из двух изолированных систем металлических пластинок, которые входят друг в друга при вращении рукоятки. Вдвигание и выдвигание одной системы пластинок в другую изменяют емкость конденсатора (§ 33).

Большинство технических конденсаторов приближается по типу к плоскому конденсатору, т. е. в основе своей представляет две, разделенные небольшим зазором параллельные

плоские поверхности (обкладки), на которых сосредоточены равные заряды противоположных знаков. Электроемкость плоского конденсатора сравнительно просто выражается через размеры его частей. Выполним опыты, изображенные на рис. 59, причем будем применять приборы, градуированные так, что они позволят измерять и заряд, сообщаемый конденсатору, и возникающую разность потенциалов в абсолютных электростатических единицах. Меняя размер (площадь S) пластин и расстояние между ними d , мы убедимся, что *электроемкость плоского конденсатора равняется:*

$$C = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{S}{d}, \quad (2,8)$$

где $\pi=3,14$ — известная из геометрии величина.

К формуле (2,8) можно было бы прийти и путем теоретических расчетов. Как при производстве измерений, так и при расчетах предполагается, что конденсатор плоский, т. е. что расстояние d очень мало по сравнению с линейными размерами пластин и в зазоре между пластинами находится воздух (точнее следовало бы предполагать, что и воздух отсутствует).

§ 35. Параллельное и последовательное соединение конденсаторов. Помимо показанного на рис. 61 и 62, а также на рис. 63, *а* **п а р а л л е л ь н о** го соединения конденсаторов, при котором соединены между собой все положительные и все отрицательные пластины, иногда соединяют конденсаторы **п о с л е д о в а т е л ь н о**, т. е. так, чтобы, скажем, отрицательная пластина первого конденсатора была соединена с положительной пластиной второго, отрицательная пластина второго с положительной пластиной третьего и т. д. (рис. 63, *б*).

В случае **п а р а л л е л ь н о** го соединения все конденсаторы заряжаются до одного и того же напряжения U , но заряды на них могут быть различными. Если электроемкости их равны $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$, то соответствующие заряды будут $q_1=C_1 \cdot U$; $q_2=C_2 \cdot U$; $q_3=C_3 \cdot U$, ... Общий заряд на всех конденсаторах $Q=q_1+q_2+\dots+q_n=(C_1+C_2+\dots+C_n) \cdot U$, и, следовательно, электроемкость всей системы конденсаторов

$$C = \frac{Q}{U} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n. \quad (2,9)$$

Итак, *емкость группы параллельно соединенных конденсаторов равна сумме емкостей отдельных конденсаторов.*

В случае *последовательно соединенных конденсаторов* (рис. 63, б) одинаков заряд q на всех конденсаторах. Действительно, если мы нанесем, например, заряд $+q$ на левую пластину первого конденсатора, то вследствие индукции на правой его пластине возникнет заряд $-q$, а на левой пластине второго конденсатора — заряд $+q$ ¹⁾. Наличие этого заряда на левой пластине второго конденсатора

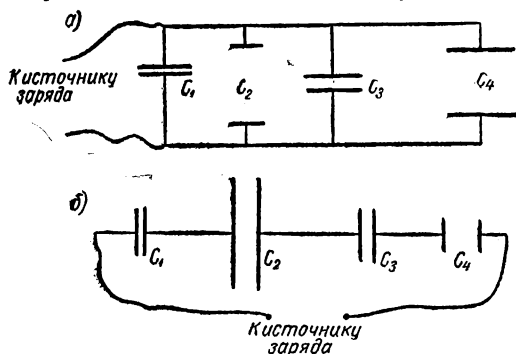


Рис. 63. Схемы соединения конденсаторов:
 а) параллельное; б) последовательное.

опять-таки вследствие индукции создает на правой его пластине заряд $-q$, а на левой пластине третьего конденсатора — заряд $+q$ и т. д. Таким образом, заряд каждого из последовательно соединенных конденсаторов равен q . Напряжение же на каждом из этих конденсаторов определяется емкостью соответствующего конденсатора:

$$U_1 = \frac{q}{C_1};$$

$$U_2 = \frac{q}{C_2};$$

$$U_3 = \frac{q}{C_3}$$

¹⁾ Конечно, наше рассуждение остается правильным и для конденсаторов иного вида, чем плоские. Во всяком конденсаторе все поле сосредоточено между его обкладками (например, между двумя цилиндрическими обкладками цилиндрического конденсатора). Поэтому заряд, индуцированный на второй обкладке, всегда равен по величине и противоположен по знаку заряду, помещенному на первую обкладку.

и т. д., где C — емкость данного конденсатора. Суммарное напряжение между крайними (свободными) пластинами всей группы конденсаторов равно

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n = q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \right).$$

Следовательно, электроемкость всей системы конденсаторов

$$C = \frac{q}{U}$$

определяется выражением

$$\frac{1}{C} = \frac{U}{q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (2,10)$$

Из этой формулы видно, что *электроемкость группы последовательно соединенных конденсаторов всегда меньше, чем емкость каждого из этих конденсаторов в отдельности.*

У п р а ж н е н и я. 35.1. Четыре одинаковых конденсатора соединены один раз параллельно, другой — последовательно. В каком случае емкость этой группы конденсаторов больше и во сколько раз?

35.2. Два конденсатора емкостью в 2 мкф и в 1 мкф соединены последовательно и присоединены к полюсам батареи с напряжением 120 в. Каково напряжение между обкладками первого и между обкладками второго конденсатора?

35.3. Какой заряд нужно сообщить батарее из двух лейденских банок с емкостями 1/2000 мкф и 1/1000 мкф, соединенных параллельно, чтобы зарядить ее до напряжения 10 000 в?

35.4. Конденсатор, заряженный до напряжения 100 в, соединяется с конденсатором такой же емкости, но заряженным до 200 в, параллельно (т. е. положительная обкладка — с положительной, отрицательная — с отрицательной). Какое установится напряжение между обкладками?

35.5. Два заряженных металлических шара одинакового диаметра приводятся в соприкосновение. Один из шаров — полый. Поровну ли распределятся заряды на обоих шарах?

§ 36. Диэлектрическая постоянная. Емкость конденсатора зависит, как показывает опыт, не только от размера, формы и взаимного расположения составляющих его проводников, но также и от вещества диэлектрика, заполняющего пространство между этими проводниками. Влияние диэлектрика можно установить при помощи следующего опыта. Зарядим плоский конденсатор и заметим показания электрометра, измеряющего напряжение на конденсаторе. Вдвинем затем в конденсатор незаряженную эбонитовую пластинку (рис. 64). Мы увидим, что разность потенциалов между обкладками заметно умень-

шится. Если вновь удалить эбонит, то показания электрометра делаются прежними. Это показывает, что при замене воздуха эбонитом емкость конденсатора увеличивается. Взяв вместо эбонита какой-либо иной диэлектрик, мы получим сходный результат, но только численно изменение емкости конденсатора будет иным. Если C_0 — емкость конденсатора, между обкладками которого находится пустота (практически атмосферный воздух),

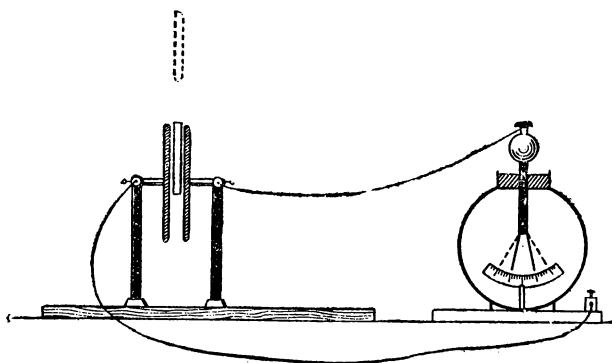


Рис. 64. Емкость конденсатора увеличивается при вдвижении эбонитовой пластины между его обкладками: листочки электрометра спадают, хотя заряд остается прежним.

а C — емкость того же конденсатора, когда все пространство между обкладками заполнено, без воздушных зазоров, каким-либо диэлектриком, то емкость C окажется в ϵ раз больше емкости C_0 , где ϵ зависит лишь от природы диэлектрика. Таким образом, можно написать:

$$C = \epsilon \cdot C_0. \quad (2,11)$$

Величина ϵ называется диэлектрической постоянной среды, в которой находится конденсатор. В таблице 1 приведены диэлектрические постоянные некоторых веществ.

Сказанное справедливо не только для плоского конденсатора, но и для конденсатора любой формы: заменяя воздух каким-либо диэлектриком, мы увеличиваем емкость конденсатора в ϵ раз.

Т а б л и ц а 1

Диэлектрические постоянные некоторых веществ

Вещество	ϵ
Вода (чистая)	81
Воздух	1,0006
Кварц	4,5
Керамика радиотехническая	до 80
Парафин	2,3
Слюда	6—8
Стекло	4—7
Эбонит	3
Янтарь	2,8

Строго говоря, емкость конденсатора увеличивается в ϵ раз только в том случае, если все силовые линии, идущие от одной обкладки к другой, проходят в данном диэлектрике. Это будет, например, у конденсатора, который целиком погружен в какой-либо жидкий диэлектрик, налитый в большой сосуд. Однако, если расстояние между обкладками мало по сравнению с их размерами, то можно считать, что достаточно заполнить только пространство между обкладками, так как именно здесь практически сосредоточено электрическое поле конденсатора. Так, для плоского конденсатора достаточно заполнить диэлектриком лишь пространство между пластинами.

Помещая между обкладками вещество с большой диэлектрической постоянной, можно сильно увеличить емкость конденсатора. Этим пользуются на практике, и обычно в качестве диэлектрика для конденсатора выбирают не воздух, а стекло, парафин, слюду и другие вещества. На рис. 65 показан технический конденсатор, у которого диэлектриком служит пропитанная парафином бумажная лента. Его обкладками являются станиолевые ¹⁾ полосы, прижатые с обеих сторон к парафинированной бумаге. Емкость таких конденсаторов нередко достигает нескольких микрофард. Так, например, продажный радиолобительский конденсатор размером в спичечную коробку имеет емкость в 2 мкф.

¹⁾ См. примечание на стр. 91. В современной технике обычно вместо тонких листов олова применяют листы алюминия или других металлов. Однако в силу привычки и эти листки называют нередко станиодем.

Понятно, что для изготовления конденсатора пригодны только диэлектрики с очень хорошими изолирующими свойствами. В противном случае заряды будут утекать через диэлектрик. Поэтому вода, несмотря на ее большую диэлектрическую постоянную, совсем не годится для приготовления конденсаторов, ибо только исключительно тщательно очищенная вода является достаточно хорошим изолятором.

Если пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено средой с диэлектрической постоянной ϵ , то формула (2,8) для плоского конденсатора принимает вид

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{4\pi d}. \quad (2,8')$$

То обстоятельство, что емкость конденсатора зависит от окружающей среды, указывает, что электрическое поле внутри диэлектриков *и з м е н я е т с я*. Мы видели, что при заполнении конденсатора диэлектриком с диэлектрической постоянной ϵ емкость увеличивается в ϵ раз. Это значит, что при тех же самых зарядах на обкладках разность потенциалов между ними уменьшается в ϵ раз. Но разность потенциалов и напряженность поля связаны между собой отношением (2,6). Поэтому уменьшение разности потенциалов обозначает, что *напряженность поля в конденсаторе при его заполнении диэлектриком делается меньше в ϵ раз*. В этом и состоит причина увеличения емкости конденсатора.

Если обозначить через E_0 напряженность поля, созданного *любыми* заряженными телами в некоторой точке в пустоте, а через E — напряженность поля в этой же точке в том

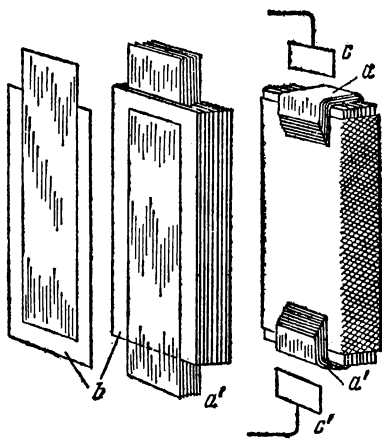


Рис. 65. Устройство технического плоского конденсатора.

Справа — конденсатор в собранном виде, слева — в частично разобранном. Конденсатор состоит из нескольких станиольных лент a и a' и проложенных между ними лент парафинированной тонкой бумаги b . Все ленты вместе складываются «гармошкой» и вкладываются в металлическую коробку. К концам лент a и a' припаиваются контакты c и c' для включения конденсатора в ту или иную схему.

случае, когда при тех же зарядах все пространство заполнено диэлектриком с диэлектрической постоянной ϵ , то

$$E = \frac{E_0}{\epsilon}. \quad (2,12)$$

Если два точечных заряда находятся в диэлектрике, то напряженность поля каждого из зарядов в точке, где находится другой заряд, уменьшается также в ϵ раз и, следовательно, сила, действующая на каждый из зарядов, в ϵ раз меньше, чем в пустоте. Отсюда мы заключаем, что закон Кулона (1,1) для точечных зарядов, помещенных в диэлектрике, имеет следующий вид:

$$F = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (2,13)$$

§ 37. Почему электрическое поле ослабляется внутри диэлектрика? Поляризация диэлектрика. Чтобы понять, почему поле внутри диэлектрика меньше, чем в пустоте, нужно учесть, что все тела построены из атомов и молекул. Атомы и молекулы, в свою очередь, состоят из положительных и отрицательных зарядов (атомных ядер и электронов), так что всякий диэлектрик представляет собой собрание большого количества заряженных частичек.

В молекулах эти положительные и отрицательные заряды нередко расположены так, что одна половина молекулы имеет по преимуществу положительный заряд, а другая — отрицательный. Такая молекула,

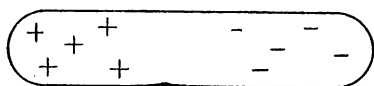


Рис. 66. Модель дипольной молекулы диэлектрика (очень грубая).

грубо говоря, имеет вид палочки или стрелки с противоположно заряженными концами (рис. 66). Такие молекулы часто называют **диполями** (двухполюсниками, от греческого «ди» — два). Количества положительного и отрицательного зарядов в каждой молекуле одинаковы, и поэ-

тому любая молекула в целом не заряжена. Однако при помещении дипольных молекул в электрическое поле на каждую молекулу будут действовать силы, стремящиеся установить ее по направлению линий поля.

В естественном состоянии, т. е. в отсутствие внешнего поля, молекулы вещества ориентированы совершенно хаотически. В любой части диэлектрика будет находиться одинаковое количество положительных и отрицательных зарядов в самом хаотическом расположении (рис. 67, а) и поэтому результирующее действие этих зарядов будет равно нулю. Когда мы помещаем диэлектрик с дипольными молекулами в электрическое поле, то под действием сил поля, стремящихся повернуть диполи, молекулы поворачиваются так, чтобы их электрические оси установились по возможности по линиям поля. Говоря «по возможности», мы имеем в виду следующее. Действие электрического поля стремится установить упорядоченное расположение молекул, выстроить их цепочками, как показано на рис. 67, б и в. С другой стороны, тепловое движение

молекул (т. I, «Теплота») стремится все время расстроить эту упорядоченность и восстановить хаотическое, беспорядочное расположение молекул, показанное на рис. 67, а. Борьба между этими противоположно направленными факторами, из которых первый зависит от напряженности поля и индивидуальных свойств данного вещества, а второй определяется температурой, приводит к тому, что в поле данной напряженности не все, а лишь большая или меньшая часть молекул располагается своими осями близко к направлению поля.

Следствием этого упорядочения в расположении молекул является то, что на поверхности диэлектрика образуются равные по величине, но противоположные по знаку электрические заряды (рис. 67, в). Эти заряды тем больше, чем более упорядочено расположение молекул. На рис. 67, в заряд на границах диэлектрика больше, чем на рис. 67, б. Диэлектрик приобретает «электрические полюсы», или, как принято говорить, поляризуется. Причина ослабления поля в диэлектрике и заключается в поляризации последнего. Действительно, представим себе плоский конденсатор, заполненный диэлектриком (рис. 68), причем на левой обкладке имеется положительный заряд, а на правой — отрицательный. Так как одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются, то, очевидно, у левой (положительной) обкладки возникает на поверхности диэлектрика отрицательный поляризационный заряд, а у правой обкладки — положительный. Таким образом, поле E_p , создаваемое поляризационными зарядами, направлено против о п о л о ж н о го полю E_0 , создаваемого зарядами на обкладках, и потому ослабляет его. Результирующее поле в диэлектрике оказывается меньше, чем в отсутствие диэлектрика.

Мы рассматривали до сих пор только действие поля на диэлектрик, проявляющееся в по в о р о т е молекул и у п о р я д о ч е н и и их о р и е н т а ц и и. Кроме этого действия поля, в некоторых веществах возможно и смещение зарядов в пределах каждой молекулы или, как говорят, п о л я р и з а ц и я каждой отдельной молекулы. Это действие поля еще больше увеличивает поляризационные заряды, возникающие на поверхности диэлектрика и, следовательно, приводит к еще большему ослаблению результирующего поля.

Поляризация диэлектриков напоминает собой электризацию через влияние (§ 8). Однако между этими явлениями существует и различие. Мы видели, что электризация проводников посредством влияния

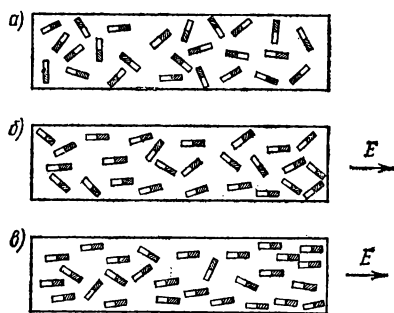


Рис. 67. Схема поляризации диэлектрика. а) Диэлектрик в отсутствие электрического поля. б) Диэлектрик, помещенный в слабое электрическое поле. в) Тот же диэлектрик, находящийся в сильном электрическом поле. Условно положительный конец диполя обозначен штриховкой, а отрицательный оставлен белым. Направление поля E показано стрелкой.

объясняется перемещением свободных электронов, которые в проводниках могут передвигаться по всему объему проводника. Разъединяя в электрическом поле проводник на две части, мы можем отделить наведенные (индуцированные) заряды, и обе половины проводника останутся

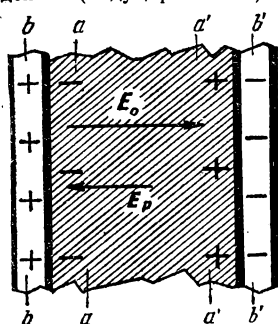


Рис. 68. Поле E_p , созданное поляризационными зарядами a и a' , направлено противоположно полю E_0 , которое создано зарядами b и b' на обкладках конденсатора.

заряженными даже после устранения поля, вызвавшего эти заряды. В противоположность этому, внутри диэлектрика электрические заряды не могут свободно перемещаться, а могут только сдвигаться в пределах своей молекулы. Поэтому, если разделить поляризованный диэлектрик в электрическом поле на две части, то каждая часть будет состоять по-прежнему из незаряженных в целом молекул, и полный ее заряд тоже будет равен нулю. На поверхности каждой из частей заряды, однако, будут, и притом на одном конце — положительные, а на другом — отрицательные (рис. 69). Это и понятно, так как к каждой части можно применить те же рассуждения, что и для целого куска диэлектрика. При устранении внешнего поля заряды внутри молекул под действием теплового движения возвращаются в исходное неупорядоченное расположение, и поляризационные заряды исчезают. Мы видим, что поляризационные заряды, в отличие от индукционных, не могут быть отделены друг от друга. Поэтому поляризационные заряды часто называются еще связанными зарядами.

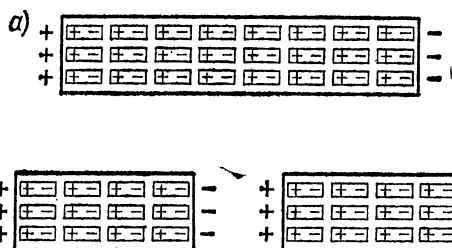


Рис. 69. При разделении поляризованного диэлектрика на две части на границах каждой части возникают поляризационные заряды противоположных знаков. а) Поляризация диэлектрика до разделения. б) Поляризация диэлектрика после разделения.

§ 38. Энергия заряженных тел (электрического поля). Для того чтобы зарядить конденсатор, т. е. создать некоторую разность потенциалов между двумя телами — обкладками конденсатора, — мы должны затратить некоторую ра-

боту. Это связано с тем, что процесс заряжения тела, как мы говорили в § 5, означает всегда разделение зарядов, т. е. создание на одном теле избытка зарядов одного знака, а на другом теле — другого знака. При этом приходится преодолевать силы притяжения друг к другу положительных и отрицательных зарядов, т. е. *затрачивать работу*. Когда конденсатор разряжается, т. е. ранее разделенные заряды воссоединяются, то такую же по величине работу совершают электрические силы: мы получаем выигрыш работы, равный прежней затрате ее. Таким образом, заряженный конденсатор обладает *запасом потенциальной энергии*, равным той работе, которая была затрачена на его зарядку.

Мы можем выразить эти факты и несколько иначе. Заряжая конденсатор, мы создаем в нем электрическое поле; при разрядке конденсатора это поле исчезает. Затраченная нами работа пошла на создание поля, а работа, совершаемая при разрядке конденсатора, получается за счет исчезновения этого поля. Мы можем сказать, следовательно, что *всякое поле обладает некоторым запасом потенциальной энергии, освобождаемой при исчезновении этого поля*.

Для наиболее простого случая плоского конденсатора (рис. 70) нетрудно эту работу вычислить. До тех пор, пока расстояние d между пластинами мало по сравнению с размерами пластин, т. е. до тех пор, пока конденсатор можно считать плоским, напряженность поля в нем E не зависит от расстояния d . Действительно, мы знаем, что в плоском конденсаторе поле однородно и напряженность его $E = \frac{U}{d}$. Но напряжение на конденсаторе

$U = \frac{q}{C}$, а емкость $C = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{S}{d}$ (где S — площадь пластин). Таким образом,

$$E = \frac{U}{d} = \frac{q}{C \cdot d} = \frac{4\pi \cdot q \cdot d}{S \cdot d} = 4\pi \cdot \frac{q}{S}, \quad (2,14)$$

т. е. при постоянных q и S напряженность поля E не зависит от d , так как при изменении d меняется также U .

Сила, с которой притягиваются друг к другу две противоположно заряженные пластины конденсатора, зависит от величины заряда q на каждой из пластин и от напряженности поля E . Так как при изменении d не

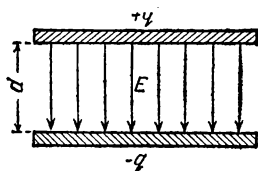


Рис. 70. При раздвигании на расстояние d пластин плоского конденсатора с зарядами $+q$ и $-q$, напряженность поля в котором равна E , мы затрачиваем работу $A = \frac{E}{2} qd$.

меняются ни q ни E , то неизменной остается и сила притяжения F . Поэтому работа, которую нужно затратить, чтобы раздвинуть пластины от расстояния нуль между ними до расстояния d , равна $A = F \cdot d$. Но раздвижение пластин означает зарядку конденсатора, у которого расстояние между пластинами равно d . Действительно, когда расстояние между пластинами равно нулю, т. е. пластины сложены вместе, то их заряды $+q$ и $-q$ образуют компенсированный двойной слой, и система не заряжена. Раньше (§ 7) мы уже подробно рассматривали появление электрических зарядов на двух телах как раздвижение двойного слоя электрических зарядов.

Запас энергии, которым обладает заряженный конденсатор, равен работе $A = F \cdot d$, которая была затрачена на его зарядку. Чтобы вычислить эту работу, нам остается только определить силу F . Для этого воспользуемся напряженностью поля E в конденсаторе. Можно рассматривать E как результирующую двух равных напряженностей E_1 и E_2 , из которых одна обусловлена положительным зарядом $+q$ на одной пластине (на верхней пластине рис. 70), а другая — отрицательным зарядом $-q$ на другой (нижней) пластине. Ясно, что обе эти напряженности направлены в одну и ту же сторону, так что $E = E_1 + E_2$. Так как $E_1 = E_2$ (потому что обе пластины конденсатора и их заряды симметричны), то $E_1 = E_2 = \frac{E}{2}$. Сила взаимодействия между пластинами F — это сила, с которой поле напряженности E_1 , вызванное зарядом $+q$ на верхней пластине, действует на заряд $-q$ нижней пластины и тянет его вверх. Но, с другой стороны, F равно силе, с которой поле напряженности E_2 , вызванное зарядом $-q$ на нижней пластине, действует на заряд $+q$ верхней пластины и тянет ее книзу.

Таким образом,

$$F = E_1 \cdot q = E_2 \cdot q = \frac{E \cdot q}{2}, \quad (2,15)$$

т. е.

$$A = F \cdot d = \frac{E}{2} \cdot q \cdot d, \quad (2,16)$$

а так как

$$E = \frac{U}{d},$$

то

$$A = \frac{1}{2} q \cdot U. \quad (2,17)$$

Вспомнив, что заряд конденсатора $q = C \cdot U$, мы можем переписать эту формулу также в виде

$$A = \frac{1}{2} C \cdot U^2. \quad (2,18)$$

Само собой разумеется, что если в формулах (2,17) и (2,18) мы будем выражать заряд и напряжение или емкость и напряжение в единицах абсолютной электростатической системы, то получим энергию, выра-

женную в единицах той же системы,— эргах. Если же мы будем выражать заряд в кулонах, напряжение в вольтах, а емкость в фарадах, то получим энергию, выраженную в единицах в 10^7 раз больших, т. е. в джоулях ($1 \text{ джоуль} = 10^7 \text{ эрг}$). Формула (2,18) дает возможность понять, почему при разряде лейденской банки или, еще лучше, батареи из нескольких банок, обладающей сравнительно большой электроемкостью, искра получается более мощной, производит более сильный звук и большее физиологическое действие, чем при разряде конденсатора малой электроемкости при том же напряжении. Батарея имеет больший запас энергии, чем одна банка. Молния представляет собой разряд конденсатора, «обкладками» которого являются либо два облака, либо облако и поверхность Земли. Емкость такого конденсатора сравнительно невелика, но запас энергии в молнии довольно значительный, потому что напряжение на этом конденсаторе достигает 10^9 , т. е. миллиарда вольт.

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

§ 39. Электрический ток и электродвижущая сила. Для равновесия зарядов на проводнике необходимо, как мы знаем, чтобы разность потенциалов между любыми точками проводника равнялась нулю. Если это условие нарушено, то равновесие не может иметь места, и в проводнике происходит перемещение зарядов, которое называется электрическим током. Таким образом, для получения тока достаточно создать разность потенциалов (напряжение) между какими-либо точками проводника.

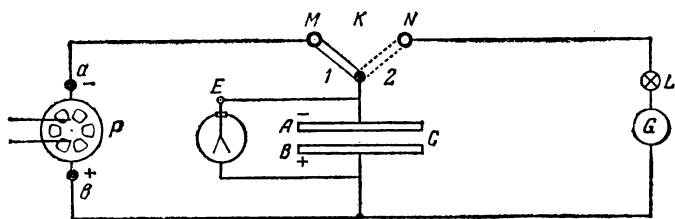


Рис. 71. Опыт для выяснения понятий о токе и э. д. с. C — конденсатор емкостью в несколько мкф; L — лампочка карманного фонаря; G — чувствительный прибор для обнаружения электрического тока; P — электрическая машина.

Осуществим эти условия в следующем простом опыте, понятном из рис. 71. Левая половина рисунка изображает электрическую машину P , создающую разность потенциалов между обкладками A и B конденсатора C ; электрометр E позволяет обнаружить и даже измерять эту разность потенциалов. На правой половине показано, как осуществляется соединение двух обкладок с помощью проводника,

состоящего из соединительных проволочек и лампочки. Для того чтобы сделать особенно наглядным процесс создания напряжения между обкладками *A* и *B* и процесс соединения обкладок проводником, мы поместили ключ *K*. Повернув его влево, мы заряжаем конденсатор (создаем напряжение между его обкладками); повернув вправо — осуществляем соединение обкладок. Заставим вращаться машину (рукой или моторчиком) и поставим ключ в положение *1*. Конденсатор начнет заряжаться, и электрометр покажет возникающую между обкладками разность потенциалов. Перебросим ключ в положение *2*. Лампочка на мгновение вспыхнет, а листочки электрометра опадут, указывая, что напряжение между *A* и *B* упало до нуля, т. е. поле в конденсаторе исчезло. Вновь поворачивая ключ влево, мы повторим зарядку (создание напряжения), а переключая ключ опять вправо — вновь осуществим вспышку лампочки и т. д.

Что происходит в этом опыте? Заряжая с помощью электрической машины конденсатор, мы производили *р а з д е л е н и е* электрических зарядов. На одном полюсе машины, например *a*, и, следовательно, на соединенной с ним обкладке *A* появлялся избыток электронов; на другом полюсе *b* (и обкладке *B*) — соответствующий недостаток электронов. Между полюсами (*a*, следовательно, и между обкладками конденсатора) возникло напряжение (разность потенциалов), для чего, как мы знаем, требуется затратить работу (§ 38). В описываемом опыте эту работу производили мускулы руки или моторчик, вращающие машину. Когда проводник присоединяется к обкладкам, на концах его имеется разность потенциалов, и в проводе возникает движение зарядов: электроны от места, где они имеются в избытке (*A*), потекут к месту, где их недостает (*B*). Заряд на обкладках быстро уменьшается, напряжение между ними падает, поле в конденсаторе исчезает, а в проволоке происходит движение зарядов (электрический ток), который и *п р о я в л я е т с я* в накале лампочки. Разряд конденсатора и протекание тока занимают малую долю секунды (вспышки). Чтобы сделать явление более длительным, надо многократно повторять его, быстро переключая ключ из положения *1* в положение *2* и обратно, т. е. то заряжая, то разряжая конденсатор.

Конденсатор мы ввели только для того, чтобы с полной ясностью выделить две стороны процесса, обуславливающего электрический ток: 1) создание и поддержание напряжения (разности потенциалов) между двумя какими-либо

точками и 2) создание проводящей цепи, по которой происходит перенос зарядов между этими точками.

Вторая половина процесса осуществляется просто с помощью ключа, замыкающего разорванную цепь. Первая в нашем случае обеспечивалась работой электрической машины, разделяющей заряды. Конденсатор же служил для наглядного разделения всего сложного процесса на две стадии, последовательно протекающие одна за другой. Для существа дела эти две последовательные стадии совершенно не необходимы: обе стороны процесса могут идти одновременно и непрерывно, и таким образом роль конденсатора чисто иллюстративная. Можно обойтись без него, непосредственно соединив точки M и N , т. е. осуществив замкнутую цепь от одного полюса машины к другому. В такой цепи во все время работы машины идет непрерывный электрический ток, ибо, несмотря на непрерывный переход электронов от a через провода и нить лампочки к b , разность потенциалов между b и a все время восстанавливается благодаря работе машины. Правда, обычная электростатическая машина не могла бы поддерживать лампочку в раскаленном состоянии. Машина разделяет за единицу времени лишь небольшие количества электричества, так что мощность ее, достаточная для питания отдельных, довольно частых вспышек, неспособна поддерживать непрерывный накал лампочки. Для регистрации непрерывного слабого тока пришлось бы использовать какой-нибудь более чувствительный указатель (прибор G), что, конечно, нетрудно сделать.

Итак, устранив в нашем простом опыте все второстепенные детали, мы установили, что в нем существенно необходимы и являются электрическая машина и проводник, соединяющий ее полюсы.

Из разобранного примера мы видим, что для поддержания в цепи проводников непрерывного тока необходимо, чтобы в этой цепи работало какое-то устройство, в котором все время происходят процессы, осуществляющие разделение электрических зарядов и тем самым поддерживающие напряжение в цепи. Это устройство называют источником, или генератором, электрического тока, а действующие в нем причины, обуславливающие разделение зарядов, получили название электродвижущих сил (сокращенно э. д. с.). Наименование «электродвижущая сила» сложилось исторически, но оно

не очень удачно и может дать повод к недоразумению. Если его понимать в буквальном смысле, то можно подумать, что речь идет о «силах», движущих заряды по проводнику. Но в разобранным нами выше случае, равно как и во многих других, например в цепях с гальваническими элементами, аккумуляторами и т. п., движение зарядов обусловлено электрическим полем в проводнике, т. е. напряжением (разностью потенциалов) между его точками. Термин же «электродвижущая сила» обозначает не это напряжение, а ту причину, которая р а з д е л я е т заряды и тем самым создает электрическое поле (напряжение между точками цепи), которое, собственно говоря, и движет заряды.

Чтобы резче подчеркнуть это различие между «электродвижущей силой» и создаваемой ею разностью потенциалов, некоторые авторы применяют выражение «сторонняя электродвижущая сила»; иногда употребляют термин «электроразделительная сила». Этот термин, пожалуй, более удачен, но он не получил широкого распространения. Поэтому мы в дальнейшем будем пользоваться укоренившимся термином «э. д. с.», но должны ясно отдавать себе отчет в смысле этого выражения¹⁾.

Для того чтобы еще более ясно представить весь разбираемый вопрос, воспользуемся аналогией между электрическим током и течением воды по трубам.

Хорошо известно, что для поддержания течения воды в трубе, несмотря на тормозящее действие трения, необходимо создать между точками трубы некоторую разность давлений. Эта разность давлений и движет воду. В водопроводе, например, эта разность давления создается с помощью водонапорной башни, уровень воды в которой выше, чем любая точка водопроводной сети. Разность уровней (или напор) вполне эквивалентна разности потенциалов (напряжению) электрической цепи, а наполненный водой бак на вершине башни играет роль заряженного конденсатора в разобранным нами примере. И подобно тому, как при электрическом токе конденсатор разряжается и разность потенциалов падает, стремясь к нулю, так и бак постепенно опорожняется, а разность уровней стремится к нулю, и водяной ток прекращается, подобно электрическому. Электрический ток будет более или менее кратковременным, в зависимости от электроемкости конденсатора и величины тока; совершенно

¹⁾ Мы не останавливаемся на том очевидном обстоятельстве, что слово «сила», здесь применяемое, не совпадает с понятием силы в механике, ибо речь идет о действии только на заряженные частицы.

так же водяной ток прекратится тем быстрее, чем меньше емкость бака и чем больше расход воды. И так же как для поддержания *н е п р ы в н о* го электрического тока нам необходимо было обеспечить какое-то устройство (генератор), являющееся источником «электродвижущей (электроразделительной) силы» (в нашем случае электрическая машина), так и для непрерывной работы водопровода необходимо добавить устройство, нагнетательный насос, который поддерживает нужную разность уровней, несмотря на непрерывное течение воды, и является источником «вододвижущей (точнее: водоподнимающей) силы».

И здесь роль водонапорного бака совершенно вспомогательная. Можно было бы обеспечить работу водопровода с помощью нагнетающего насоса, без бака. Однако ввиду неравномерности потребления воды в водопроводе технически удобнее иметь *з а п а с н а п о р а* с помощью высоко расположенного объемистого бака, пуская насос в ход лишь время от времени.

Не останавливаясь на рассмотрении практически применяемых важных генераторов, мы опишем пока простой опыт, наглядно показывающий процесс возникновения э. д. с.

Возьмем высокий стакан с возможно более чистой дистиллированной водой и введем в него два металлических (платиновых) электрода *A* и *K*, соединенных друг с другом проводами через чувствительный прибор для измерения тока — гальванометр (рис. 72). Теперь будем бросать в эту воду один за другим небольшие стеклянные шарики. Мы увидим, что во все время, пока шарики в стакане падают, наш прибор обнаруживает электрический ток, протекающий в проводах. Нетрудно понять, что здесь происходит. При соприкосновении с водой стеклянные шарики заряжаются отрицательно, а часть молекул воды приобретает положительный заряд (ср. рис. 13 на стр. 25). Под влиянием силы тяжести отрицательно заряженные шарики падают на металлическую пластинку *K* и заряжают ее отрицательно, а положительные ионы воды, поднимаясь вверх, заряжают пластинку *A* положительно. В результате между пластинками *K* и *A* возникает разность потенциалов (напряжение), т. е. создается электрическое поле, под действием которого и происходит в проводах перемещение электронов от *K* к *A*, т. е. электрический ток.

Таким образом, наш простой прибор представляет собой *г е н е р а т о р* электрического тока, в котором роль элек-

троразделительных (электродвижущих) сил играет сила тяжести¹⁾, перемещающая отрицательно заряженные шарики вниз, к пластинке *К*, несмотря на то, что взаимное притяжение положительных и отрицательных зарядов стремится воспрепятствовать их удалению друг от друга. Преодолевая это притяжение, сила тяжести разделяет заряды и тем самым обуславливает возникновение напряжения между пластинками *К* и *А*.

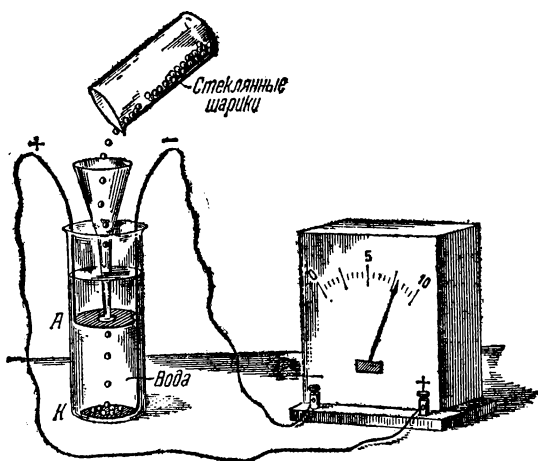


Рис. 72. Генератор тока, в котором роль электроразделительных (электродвижущих) сил играют силы тяжести.

Разобранный опыт позволяет нам уяснить себе еще одно очень важное обстоятельство. Если бы жидкость, в которую мы бросаем шарики, была и д е а л ь н ы м и з о л я т о р о м²⁾, то, разорвав цепь между пластинками *К* и *А* и подключив концы проводов к стержню и корпусу электрометра, мы могли бы прямо измерить напряжение между *К* и *А*, которое, по мере падения шариков и накопления зарядов на *К* и *А*, все время возрастало бы. До каких пор продолжался бы этот процесс накопления зарядов и нарастания напряже-

¹⁾ Ослабленная поддерживающей силой Архимеда.

²⁾ Дистиллированная вода не является хорошим изолятором для этой цепи. Стержень и корпус электрометра оказываются соединенными проводящим (хотя и слабо) столбом воды, и между ними не сможет установиться разность потенциалов.

ния между K и A ? Очевидно, что по мере роста заряда и усиления поля между K и A все более возрастают силы электрического поля, препятствующие падению шариков. Если бы жидкость была идеальным изолятором, то в конце концов эти силы электрического поля уравнивали бы силы тяжести, падение шариков и нарастание разности потенциалов между K и A прекратились бы. Мы видим, таким образом, что разность потенциалов на зажимах разомкнутого генератора (в данном случае генератором является стакан с падающими шариками) возрастает до тех пор, пока создаваемые ею электрические силы не уравновесят сторонние электродвижущие (электроразделительные) силы. Это имеет место и в случае любого другого генератора электрического тока. Поэтому в качестве меры электродвижущих сил, действующих в генераторе, следует принять ту разность потенциалов, которая создается ими на зажимах разомкнутого генератора.

Необходимо подчеркнуть, что э. д. с. генератора измеряется разностью потенциалов на его зажимах при условии, что цепь разомкнута. Если источник тока посылает в какую-либо цепь ток, то напряжение на электродах зависит от величины этого тока и оно тем меньше, чем больше сила тока. Поэтому один и тот же источник, в зависимости от величины отбираемого тока, может обладать различным напряжением на электродах. Максимальное из этих напряжений, существующее при разомкнутой цепи, и измеряет э. д. с. источника.

Сказанное сохраняет смысл и в нашей механической аналогии. Предположим, что водопроводная сеть отключена, и спросим себя, до какого уровня насос может накачивать воду в башню? Очевидно, это будет происходить до тех пор, пока силы давления столба воды в башне, противодействующие работе насоса, не уравновесят силу, с которой насос гонит воду. Таким образом, высота столба воды или, точнее, давление этого столба при отключенном водопроводе является мерой «водоподъемной силы» насоса. Если же водопроводная сеть включена, т. е. происходит не только приток воды в башню, но и ее отток, то уровень воды и давление всегда будет ниже, чем при отключенном водопроводе.

§ 40. Признаки электрического тока. Электрический ток, как мы говорили выше, есть процесс движения зарядов в теле, между участками которого создана разность потенциа-

лов. Однако природа «носителей заряда», т. е. тех заряженных частиц, движение которых составляет электрический ток, в разных случаях может быть совершенно различна. Наиболее простым и наглядным является тот случай, когда этими носителями являются просто небольшие заряженные крупинки вещества, например, стеклянные шарики в опыте на рис. 72. Но такие случаи очень редки и не типичны для явления электрического тока. В подавляющем большинстве случаев прохождения тока через различные тела *носителями заряда являются либо ионы вещества* (положительно или отрицательно заряженные молекулы или атомы), *либо свободные электроны*. В первом случае говорят, что вещество обладает ионной проводимостью, или что механизм проводимости является ионным. Во втором случае говорят об электронной проводимости. Известны и случаи смешанной проводимости, когда носителями заряда являются и ионы, и электроны одновременно.

Во всех случаях электронной и ионной проводимости перемещение отдельных электрически заряженных частиц непосредственно не наблюдается. Однако электрический ток вызывает различные явления, которые не имеют места при покоящихся зарядах, и по этим сопутствующим явлениям или признакам тока можно всегда определить наличие тока. Познакомимся с этими явлениями.

Соединим с источником напряжения приборы, изображенные на рис. 73. При замыкании ключей *K* будут происходить следующие явления:

1) Нить лампочки раскаляется и даже начинает светиться (рис. 73, *а*). Это значит, что ток вызывает нагревание проводника, по которому он проходит, т. е. *электрический ток производит тепловое действие*. Отметим, что в этом опыте нагревается не только нить, но и все остальные проводники, только менее заметно.

2) Магнитная стрелка отклоняется от первоначального положения (рис. 73, *б*) и остается отклоненной до тех пор, пока ключ *K* замкнут. *Электрический ток производит магнитное действие*.

3) На платиновых пластинках *C* (рис. 73, *в*) выделяются газы, которые поднимаются в виде пузырьков и накапливаются в верхней части обеих половин U-образного сосуда, заполненного подкисленной водой. Исследуя эти газы, можно убедиться, что на пластинке, соединенной с положитель-

ным полюсом элемента, выделяется кислород, а на пластинке, соединенной с отрицательным полюсом, — водород. Выпуская через краны оба газа в резиновую трубку и погружая ее конец в мыльную воду, можно наполнить смесью этих газов, так называемым гремучим газом, мыльные пузыри. При поднесении спички пузыри взрываются. Мы видим, что при прохождении электрического тока через подкисленную воду происходит разделение ее на составные части. То же самое получается и с многими иными растворами. *Электрический ток производит химическое действие.*

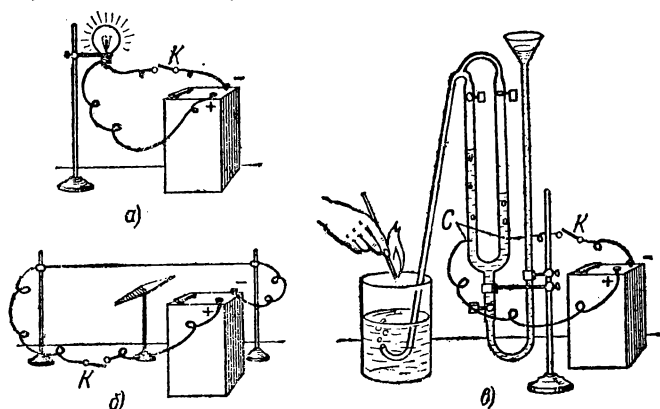


Рис. 73. Различные действия тока: а) светит электрическая лампочка накаливания; б) магнитная стрелка поворачивается перпендикулярно проводу с током; в) выделяются водород и кислород из подкисленной воды, залитой в U-образный стеклянный сосуд, соединенный с воронкой. В нижней части сосуда впаяны две платиновые пластинки, а верхние ее концы могут быть закрыты кранами.

Опыт показывает, что химическое действие тока наблюдается не во всех проводниках. Электрический ток в металлах не вызывает никаких химических изменений. Наоборот, в растворах серной кислоты, поваренной соли, селитры и во многих других веществах ток вызывает выделение составных частей. Поэтому принято делить все проводники на две группы: проводники первого класса, в которых электрический ток не вызывает химических действий, к ним относятся все металлы, а также уголь; и проводники второго класса, которые под действием электрического тока разделяются на

составные части. Проводники второго класса называют еще электролитами, а само явление разложения вещества током — электролизом¹⁾.

Нагревание проводников при прохождении через них данного тока может быть больше или меньше, в зависимости от свойств проводника. В нашем опыте нить лампочки сильно накаливается (свыше 1500°C), а другие провода той же цепи нагреваются чуть заметным образом. Некоторые вещества (например, свинец) можно привести в такое состояние (получившее название сверхпроводящего), при котором они практически совсем не

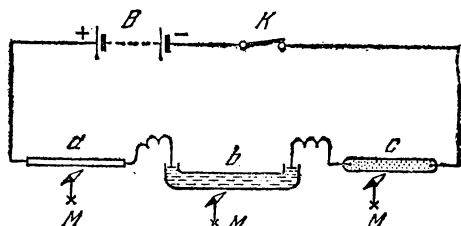


Рис. 74. Действие электрического тока на магнитную стрелку не зависит от свойств проводника, по которому течет ток. Ток, создаваемый батареей гальванических элементов B , при замкнутом ключе K проходит через проводники: твердый (проволока a), жидкий (раствор проводящей жидкости b) и газообразный (трубка с разряженным газом c), вызывая около каждого из них отклонение магнитной стрелки M ; стрелка устанавливается перпендикулярно к проводнику.

нагреваются током (см. далее § 49). Таким образом, и тепловое действие тока может иметь или не иметь места в зависимости от свойств проводника.

Магнитное же действие тока проявляется всегда, независимо от свойств проводников; магнитная стрелка, поставленная параллельно с любым проводником (рис. 74), по которому идет ток определенной силы, всегда испытывает отклонение, независимо от свойств проводника²⁾. Поэтому магнитное действие тока следует рассматривать как

¹⁾ От греческого «лио» — разлагаю.

²⁾ При постановке опыта в качестве газообразного проводника удобно взять имеющуюся в продаже прямую медицинскую ртутную лампу

наиболее характерное проявление тока. Отмечая это, Фарадей говорит: «Нет действия, более характерного для электрического тока».

§ 41. Направление тока. Вернемся к опыту, изображенному на рис. 73, но присоединим концы проводов, идущих к батарее, таким образом, чтобы провод, соединившийся ранее с положительным полюсом, оказался соединенным с отрицательным, и наоборот. Мы увидим, что только тепловое действие тока (накаливание лампочки) остается без изменений. Магнитная же стрелка хотя и отклоняется, однако в другую сторону; кислород выделяется на той из пластинок, на которой ранее выделялся водород, и т. д. Поэтому для характеристики тока нужно указать, к какому из полюсов батареи присоединен каждый провод. Вместо этого, однако, говорят о направлении тока, причем совершенно произвольно принимают, что ток во внешней цепи генератора направлен от положительного его полюса к отрицательному. Поэтому, когда говорят, что в проводнике идет ток от точки *a* к точке *b*, то это значит, что точка *a* соединена с положительным полюсом генератора, а *b* — с отрицательным, т. е. разность потенциалов точек *a* и *b* положительна. Иначе можно сказать, что за направление тока условно принимается то направление, в котором двигались бы под действием разности потенциалов положительные заряды. Но это вовсе не означает, что всегда и во всех проводниках движутся именно положительные заряды. Напротив, в одних случаях в проводнике фактически движутся только отрицательные заряды, в других же имеет место движение зарядов обоих знаков в противоположных направлениях. В частности, мы уже упоминали (§ 6), что в важнейших проводниках — металлах — могут перемещаться только электроны, несущие отрицательный заряд. При замыкании элемента металлической проволокой электрическое поле двигает электроны в сторону возроста потенциала (§ 21), т. е. от отрицательного полюса к положительному. Мы видим, что за направление тока принято направление, противоположное движе-

(тип ПРК-4 или ПРК-2). Необходимо только защитить зрителей от вредного действия ультрафиолетового излучения этой лампы при помощи надетой на нее стеклянной трубки.

нию электронов. Следует признать такое определение направления тока довольно неудачным. Оно было сделано в те времена, когда представление об электронах и их свойствах еще не было введено и природа носителей заряда в металлах была еще неизвестна.

§ 42. Величина тока. О наличии тока мы можем судить по любому из явлений, описанных в § 40. Для количественной же характеристики тока мы вводим понятие величины, или силы, тока. *Силой тока в проводнике условились называть количество электричества, проходящее через сечение проводника за единицу времени.* Таким образом, если за время t через сечение проводника проходит количество электричества, равное q , то величина тока I равна отношению q/t , т. е.

$$I = \frac{q}{t}. \quad (3,1)$$

Во избежание недоразумений подчеркнем еще раз, что перенос заряда $+q$ в одном направлении или заряда $-q$ в противоположном направлении с точки зрения нашего определения величины тока совершенно тождественны. Поэтому в формуле (3,1) под зарядом q мы разумеем сумму тех зарядов, которые были фактически перенесены положительно заряженными носителями заряда в направлении, условно принятом нами за направление тока, и отрицательными носителями в противоположном направлении. Ток, величина и направление которого не меняются с течением времени, называют **п о с т о я н н ы м** током.

Прежде всего возникает вопрос, одинакова ли величина тока во всех сечениях проводника. Если это имеет место, то, следовательно, электрические заряды проходят через проводник, не **н а к а п л и в а я с ь**: через любое сечение проводника в одни и те же промежутки времени проходит одинаковое количество электрических зарядов. Такой ток называется **у с т а н о в и в ш и м с я** (стационарным). Опыт показывает, что для установления тока достаточно очень короткого промежутка времени. Поэтому при постоянном токе мы всегда имеем дело с установившимся током. Если ток не постоянен, а меняет с течением времени свою величину или даже свое направление, то при быстром изменении тока может наблюдаться и неустановившийся ток, т. е. в **р а з н ы х** сечениях провода в **о д и н и** тот

же момент может наблюдаться ток разн ой в е л и ч и н ы. Чем длиннее провод, тем легче, при переменном токе, может создаться такое положение. В дальнейшем изложении мы будем всегда иметь дело с установившимся током, так что для определения величины тока мы можем измерить его в л ю б о м месте проводника.

Так как $I = \frac{q}{t}$, то единицей величины тока служит ток, при котором за единицу времени через сечение проводника проходит единица количества электричества. В практической системе заряд измеряется в кулонах, а время — в секундах. Поэтому *практическая единица силы тока есть такой ток, при котором за одну секунду через сечение проводника проходит заряд в один кулон*. Она носит название а м п е р ¹⁾ и обозначается *a* или А. На практике применяются и более мелкие единицы: м и л л и а м п е р, равный 0,001 *a* (*ма*, или *mA*) и м и к р о а м п е р — одна миллионная ампера (*мкa*, или μA).

Если известна сила тока I (в амперах) в каком-либо проводнике и время t (в секундах), в течение которого проходил ток, то тем самым известен и полный заряд q (в кулонах), прошедший через проводник за это время. Согласно формуле (3,1), он равен

$$q = I \cdot t. \quad (3,1')$$

В абсолютной системе единиц за единицу силы тока принимают такой ток, при котором за 1 секунду через сечение проводника проходит заряд в 1 абсолютную единицу. Так как кулон равен $3 \cdot 10^9$ абсолютных единиц заряда, то, очевидно, и ампер во столько же раз больше абсолютной единицы тока.

Формулы (3,1) или (3,1') использованы и в Международной системе СИ, но не для определения ампера (который вводится в этой системе в качестве основной единицы и определяется иначе, см. § 134), а для определения единицы заряда — кулона. В соответствии с (3,1') один кулон *есть электрический заряд, переносимый через поперечное сечение проводника за одну секунду при силе тока в один ампер*. Таким образом, в системе СИ можно называть кулон также а м п е р - с е к у н д о й (размерность заряда в этой системе есть *сек·a*).

¹⁾ По имени Андре Мари Ампера (1775—1836) — французского физика, в честь которого названа эта единица.

У п р а ж н е н и я. 42.1. Измерено, что заряд одного электрона равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ к. Сколько электронов проходит в одну секунду через поперечное сечение проволоки, по которой течет ток в 1 а?

42.2. На практике величину заряда измеряют не только в кулонах, но и в «ампер-часах». Сколько кулонов в одном «ампер-часе»?

§ 43. «Скорость электрического тока» и скорость движения носителей заряда. Когда в торжественный момент открытия новой ГЭС начальник строительства включает главный рубильник, то обычно пишут, что «в т о т ж е м о м е н т» во всех точках района вспыхивают лампочки и приходят в движение электромоторы. Однако это не вполне точно.

Представим себе очень длинную цепь тока, например телеграфную линию между двумя городами, отстоящими один от другого, скажем, на 1000 км. Тщательные опыты показывают, что действия тока во втором городе начнут проявляться, т. е. электроны в находящихся там проводниках начнут двигаться примерно через $1/300$ секунды после того, как началось их движение по проводам в первом городе. Часто говорят не очень строго, но очень наглядно, что ток распространяется по проводам со скоростью 300 000 км/сек.

Это, однако, совсем не означает, что движение носителей заряда в проводнике происходит с этой огромной скоростью, так что электрон или ион, находившийся в нашем примере в первом городе, через $1/300$ секунды достигнет второго. Совсем наоборот. Движение носителей в проводнике происходит почти всегда очень медленно, со скоростью в несколько мм/сек, а часто и еще меньшей. Мы видим, следовательно, что нужно тщательно различать и не смешивать понятия «скорость тока» и «скорость движения носителей заряда в токе».

Чтобы разобраться в том, что, собственно, мы имеем в виду, говоря о «скорости тока», вернемся снова к опыту с периодической зарядкой и разрядкой конденсатора, изображенному на рис. 71, но представим себе, что провода в правой части этого рисунка, через которые разряжается конденсатор, очень длинны, так что лампочка L или прибор G для обнаружения тока находятся, скажем, на расстоянии в тысячу км от конденсатора. В тот момент, когда мы ставим ключ K в положение 2, начинается движение электронов в участках проводов, прилегающих к конденсатору. Электроны начинают стекать с отрицательной пластины A ; одновременно, вследствие индукции, должен уменьшаться и положительный заряд на B , т. е. электроны должны

притекать к B из соседних участков провода: заряд на пластинах и разность потенциалов между ними начинает уменьшаться.

Но перемещение электронов, произошедшее в участках проводов, непосредственно примыкающих к пластинам конденсатора, приводит к появлению добавочных электронов (в участке около A) или к уменьшению их числа (в участке около B). Это перераспределение электронов изменяет электрическое поле в соседних участках цепи, и там также начинается движение электронов. Указанный процесс захватывает все новые и новые участки цепи, и когда, наконец, движение электронов начнется в волоске удаленной лампочки, оно проявится в накаливании волоска (вспышке). Понятно, что совершенно аналогичные явления имеют место и при включении любого генератора тока.

Таким образом, начавшееся в одном месте движение зарядов через изменение электрического поля распространяется по всей цепи. Одни за другими все более удаленные носители заряда вовлекаются в это движение, и эта передача действия от одних зарядов к другим и происходит с огромной скоростью (около 300 000 км/сек). Иначе можно сказать, что электрическое действие передается от одной точки цепи к другой с этой скоростью или что с этой скоростью распространяется вдоль проводов изменение электрического поля, возникшее в каком-нибудь месте цепи.

Таким образом, *та скорость, которую мы для краткости называем «скоростью тока», — это скорость распространения вдоль проводника изменений электрического поля, а отнюдь не скорость движения в нем носителей заряда.*

Поясним сказанное механической аналогией. Представим себе, что наши два города соединены не металлическими проводами, а нефтепроводом, и что в одном из этих городов начал работать насос, повышающий в этом месте давление нефти. Это повышенное давление будет распространяться по жидкости в трубе с большой скоростью — около километра в секунду. Таким образом, через секунду начнут двигаться частицы на расстоянии, скажем, в 1 км от насоса, через две секунды — на расстоянии 2 км, через минуту — на расстоянии 60 км и т. д. Спустя примерно четверть часа начнет вытекать из трубы нефть во втором городе. Но движение самих частиц нефти проис-

ходит значительно медленнее, и может пройти несколько суток, пока какие-нибудь определенные частицы нефти дойдут от первого города до второго. Возвращаясь к электрическому току, мы должны сказать, что «скорость тока» (скорость распространения электрического поля) аналогична скорости распространения давления по нефтепроводу, а «скорость носителей» аналогична скорости движения частиц самой нефти.

§ 44. Гальванометр. В зависимости от величины тока действия его проявляются в различной степени. Поэтому для измерения тока можно использовать любое действие его: и химическое, и тепловое, и магнитное. Приборы, предназначенные для измерения величины тока, носят название **г а л ь в а н о м е т р о в**.

Мы опишем пока наиболее простой тип гальванометра, основанного на **т е п л о в о м** действии тока (рис. 75). Он содержит тонкую проволоку ab , закрепленную на концах, через которую пропускают измеряемый ток. К ее середине прикреплен конец прочной тонкой нити cd , обернутой вокруг оси стрелки O и скрепленной другим концом с

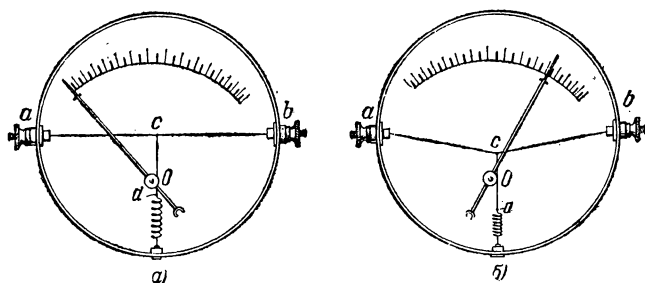


Рис. 75. Устройство теплового амперметра: а) тока нет; б) через амперметр проходит ток.

растянутой пружиной. Под действием тока проволока ab нагревается и удлиняется. При этом нить, оттягиваемая пружиной, поворачивает стрелку на некоторый угол, зависящий от удлинения проволоки, т. е. от величины тока.

Очень часто на шкале гальванометра проставляют цифры, непосредственно указывающие силу тока в амперах (или долях ампера). В этом случае гальванометр называется **а м п е р м е т р о м** (соответственно **м и л л и а м п е р м е т р о м** или **м и к р о а м п е р м е т р о м**).

Для измерения тока гальванометр или амперметр нужно включить таким образом, чтобы через него прошел полный ток цепи. Для этого следует разорвать в каком-либо месте цепь и образовавшиеся концы приключить к зажимам

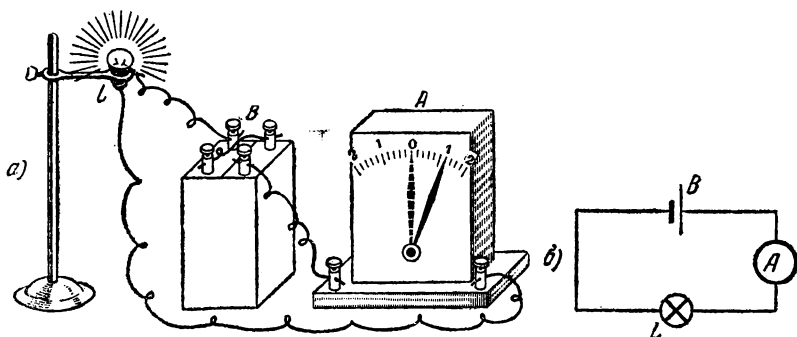


Рис. 76. Измерение тока, проходящего через лампочку, при помощи амперметра. B — батарея гальванических элементов, L — лампочка (сопротивление), A — амперметр. а) Изображение опыта. б) Схема опыта.

амперметра, т. е. включить амперметр в цепь последовательно (рис. 76). Так как мы измеряем установившийся ток, то безразлично, в каком месте цепи включен амперметр.

§ 45. Распределение напряжения в проводнике с током. Мы видели (§ 24), что в случае равновесия зарядов разность потенциалов (напряжение) между любыми точками проводника равна нулю. Наоборот, если по проводнику течет ток, то между различными точками проводника должно существовать напряжение. Исследуем распределение напряжения в проводнике с током.

Прикрутим к концам деревянного изолированного стержня (в точках A и B , рис. 77) металлические проволоки n, n и соединим их с полюсами работающей электрической машины. Так как дерево является проводником, хотя и плохим, то в стержне возникает ток. (Этот ток настолько слаб, что его можно обнаружить и измерить, только применяя чувствительный гальванометр.) Присоединив листочки и корпус электрометра к каким-либо двум точкам стержня A и C , мы обнаружим, что между ними существует некоторая раз-

ность потенциалов (напряжение). Напряжение это тем больше, чем дальше друг от друга отстоят вдоль стержня сравниваемые точки, и достигает наибольшего значения между крайними точками стержня.

То же самое можно показать, пользуясь вместо электрической машины гальваническими элементами и создавая ток не в деревянном стержне, а в металлической проволоке. Для этого можно взять кусок железной проволоки и замкнуть ее на батарею из нескольких элементов, соединенных последовательно. Ток в проволоке будет намного сильнее, чем в деревянном стержне в предыдущем опыте, и его можно легко измерить, введя последовательно в цепь амперметр. Однако напряжение между различными точками проволоки будет в этом опыте невелико, и для его измерения нужно применить вместо обычного школьного электрометра более чувствительный прибор. И в этом опыте мы найдем, что между различными точками проволоки существует напряжение, которое достигает наибольшей величины между концами проволоки.

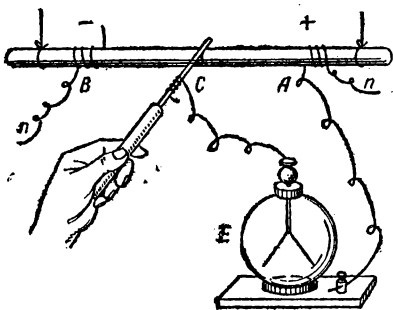


Рис. 77. Распределение напряжения в деревянном стержне AB , по которому идет ток. Присоединяя электрометр E к точкам A и C стержня, можно убедиться, что напряжение тем больше, чем ближе к B взята точка C .

При наличии в проводнике электрического тока между концами любого его участка существует электрическое напряжение.

Существование разности потенциалов между точками проводника с током совершенно аналогично существованию разности давления в струе жидкости при ее течении в трубах, с которым мы познакомились в механике (т. I, «Механика»). Это сходство можно проследить на приборе, изображенном на рис. 78 и понятном без дальнейших пояснений. Если закрыть конец E горизонтальной трубки краном b , то тока жидкости не будет; при этом во всех манометрах a, a, \dots жидкость устанавливается на одной и той же высоте (обозначенной штрих-пунктирной линией), т. е. между различными точками трубки нет разности

давлений, точно так же, как между точками проводника, по которому не течет ток, нет разности потенциалов. При открывании зажима b возникает более или менее сильный ток жидкости, и уровни манометров располагаются по наклонной линии OE , указывая на падение давления вдоль трубки.

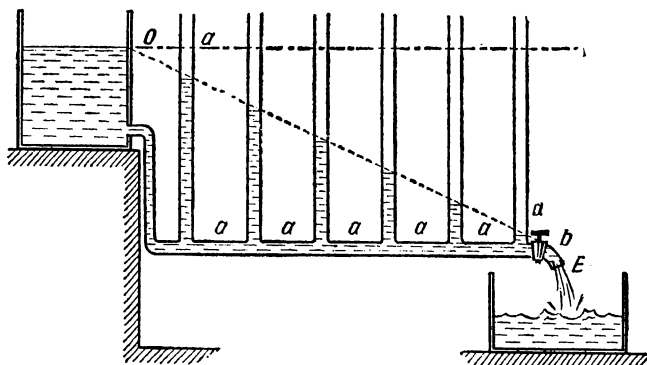


Рис. 78. Распределение давления жидкости в трубе аналогично падению напряжения электричества в цепи.

§ 46. Закон Ома. Пользуясь опытами, описанными в предыдущем параграфе, можно установить важный закон, носящий название *з а к о н а О м а*¹⁾. Измеряя одновременно *н а п р я ж е н и е* на концах какого-либо участка проводника и *в е л и ч и н у т о к а*, идущего через проводник, мы убеждаемся, что *сила электрического тока в каком-либо участке проводника пропорциональна напряжению между концами выбранного участка*.

Обозначая напряжение на концах проводника через U , а силу тока в нем — через I , мы можем записать закон Ома так:

$$I = k \cdot U. \quad (3,2)$$

В этой формуле через k обозначен коэффициент пропорциональности между током и напряжением, который зависит от *с в о й с т в п р о в о д н и к а*. Чем больше k , тем больше и ток при одном и том же напряжении, т. е. тем больше заряд проходит через проводник за единицу времени.

¹⁾ Георг Ом (1787—1854) — немецкий физик.

Поэтому величина k носит название э л е к т р о п р о в о д н о с т и, или п р о в о д и м о с т и, данного проводника.

Очень часто вместо электропроводности k вводят обратную величину $1/k$. Она получила название э л е к т р и ч е с к о г о с о п р о т и в л е н и я проводника, или просто с о п р о т и в л е н и я. Обозначая сопротивление проводника через $R = \frac{1}{k}$, закон Ома можно записать в форме

$$I = \frac{U}{R}, \quad (3,3)$$

или

$$U = I \cdot R. \quad (3,3')$$

Эти формулы показывают, что при заданном напряжении U на концах проводников с различными сопротивлениями R сила проходящего тока тем меньше, чем больше сопротивление. Таким образом, увеличение сопротивления проводника означает увеличение помех, которые испытывают носители электрических зарядов в своем движении по проводнику под действием приложенного напряжения. Нетрудно представить себе те процессы, которые обуславливают эти помехи. В металлическом проводнике движение зарядов есть движение электронов между атомами металла и теми положительными ионами, которые получаются в результате отделения этих электронов проводимости от атомов, составляющих металл. В электролитах — это движение положительных и отрицательных ионов друг относительно друга, происходящее среди неионизованных молекул раствора. Естественно считать, что у п о р я д о ч е н н о е движение заряженных частиц, представляющее собой ток и происходящее среди многочисленных частиц, не принимающих участия в этом упорядоченном движении, а лишь совершающих хаотическое тепловое «топтанье на месте», — сопровождается многочисленными столкновениями носителей зарядов с другими частицами. Эти столкновения, затрудняющие перемещение заряженных частиц по проводнику, и являются причиной с о п р о т и в л е н и я проводников прохождению тока. Можно предвидеть из этих соображений, что сопротивление зависит от геометрических размеров проводника, т. е. от его длины и сечения, равно как от его состава и строения, определяющих частоту столкновений носителей зарядов с окружающими частицами. Не исключено и влияние температуры провод-

ника, поскольку более или менее оживленное тепловое движение частиц может сказаться на числе столкновений.

Если в формуле (3,3) положить $I=1$ и $U=1$, то R будет также равно 1. Это значит, что в практической системе единиц, как и в Международной системе СИ, *единицей сопротивления является сопротивление такого проводника, по которому течет ток в 1 ампер, если на концах его поддерживается напряжение в 1 вольт*. Эта единица сопротивления называется о м о м. Если выразить в формуле (3,3) напряжение в вольтах, а сопротивление в омах, то величина тока получится в амперах. Аналогично можно определить единицу сопротивления в абсолютных электростатических единицах.

Закон Ома, представляющий один из важнейших законов электрического тока, имеет смысл только тогда, когда отношение U к I , названное нами сопротивлением, есть постоянная для данного проводника величина. Другими словами, закон Ома справедлив для таких проводников, у которых сопротивление не зависит от приложенного напряжения и величины тока. К этому типу проводников относятся металлические проводники, уголь и электролиты. Но сопротивление газов, сделанных проводящими (например, ионизованных нагревом), зависит от приложенного напряжения, и потому для газов закон Ома не справедлив (если только не ограничиваться небольшими напряжениями, которые еще не сказываются на величине сопротивления ионизованного газа). Существуют и другие проводящие материалы, к которым закон Ома неприменим.

У п р а ж н е н и е. 46.1. Сопротивление человеческого тела имеет величину порядка десятков тысяч ом (оно различно для разных индивидуумов). Принимая для него значение 36 000 ом, вычислите, какой ток проходит через человека, если он касается руками осветительных проводов, находящихся под напряжением 120 в. **П р е д о с т е р е ж е н и е.** Этот ток может быть очень опасен для здоровья, поэтому надо остерегаться прикосновения к обнаженным проводам. При напряжении сети 220 в такой контакт может быть смертельным.

§ 47. Сопротивление проволоки. В предыдущем параграфе было указано, что электрическое сопротивление для разных проводников различно и величина его может зависеть как от материала, из которого сделаны проводники, так и от их размеров. В дальнейшем мы будем рассматривать «линейные» проводники, т. е. такие, поперечные размеры которых малы по сравнению с их длиной. К таковым относятся обычно применяемые в технике провода, представляющие собой металлические проволоки или длинные узкие пластины (ш и н ы).

Исследуем, как зависит сопротивление проволоки от ее размеров. Для измерения сопротивления можно восполь-

зываются законом Ома. Измерив напряжение между концами проволоки U и величину идущего через нее тока I , мы можем вычислить сопротивление R из соотношения:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (3,3'')$$

Рассмотрим несколько простых случаев.

а) Однородная проволока постоянного сечения (рис. 79). При помощи достаточно чувствительного электрометра E (§ 25) измерим напряжение между какими-нибудь двумя

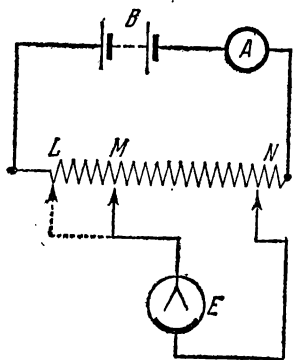


Рис. 79. Схема опыта, показывающего, что сопротивление отрезка однородной проволоки постоянного сечения пропорционально его длине. LN — однородная проволока; M — промежуточная точка на ней; B — батарея гальванических элементов; A — амперметр; E — электрометр.

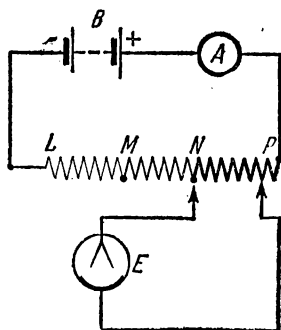


Рис. 80. Схема опыта, показывающего, что сопротивление проволоки из одинакового материала и одинаковой длины, но различного сечения обратно пропорционально площади поперечного сечения. LM , MN и NP — проволоки; B — батарея гальванических элементов; A — амперметр; E — электрометр.

точками (например M и N). Величина тока I в проволоке повсюду одна и та же. Пользуясь соотношением (3,3''), найдем сопротивление различных отрезков нашей однородной проволоки. Такие измерения показывают, что *сопротивление отрезка однородной проволоки постоянного сечения прямо пропорционально его длине l* .

б) Проводник составлен из проволок одного материала и одинаковой длины, но разного сечения (рис. 80). Измерим напряжения между точками L и M , M и N , N и P , соответствующими отрезкам равной длины, и вычислим сопро-

тивления этих отрезков R_1, R_2, R_3, \dots с помощью формулы (3,3"). Найдем, что *сопротивление отрезков проволоки одинаковой длины обратно пропорционально площади ее поперечного сечения s .*

в) Если в описанном опыте использовать проволоки одинакового сечения и одинаковой длины, но сделанные из разного материала, например, медную и железную (рис. 81), то окажется, что сопротивление медной проволоки гораздо меньше, нежели железной. *Сопротивление проволоки зависит также от ее материала.*

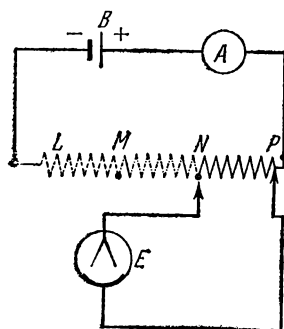


Рис. 81. Схема опыта, показывающего, что сопротивление проволок одинаковой длины и одинакового сечения, но из разных материалов, зависит от материала проволоки; LM, MN и NP — проволоки; B — гальванический элемент; A — амперметр; E — электрометр.

Полученные результаты можно выразить следующей общей формулой:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s}. \quad (3,4)$$

Здесь R — сопротивление проволоки, l — ее длина, s — площадь поперечного сечения, а ρ — коэффициент пропорциональности, зависящий от рода материала и от выбранной системы единиц. Величина ρ называется **удельным сопротивлением** материала. Оно равно сопротивлению куска данного вещества, имеющего длину, равную единице, и площадь поперечного сечения, равную единице.

В таблице 2 приведены значения удельного сопротивления ρ для некоторых употребительных материалов. При этом длина l считается измеренной в $см$, площадь поперечного сечения s — в $см^2$, а сопротивление — в омах.

Второй столбец таблицы дает выраженное в омах сопротивление Ω проволоки длиной в один метр при диаметре в 1 мм .

В третьем столбце таблицы даны значения **удельной электропроводности** σ , представляющей собой величину, обратную удельному сопротивлению ρ (т. е. $\sigma = \frac{1}{\rho}$).

Таблица 2

Удельное сопротивление некоторых веществ при 0°С

Вещество	ρ	Ω	$\sigma = \frac{1}{\rho}$
Серебро (химически чистое) . .	$1,47 \cdot 10^{-6}$	0,0187	$6,8 \cdot 10^5$
Медь (химически чистая) . .	$1,55 \cdot 10^{-6}$	0,0197	$6,45 \cdot 10^5$
Медь (техническая)	$1,7 \cdot 10^{-6}$	0,0216	$5,9 \cdot 10^5$
Вольфрам	$5,3 \cdot 10^{-6}$	0,0673	$1,9 \cdot 10^5$
Платина	$9,8 \cdot 10^{-6}$	0,125	$1,0 \cdot 10^5$
Железо (химически чистое) . .	$9,60 \cdot 10^{-6}$	0,122	$1,04 \cdot 10^5$
Железо (техническое)	$12 \cdot 10^{-6}$	0,153	$8,3 \cdot 10^4$
Свинец	$20 \cdot 10^{-6}$	—	$5,0 \cdot 10^4$
Никелин (сплав Cu, Ni и Mn)	$40 \cdot 10^{-6}$	0,51	$2,5 \cdot 10^4$
Манганин (сплав Cu, Ni и Mn)	$43 \cdot 10^{-6}$	0,55	$2,3 \cdot 10^4$
Константан (сплав Cu и Mn)	$50 \cdot 10^{-6}$	0,63	$2,0 \cdot 10^4$
Ртуть	$94,1 \cdot 10^{-6}$	1,20	$1,06 \cdot 10^4$
Нихром (сплав Ni и Cu)	$110 \cdot 10^{-6}$	1,4	$9,1 \cdot 10^3$
10%-ный раствор серной кислоты	2,6	—	0,38
10%-ный раствор поваренной соли	8,3	—	0,12
10%-ный раствор медного купороса	31,5	—	$3,17 \cdot 10^{-2}$
Древесина	10^8	—	$1 \cdot 10^{-8}$
Мрамор	$5 \cdot 10^9$	—	$2 \cdot 10^{-10}$
Кварц плавленый	$5 \cdot 10^{18}$	—	$2 \cdot 10^{-19}$

У п р а ж н е н и я. 47.1. Чему равно сопротивление 1 м медной проволоки толщиной в 0,15 мм?

47.2. Сколько потребуется метров никелиновой проволоки диаметром 0,05 мм для изготовления катушки с сопротивлением 10^5 ом ?

§ 48. Зависимость сопротивления от температуры. Опыт в соответствии с общими соображениями § 46 показывает, что сопротивление проводника зависит также и от т е м п е р а т у р ы его.

Намотаем в виде спирали несколько метров тонкой (диаметра 0,1—0,2 мм) железной проволоки и включим ее в цепь, содержащую батарею гальванических элементов B и амперметр A (рис. 82). Сопротивление этой проволоки подберем таким, чтобы при комнатной температуре стрелка амперметра отклонялась почти на всю шкалу. Отметив показания амперметра, сильно нагреем проволоку при помощи горелки. Мы увидим, что по мере нагревания ток в цепи уменьшается, а, значит, сопротивление проволоки при

нагревании увеличивается. Такой результат получается не только с железом, но и со всеми другими м е т а л л а м и. При повышении температуры сопротивление металлов увеличивается. У некоторых металлов это увеличение значительно: у чистых металлов при нагревании на 100° оно достигает 40—50%; у сплавов оно обычно бывает меньше. Есть специальные сплавы, у которых сопротивление почти не меняется при повышении температуры; таков, например, к о н с т а н т а н (название происходит от латинского слова «констанс» — «постоянный») и м а н г а н и н. Константан употребляется для устройства некоторых измерительных приборов.

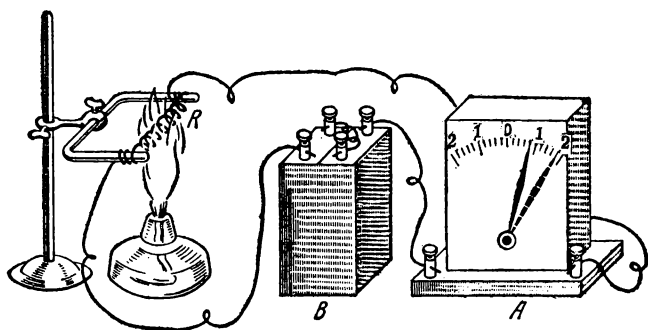


Рис. 82. Опыт, показывающий зависимость сопротивления проволоки от температуры. При нагревании сопротивление проволоки увеличивается. R — проволока, B — батарея гальванических элементов, A — амперметр.

Иначе меняется при нагревании сопротивление э л е к т р о л и т о в. Повторим описанный опыт, но введем в цепь вместо железной проволоки какой-нибудь электролит (рис. 83). Мы увидим, что показания амперметра при нагревании электролита все время увеличиваются, а значит, *сопротивление электролитов при повышении температуры уменьшается.*

Отметим, что сопротивление у г л я и некоторых других тел также у м е н ь ш а е т с я при нагревании.

Зависимость сопротивления металлов от температуры используется для устройства т е р м о м е т р о в с о п р о т и в л е н и я. В простейшем виде это — намотанная на слюдяную пластинку тонкая платиновая проволока (рис. 84), сопротивление которой при различных температурах хо-

рошо известно. Термометр сопротивления помещают внутрь тела, температуру которого желают измерить (например, в печь), а концы обмотки включают в цепь. Измеряя сопротивление обмотки, можно определить неизвестную

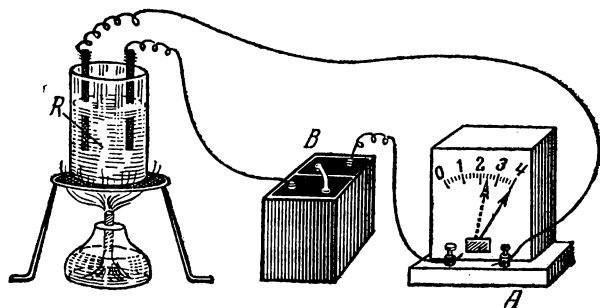


Рис. 83. Опыт, показывающий зависимость сопротивления электролита от температуры. При нагревании сопротивление электролита уменьшается. R — электролит, B — батарея гальванических элементов, A — амперметр.

температуру. Такие термометры часто применяются для измерения очень высоких и очень низких температур, при которых ртутные термометры уже неприменимы.

Изменение сопротивления проводника при его нагревании на 1°C , разделенное на первоначальное сопротивление, называется температурным коэффициентом сопротивления и обычно обозначается буквой α .

Вообще говоря, температурный коэффициент

сопротивления сам зависит от температуры, для которой мы его определили. Величина α имеет одно значение, например, если мы будем повышать температуру от 20°C до 21°C , и другое при повышении температуры от 200°C до 201°C . Но во многих случаях это изменение в довольно широком

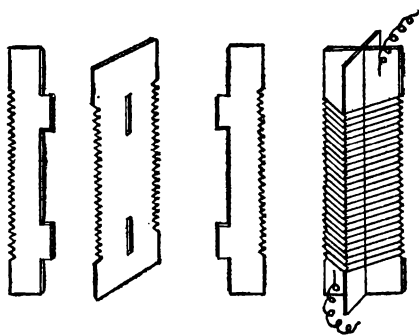


Рис. 84. Термометр сопротивления.

интервале температур незначительно, и можно пользоваться средним значением α в этом интервале. Если сопротивление проводника при температуре t_0 равно R_0 , а при температуре t равно R_t , то среднее значение

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{R_t - R_0}{R_0} \cdot \frac{1}{t - t_0}. \quad (3,5)$$

Обычно в качестве R_0 принимают сопротивление при температуре 0°C .

В таблице 3 приведены значения $\alpha_{\text{ср}}$ для некоторых проводников.

Т а б л и ц а 3

Средние значения температурных коэффициентов сопротивления $\alpha_{\text{ср}}$ некоторых проводников (в интервале от 0 до 100°C)

Вещество	$\alpha_{\text{ср}}$	Вещество	$\alpha_{\text{ср}}$
Железо	$6,6 \cdot 10^{-3}$	Ртуть	$8,8 \cdot 10^{-4}$
Вольфрам	$4,8 \cdot 10^{-3}$	Никелин	$3 \cdot 10^{-4}$
Медь	$4,3 \cdot 10^{-3}$	Нихром	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Серебро	$4,1 \cdot 10^{-3}$	Константан	$4 \cdot 10^{-5}$
Платина	$3,9 \cdot 10^{-3}$	Манганин	$2 \cdot 10^{-5}$

У п р а ж н е н и я. 48.1. При включении электрической лампочки величина тока в первый момент отличается от величины тока, который течет после того, как лампочка начнет светиться. Как изменяется ток у угольной лампочки? у лампочки с металлической нитью?

48.2. Сопротивление электрической лампочки накаливания с вольфрамовой нитью равно 60 ом, когда лампочка выключена. При полном накале сопротивление лампочки возрастает до 636 ом. Какова температура накаливания нити? Использовать таблицу 3.

48.3. Сопротивление электрической печи с никелиновой обмоткой в ненагретом состоянии равно 10 ом. Каково будет сопротивление этой печи, когда обмотка ее нагреется до 700°C ? Использовать таблицу 3.

§ 49. Сверхпроводимость. При очень низких температурах наблюдается удивительное явление: начиная с некоторой «критической» температуры, сопротивление многих металлов внезапно, скачком, уменьшается в миллиарды раз. Это явление получило название сверхпроводимости. Критическая температура, при которой наступает сверхпроводимость, различна у разных металлов, но у всех близка к абсолютному нулю (т. I, «Теплота»); так, например,

у свинца она равна $7^{\circ},3 \text{ К}$ (т. е. около -266° С), у ртути $4^{\circ},12 \text{ К}$ (около -269° С).

Сопротивление металлов в сверхпроводящем состоянии настолько мало, что практически его можно считать равным нулю. Что это означает? Мы знаем, что для поддержания тока в обычных металлах, т. е. при наличии сопротивления, необходимо все время действовать на электроны внешней силой, обеспечивающей их движение несмотря на силы, ему препятствующие и вызываемые столкновениями электронов с атомами металла. Необходимая внешняя сила, действующая на электрон, обеспечивается с помощью включения в цепь источника электродвижущей силы, как это уже было подробно разъяснено (§ 39). Итак, необходимым условием поддержания тока в цепи проводников с сопротивлением является действие в цепи э. д. с. Как только прекращается действие э. д. с., так практически мгновенно прекращается и ток. Хорошей иллюстрацией сказанного может служить явление электромагнитной индукции тока¹⁾. Представим себе проволочное кольцо, помещенное в магнитное поле. При выключении магнитного поля (например, при быстром удалении магнита) в кольце возникает индукционный ток. Однако ток этот оказывается чрезвычайно кратковременным, ибо э. д. с. индукции действует только в момент выключения магнитного поля, а с прекращением действия э. д. с. прекращается и ток в проводнике с сопротивлением.

Но если мы имеем дело со сверхпроводником, сопротивление которого практически равно нулю, то в нем нет сил, препятствующих движению электронов. Поэтому для поддержания тока в сверхпроводнике нет надобности в электрическом поле, а следовательно, не нужно поддерживать на концах каждого участка проводника разность потенциалов и поэтому становится излишним и источник э. д. с. Ток, возникший в сверхпроводнике, может сохраняться неограниченно долго и после прекращения действия электродвижущей силы. Действительно, такое явление удалось наблюдать. Для этой цели был осуществлен описанный выше опыт возбуждения индукционного тока. Только на этот раз кольцо было сделано из свинцовой проволоки, охлажденной до сверхпро-

¹⁾ Основные сведения об этом явлении известны из курса 7-го класса.

дящего состояния. При выключении магнитного поля н а м г н о в е н и е возникла э. д. с. индукции. Однако вызванный ею ток не прекратился после исчезновения э. д. с., а продолжал длительно существовать. В одном из опытов такого рода Каммерлинг-Оннес¹⁾ наблюдал после выключения магнитного поля ток, длившийся в течение почти 4 суток! Конечно, все это время свинцовое кольцо поддерживалось при температуре около 7° К , т. е. оставалось в сверхпроводящем состоянии.

И для этого замечательного случая полностью сохраняется механическая аналогия с явлением течения жидкости по трубам. Течение обычной жидкости связано с наличием сопротивления, обусловленного вязкостью (внутренним трением) жидкости (т. I, «Механика»). Для поддержания тока жидкости необходимо обеспечить соответствующую разность давлений между концами любого участка струи, а, следовательно, включить в цепь источник «вододвижущей силы» (насос); силы, обусловленные этой разностью давлений, и поддерживают ток, несмотря на противодействие сил трения.

Но если мы используем жидкость, внутреннее трение (вязкость) которой практически равно нулю, то для поддержания течения такой жидкости нет необходимости в разности давления, а, следовательно, и в «вододвижущей силе». Такая жидкость без вязкости в кольцевой трубе, приведенная в движение мгновенным толчком, будет продолжать течь неограниченно долго, хотя давление во всех точках трубы будет одинаковым. Это нетрудно понять, ибо, если трение о т с у т с т в у е т, то для поддержания равномерного движения не нужна внешняя сила. Таким образом, течение ж и д к о с т и без вязкости вполне аналогично электрическому току в сверхпроводниках. Подобную жидкость удалось реализовать. Как обнаружил П. Л. Капица, вязкость жидкого гелия, охлажденного до температуры ниже $2^{\circ},12\text{ К}$ (т. е. — 271° С), исчезающе мала. По аналогии со сверхпроводящими металлами гелий в таком состоянии получил название с в е р х т е к у ч е г о.

§ 50. Последовательное и параллельное соединение проводников. На практике электрические цепи никогда не состоят из однородной проволоки одинакового сечения, а представляют собой с о в о к у п н о с т ь различных проводников, определенным образом соединенных между собой. Каким путем можно найти сопротивление сложной цепи, если известно сопротивление отдельных проводников, ее составляющих?

Рассмотрим случай двух проводников, включенных в цепь п о с л е д о в а т е л ь н о (рис. 85). Пусть сопротивление отдельных проводников равно R_1 и R_2 . Сила

¹⁾ Каммерлинг-Оннес (1853—1926) — голландский физик, открывший явление сверхпроводимости.

тока I в обоих проводниках, конечно, одинакова (§ 42). Однако напряжения U_1 и U_2 между концами каждого из проводников различны. На основании закона Ома имеем:

$$U_1 = I \cdot R_1; \quad U_2 = I \cdot R_2,$$

поэтому

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (3,6)$$

При последовательном соединении напряжение на каждом из проводников пропорционально его сопротивлению.

Полное напряжение U между началом первого проводника и концом второго равно сумме этих напряжений. Поэтому

$$U = U_1 + U_2 = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 = I \cdot (R_1 + R_2).$$

Если обозначить через R сопротивление всего участка цепи, состоящего из сопротивлений R_1 и R_2 , то по закону Ома

$$U = I \cdot R.$$

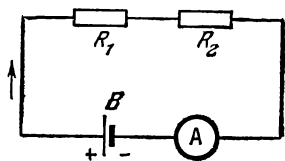


Рис. 85. Измерение силы тока в цепи, где сопротивления R_1 и R_2 соединены последовательно. B — гальванический элемент; A — амперметр. Схема опыта.

Из сравнения двух последних формул легко найти, что

$$R = R_1 + R_2.$$

Производя подобные рассуждения для 3, 4 и, вообще, n проводников, мы получим, очевидно, следующий результат:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n. \quad (3,7)$$

Сопротивление участка цепи, составленного из последовательно соединенных проводников, равно сумме сопротивлений отдельных проводников. Или коротко: *при последовательном соединении проводников складываются их сопротивления.*

Рассмотрим теперь соединение двух проводников с сопротивлениями R_1 и R_2 , изображенное на рис. 86. Такое соединение называется **п а р а л л е л ь н ы м**. Проводники включены в цепь батареи B . Обозначим силу тока, идущего

по цепи, которую мы измеряем амперметром A , через I . Ток этот, входя в группу проводников R_1 и R_2 , разветвляется на два, вообще говоря, не равных по величине тока I_1 и I_2 . Сумма этих токов I_1 и I_2 равна величине тока I (§ 42):

$$I = I_1 + I_2. \quad (3,8)$$

Соотношение величин токов I_1 и I_2 зависит от сопротивлений R_1 и R_2 . Действительно, на основании закона Ома напряжение на концах первого проводника равно:

$$U_1 = I_1 \cdot R_1,$$

а на концах второго проводника:

$$U_2 = I_2 \cdot R_2.$$

Но обе эти величины равны друг другу, так как каждая из них есть напряжение между одними и теми же точками a и b . Итак, $U_1 = U_2$, т. е.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_2}} = \frac{k_1}{k_2}. \quad (3,9)$$

При параллельном соединении силы токов в отдельных проводниках обратно пропорциональны их сопротивлениям или прямо пропорциональны их электропроводностям.

Для нахождения полного сопротивления участка ab воспользуемся соотношением (3,8):

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Если обозначить через R полное сопротивление участка ab , то по закону Ома

$$I = \frac{U}{R}.$$

Сравнивая две последние формулы, находим:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Вводя вместо сопротивлений обоих участков их проводимости (§ 47), эту формулу можем записать в следующем виде:

$$k = k_1 + k_2.$$

Если параллельно соединены не 2, а 3, 4 и, вообще, n проводников, то подобным же образом можно получить соотношение:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (3,10)$$

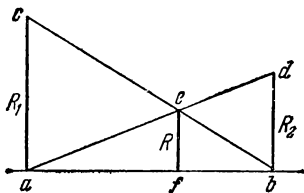
или

$$k = k_1 + k_2 + \dots + k_n. \quad (3,10')$$

Проводимость участка цепи, составленного из параллельно соединенных проводников, равна сумме проводимостей отдельных проводников. Или иначе: *при параллельном соединении проводников складываются их проводимости.*

У п р а ж н е н и я. 50.1. Существует следующий удобный способ графического расчета сопротивления двух параллельно соединенных проводников: если из некоторой точки a прямой ab (рис. 87) восставить перпендикуляр ac , длина которого в некотором масштабе равна сопротивлению одного проводника R_1 , а из другой (произвольной) точки b восставить перпендикуляр bd длиной R_2 , то расстояние R точки пересечения e прямых ad и cb от прямой ab будет равно сопротивлению обоих параллельно соединенных проводников:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$



Докажите это.

50.2. В квартире включены две лампочки с сопротивлением по 120 *ом* каждая и электроплитка с сопротивлением 30 *ом*. Каково общее сопротивление квартирной сети, если пренебречь сопротивлением проводов? Какой ток расходуется на питание этой сети, если напряжение в сети 120 *в*? Начертите схему включения.

Рис. 87. К упражнению 50.1.

§ 51. Реостаты. Пользуясь правилами, изложенными в § 50, мы можем с удобством менять сопротивление цепи, присоединяя к ней последовательно или параллельно некоторые добавочные сопротивления. Для этой цели часто применяют специальные приборы — **реостаты**, представляющие собой определенные сопротивления, величину

которых обычно можно изменять. На рис. 88 изображены устройство и внешний вид рычажного реостата. Он представляет собой ряд соединенных между собой проволочных спиралей, изготовляемых из сплавов с высоким удельным сопротивлением (нихром, константан, реотан и др.). Места соединения спиралей подведены к металлическим контактам 0, 1, 2..., по которым перемещается конец подвижного металлического рычага С. Переставляя рычаг

на разные контакты, можно вводить в цепь последовательно большее или меньшее число спиралей и этим изменять сопротивление цепи.

Для более плавного изменения сопротивления служат реостаты со скользящим контактом (рис. 89).

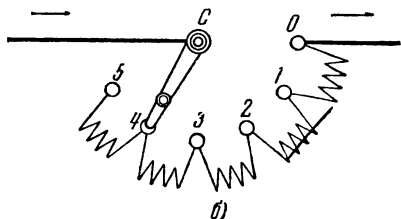
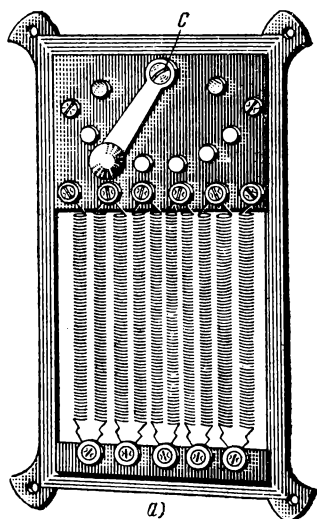


Рис. 88. Рычажный реостат. а) Внешний вид. б) Схема устройства: 0, 1, 2, 3, 4, 5 — концы секций сопротивления; С — рукоятка.

Перемещая движок К, можно включать в цепь большую или меньшую часть обмотки реостата.

При применении реостата надо обращать внимание на то, чтобы он не нагревался слишком сильно. Допустимое нагревание не должно превышать 70° — 80° над окружающей температурой, а обычно стремятся к тому, чтобы нагревание было значительно ниже. Для того чтобы реостат не слишком нагревался, необходимо, с одной стороны, его хорошо охлаждать, а с другой, заботиться, чтобы в реостате не выделялось слишком много тепла. При сильных токах поэтому применяют реостаты из толстой проволоки. Для лучшего охлаждения окружающим воздухом реостаты никогда не

навивают в несколько слоев. Нередко для сильных токов применяют реостаты, проволока которых, свитая в спираль, натянута на рамке и, следовательно, хорошо охлаждается воздухом со всех сторон. Иногда с этой целью применяют не круглую проволоку, а плоскую ленту, которая при той же площади сечения имеет большую поверхность соприкосновения с воздухом и поэтому лучше охлаждается.

§ 52. Распределение напряжения в цепи. «Потеря» в проводах. Всякая цепь состоит обычно из каких-либо приборов (например, лампочек накаливания, нагревательных приборов, электролитических ванн и т. д.) и подводящих проводов. Все эти приборы и провода обладают известным

сопротивлением, и к ним применим закон Ома (§ 46). Поэтому между концами любого участка цепи, который представляют эти приборы или провода, имеется соответствующее напряжение. Если в цепи идет ток I и сопротивления последовательно соединенных участков цепи равны R_1, R_2, R_3, \dots , то между концами каждого участка имеются соответственно напряжения U_1, U_2, U_3, \dots , определяемые по формуле (3,3'): $U_1 = R_1 \cdot I$; $U_2 = R_2 \cdot I$ и т. д. Сумма этих напряжений представляет собой полное напряжение U , приложенное к концам всей цепи: $U = U_1 + U_2 + \dots = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + \dots$. Таким образом, **распределение напряжения между отдельными последовательно соединенными участками цепи зависит только от соотношения сопротивлений этих участков:**

$$U_1 : U_2 : U_3 : \dots = R_1 : R_2 : R_3 : \dots$$

Пусть, например, динамомашина электростанции создает на вводах, т. е. на концах проводов, введенных в квартиру,

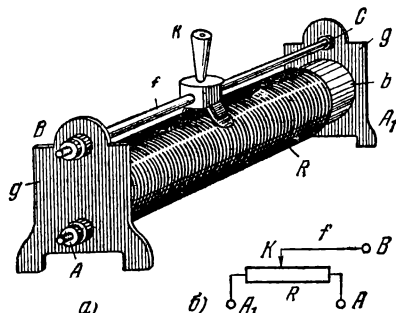


Рис. 89. Реостат со скользящим контактом.

а) Внешний вид: R — обмотка реостата, навитая на фарфоровый цилиндр b ; K — скользящий контакт, соединяющий произвольную точку обмотки со стержнем f и с зажимом B . Фарфоровый цилиндр реостата b укреплен на металлических щечках g . На них же укреплены стержень f на изолирующих прокладках в местах B (где зажим) и C . Концы обмотки реостата выведены к зажимам A и A_1 . б) Схематическое изображение и схема включения реостата.

напряжение U вольт (для Москвы $U=127$ в). От вводов провода ведут к лампочке. Сопротивление проводов пусть равно r , сопротивление лампочки R , а величина тока, накаливающего лампочку, равна I . В таком случае напряжение, приходящееся на лампочку, $U_{\text{лам}}=I \cdot R$, а напряжение, приходящееся на подводящие провода, $U_{\text{пров}}=I \cdot r$. Так как $U=U_{\text{лам}}+U_{\text{пров}}$, то $U_{\text{лам}}=U-U_{\text{пров}}$. Другими словами, чем больше напряжение $U_{\text{пров}}$, приходящееся на провода, тем меньшее напряжение остается на долю лампочки. Поэтому напряжение на проводах называется **потерянным**. Оно тем больше, чем больше сопротивление проводов и чем больше ток, идущий по линии. Чтобы напряжение, потерянное в линии, не превышало допустимого предела, скажем, U' в, сопротивление линии не должно превышать величины $r'=\frac{U'}{I'}$, где U' — допустимая потеря, а I' — величина тока. Чем больше ток в линии, тем меньше должно быть ее сопротивление, а, значит, тем толще должны быть провода. Этим объясняется, что для проводки сетей различного назначения мы применяем совсем различные проводники: для электрических звонков и телефонов (слабые токи) вполне пригодны тонкие провода диаметром в несколько десятых миллиметра, а для промышленных сетей, питающих крупные электромоторы (сильные токи), необходимы медные шины и кабели, сечением в несколько квадратных сантиметров. Особенно велики могут быть потери в очень длинных линиях, например в линиях электропередачи от гидроэлектростанций к отдаленным районам.

У п р а ж н е н и я. 52.1. Для нормального свечения автомобильной лампочки напряжение на концах ее нити должно равняться 12 в. Сколько таких лампочек нужно взять и как их нужно соединить для питания от осветительной сети, имеющей напряжение 120 в? Начертите схему соединения лампочек.

52.2. В осветительную сеть с напряжением 120 в включены лампа с сопротивлением 120 ом и амперметр, измеряющий ток, текущий через лампу. Чему равно напряжение на концах нити лампы, если сопротивление амперметра и соединительных проводов равно 3 ом?

52.3. В осветительную сеть с напряжением 120 в включены электрическая печка и лампочка накаливания, соединенные последовательно. Сопротивление печки равно 20 ом, сопротивление лампочки — 240 ом. Какое напряжение будет на печке и какое на лампочке? Начертите схему включения.

52.4. Для освещения елок в продаже имеются гирлянды из нескольких последовательно соединенных маленьких лампочек, каждая из которых рассчитана на напряжение 6 или 8 в. Ответьте на

следующие вопросы: а) Сколько 6-вольтовых и сколько 8-вольтовых ламп нужно взять для гирлянды, рассчитанной на напряжение в 127 в? б) Если одна из ламп гирлянды перегорит, будут ли гореть остальные? Что нужно сделать в этом случае, чтобы исправить гирлянду? в) Почему в инструкции к пользованию гирляндами сказано, что этим способом нельзя починять гирлянду, если перегорело больше, чем 3—4 лампы.

52.5. Реостат со скользящим контактом иногда употребляют как **потенциометр** (делитель напряжения). Концы обмотки (A и A' на рис. 89) присоединяют к источнику напряжения, а в рабочей цепи пользуются напряжением между зажимами A и B . Объясните смысл такого включения прибора. Найдите напряжение между A и B при напряжении в сети 120 в, если движок расположен: а) посередине обмотки; б) ближе к A на расстоянии от A , равном 0,1 длины AA_1 , в) ближе к A_1 , на расстоянии от A , равном 0,8 длины AA_1 . Обмотка намотана равномерно.

52.6. Длина медных проводов линии электропередачи, соединяющей электростанцию с квартирой, равна 2 км, а их сечение — 15 мм². Чему равно напряжение на лампочках в этой квартире после включения электрического утюга, потребляющего 3 а, если до его включения оно было равно 110 в?

52.7. Некоторая линия электропередачи имеет длину (считая оба провода) 1 км и сечение проводов 10 мм². Провода — медные. Вычислите напряжение, теряемое в линии, если ток в ней 5 а.

52.8. Почему при включении в квартире каких-нибудь приборов, потребляющих большой ток (утюг, например), горящие лампочки внезапно уменьшают свою яркость? Обратите внимание, что особенно сильно падение яркости в первый момент; затем яркость несколько возрастает, хотя и остается меньше, чем до включения утюга. Объясните явление.

52.9. Падение яркости горячей лампочки можно наблюдать, если включить где-нибудь в квартире другую очень сильную лампу, потребляющую ток в несколько ампер. И в этом случае наблюдается особо резкое падение яркости в первый момент. Если взять в качестве второй мощной лампочки старинную лампочку с угольным волоском вместо металлического, то особо резкого спада яркости в первый момент при этом не наблюдается. Почему?

§ 53. Вольтметр. При помощи гальванометра можно измерить не только величину тока, но и напряжение и, ибо, согласно закону Ома, эти величины пропорциональны друг другу. Полезно заметить, что если две величины пропорциональны друг другу, то обе они могут быть измерены при помощи одного и того же прибора, шкалу которого надо только подвергнуть соответствующей градуировке. Так, например, счетчик такси, собственно говоря, отмеряет пройденное расстояние, и его следовало бы градуировать в километрах. Но так как плата за проезд исчисляется пропорционально расстоянию, то шкалу счетчика можно проградуировать и непосредственно в рублях и копейках так, чтобы она сразу показывала стоимость проезда. Точно так же и шкалу гальванометра можно

проградуировать так, чтобы отсчитывать по ней непосредственно либо величину тока (в амперах), протекающего по гальванометру, либо напряжение (разность потенциалов) в вольтах между зажимами гальванометра. Гальванометр, градуированный на величину тока, называют, как мы уже упоминали, а м п е р м е т р о м, а градуированный на напряжение — в о л ь т м е т р о м.

Действительно, если через гальванометр течет ток, равный I амперам, то между входом и выходом из гальванометра, т. е. между его зажимами, должно существовать некоторое напряжение U . Пусть так называемое «внутреннее» сопротивление гальванометра, т. е. сопротивление тех частей его, по которым идет ток, равняется R . (Для магнитных гальванометров это — сопротивление рамки и подводящих проводов, для теплового — сопротивление нагревающейся нити и подводящих проводов и т. д.) Согласно закону Ома имеем: $U = I \cdot R$. Таким образом, каждому значению величины тока I для данного гальванометра (т. е. имеющего определенное сопротивление R) соответствует определенное значение напряжения U между его зажимами. Поэтому против соответствующего положения

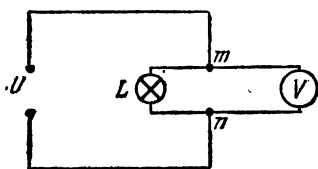


Рис. 90. Чтобы измерить напряжение на лампочке L , нужно присоединить вольтметр V параллельно лампочке. U — источник тока; m и n — зажимы.

стрелки можно написать или величину тока I , или величину напряжения U , т. е. проградуировать наш прибор как амперметр или вольтметр.

Пользуясь проградуированным вольтметром, мы можем измерить разность потенциалов между любыми точками какой-либо цепи. Пусть, например, требуется определить разность потенциалов между вводами, ведущими к концам волоска лампочки, которая накаливается

каким-либо источником тока (рис. 90). Присоединим вводы лампочки L к зажимам m и n нашего вольтметра V , как показано на рисунке, т. е. подключим вольтметр параллельно лампочке. Ток от источника будет теперь разветвляться, и часть его пойдет, как и прежде, через лампочку, а часть — через вольтметр. По показаниям вольтметра мы можем судить о разности потенциалов между точками m и n , а следовательно, и между вво-

дами, ведущими к волоску лампы, которые мы присоединили к m и n .

Подчеркнем еще раз, что для измерения величины тока в цепи, т. е. для использования гальванометра в качестве амперметра, его нужно включать в цепь последовательно, чтобы гальванометр служил одним из участков простой неразветвленной цепи (§ 44), т. е. чтобы через гальванометр протекал ток такой же величины, как и через любую другую часть этой цепи. Для измерения же напряжения (разности потенциалов) между точками m и n нашей цепи, т. е. для использования гальванометра в качестве вольтметра, его нужно приключать параллельно к точкам m и n , т. е. так, чтобы между зажимами его было такое же напряжение, как и между точками m и n .

Упражнение. 53.1. Можно ли вместо вольтметра пользоваться электрометром для измерения напряжения? Если можно, то как нужно его включать и как градуировать?

§ 54. Каким должно быть сопротивление вольтметра и амперметра? Всякий вольтметр включается параллельно тому участку цепи, напряжение на котором мы хотим измерить (рис. 90), и поэтому на него ответвляется некоторый ток от основной цепи. При его включении и ток и напряжение в основной цепи несколько меняются, так как теперь мы имеем уже другую цепь проводников, состоящую из прежних проводников и вольтметра. Присоединив, например, вольтметр с сопротивлением R_v параллельно лампочке, сопротивление которой R_l , мы найдем по формуле (3,10) их общее сопротивление R :

$$R = \frac{R_v \cdot R_l}{R_v + R_l} = \frac{R_l}{1 + \frac{R_l}{R_v}}. \quad (3,11)$$

Чем больше сопротивление вольтметра R_v по сравнению с сопротивлением лампочки R_l , тем меньше отличается общее их сопротивление R от R_l и тем меньше искажение, вносимое вольтметром. Мы видим, что *вольтметр должен иметь большое сопротивление*. Для этого последовательно с его измерительной частью (рамкой, нагревающейся нитью и т. д.) нередко включают катушку дополнительного сопротивления в несколько тысяч ом (рис. 91).

В противоположность вольтметру, амперметр всегда включают в цепь последовательно (§ 44). Если сопротивление амперметра равно R_A , а сопротивление цепи $R_{\text{ц}}$, то при включении амперметра сопротивление цепи становится равным

$$R = R_{\text{ц}} + R_A = R_{\text{ц}} \left(1 + \frac{R_A}{R_{\text{ц}}} \right). \quad (3,12)$$

Для того чтобы амперметр заметно не менял общего сопротивления цепи, собственное его сопротивление, как следует из формулы (3,12), должно быть малым по сравнению с сопротивлением цепи. Поэтому *амперметры делают с очень малым сопротивлением* (несколько десятых или сотых ома).

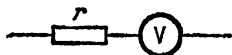


Рис. 91. К вольтметру V присоединяется последовательно дополнительное сопротивление r в несколько тысяч ом.

У п р а ж н е н и я. 54.1. Сопротивление некоторого технического амперметра равно 0,1 ом. Чему равно напряжение на амперметре, если он показывает ток силой 10 а?

54.2. Сопротивление некоторого технического вольтметра равно 12 000 ом. Какой ток проходит через вольтметр, если он показывает 120 в?

54.3. Вольтметр со шкалой 0—120 в имеет сопротивление 12 000 ом.
а) Какое сопротивление и каким способом нужно приключить к этому вольтметру, чтобы им можно было измерять напряжение до 240 в? Начертите схему включения. б) Изменится ли чувствительность вольтметра в предыдущей задаче, если указанное сопротивление включить параллельно вольтметру?

54.4. Вольтметр, присоединенный к горячей лампочке накаливания, показывает 120 в, а амперметр, измеряющий силу тока в лампочке, — 0,5 а. Чему равно сопротивление лампочки? Начертите схему включения вольтметра и амперметра.

§ 55. Шунтирование измерительных приборов. Важным приемом применения последовательного и параллельного соединения проводов являются различные схемы включения электроизмерительных приборов. Допустим, что имеется некоторый амперметр, рассчитанный на максимальный ток $I_{\text{макс}}$, а требуется измерить большую величину тока. В этом случае амперметр включают по схеме рис. 92, присоединяя параллельно к нему малое сопротивление r (обычно называемое «ш у н т о м»¹⁾), по которому направится боль-

¹⁾ От английского «шунт» — добавочный путь.

шая часть тока. Обозначим сопротивление амперметра через R , и пусть R в n раз больше, чем r , т. е. $\frac{R}{r} = n$. Пусть, далее, силы тока в цепи, амперметре и в шунте равны соответственно I , I_A и $I_{ш}$. Тогда согласно формуле (3,9)

$$\frac{I_{ш}}{I_A} = \frac{R}{r} = n \text{ или } I_{ш} = I_A \cdot n.$$

Полный ток I в цепи равен

$$I = I_A + I_{ш} = I_A + I_A \cdot n = I_A(n + 1)$$

или

$$I_A = I \cdot \frac{1}{n + 1}. \quad (3,13)$$

Таким образом, величина тока в амперметре I_A в $n+1$ раз меньше, чем величина тока I в главной цепи. Следовательно, благодаря шунту, мы можем измерить с помощью нашего прибора токи, в $n+1$ раз больше, чем те, на которые он рассчитан. При этом, однако, прибор регистрирует только $\frac{1}{n+1}$ часть измеряемого тока, т. е. чувствительность его уменьшена в $n+1$ раз. Цена каждого деления ампер-

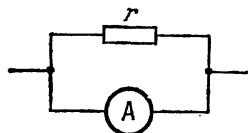


Рис. 92. Схема шунтирования амперметра A добавочным малым сопротивлением r , включенным параллельно амперметру.

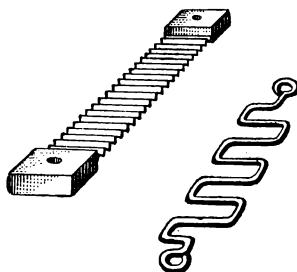


Рис. 93. Различные шунты.

метра при этом увеличивается в $n+1$ раз. Если например, без шунта определенное отклонение стрелки амперметра соответствовало току в 1 а и сопротивление шунта в 4 раза меньше, чем сопротивление амперметра, то при наличии шунта то же отклонение соответствует току в цепи, равному уже 5 а . Обычно подбирают шунты так, чтобы цена деления увеличивалась в 10, 100, 1000 раз. Для этого сопротивле-

ние шунта должно составлять $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$, ... от сопротивления амперметра. Вообще, если мы хотим уменьшить чувствительность прибора в n раз, то мы должны взять шунт с сопротивлением

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{n-1}. \quad (3,14)$$

Параллельное присоединение шунта к измерительному прибору с целью изменения его чувствительности называют **шунтированием**. На рис. 93 показаны различные шунты, употребляющиеся на практике.

У п р а ж н е н и е. 55.1. При помощи амперметра, рассчитанного на измерение максимального тока 10 а и имеющего сопротивление $0,1\text{ ом}$, желают измерять токи до 100 а . Какое сопротивление должен иметь шунт?

Г Л А В А IV

ТЕПЛОВЫЕ ДЕЙСТВИЯ ТОКА

§ 56. Нагревание током. Закон Джоуля — Ленца. Исследуя на опыте нагревание проводников током, Ленц ¹⁾ и Джоуль ²⁾ установили, что количество тепла, выделяющееся в проводнике при прохождении через него электрического тока, прямо пропорционально сопротивлению R проводника, квадрату силы тока I и времени t , в течение которого поддерживается ток в проводнике. Этот закон, носящий название закона Джоуля — Ленца, можно выразить следующей формулой:

$$Q = c \cdot R \cdot I^2 \cdot t, \quad (4,1)$$

где Q — выделившееся количество тепла, а c — коэффициент пропорциональности. Численное значение этого коэффициента зависит от выбора единиц, в которых производятся измерения. Если количество тепла измерять в калориях, время — в секундах, сопротивление — в омах, а силу тока — в амперах, то коэффициент $c=0,24$. Это означает, что ток в 1 а выделяет в проводнике, имеющем сопротивление 1 ом, за 1 сек количество тепла, равное 0,24 кал. Таким образом:

$$Q = 0,24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t \text{ кал.} \quad (4,1')$$

Измерения, приводящие к закону Джоуля — Ленца, можно выполнить, поместив в калориметр (рис. 94) проводник с известным сопротивлением R и пропуская через него

¹⁾ Эмилий Христианович Ленц (1804—1865) — член Российской Академии наук.

²⁾ Джеймс Джоуль (1818—1889) — английский физик.

ток определенной величины I в течение известного времени t . Количество выделяющегося при этом тепла Q определим, составив уравнение теплового баланса, как это принято при калориметрических измерениях (т. I, «Теплота»). Производя опыты при различных значениях R , I и t , мы получим зависимость, выраженную законом Джоуля — Ленца. Пользуясь законом Ома, мы можем выразить величину

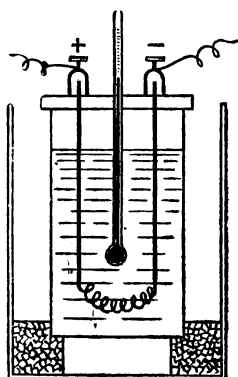


Рис. 94. Калориметр для проверки закона Джоуля — Ленца.

тока I через напряжение U на концах проводника и его сопротивление R . Вставляя $I = \frac{U}{R}$ в формулу (4,1), найдем:

$$Q = 0,24 \cdot \frac{U^2}{R} \cdot t \text{ калорий.} \quad (4,2)$$

Формулы (4,1) и (4,2) позволяют рассчитать количество тепла, выделяющегося в отдельных проводниках, соединенных последовательно и параллельно. При последовательном соединении во всех проводниках течет ток одной и той же величины (§ 50). Поэтому для сравнения количества тепла, выделяющегося в отдельных проводниках, удобнее пользоваться формулой (4,1). Она показывает, что при последовательном соединении нескольких проводников в каждом выделяется количество тепла, прямо пропорциональное сопротивлению проводника. При параллельном соединении ток в проводниках различен, но напряжение на их концах (в точках разветвления) имеет одно и то же значение (§ 50). Поэтому удобнее пользоваться формулой (4,2). Она показывает, что при параллельном соединении в каждом проводнике выделяется количество тепла, обратно пропорциональное сопротивлению проводника, т. е. прямо пропорциональное его проводимости.

§ 57. Работа, совершаемая электрическим током. При прохождении электрического тока через цепь могут, как мы видели в § 40, производиться различные действия. Кроме нагревания проводников, могут иметь место химические изменения в них (в проводниках второго класса), а также перемещения магнит-

ной стрелки ¹⁾; при таком перемещении магнита электрический ток совершает механическую работу.

В опытах Джоуля и Ленца ток проходил через неподвижные металлические проводники. Поэтому единственным результатом работы тока было нагревание этих проводников и, следовательно, по закону сохранения энергии вся работа, совершенная током, превращалась в тепло.

Работу, совершаемую электрическими силами при прохождении тока через участок цепи, нетрудно вычислить. Если напряжение (разность потенциалов) на концах участка равно U вольт, то при переносе заряда в 1 кулон совершается работа в U джоулей (§ 21), а при переносе заряда в q кулонов работа в q раз больше, т. е. $q \cdot U$ джоулей. Если q кулонов будет перенесено при прохождении тока в I ампер в течение t секунд, т. е. $q = I \cdot t$ кулонов, то совершится работа $A = U \cdot I \cdot t$ джоулей. Если мы желаем выразить эту работу в калориях, то надо вспомнить, что 1 кал равна 4,2 дж или что 1 дж равен 0,24 кал. Итак, найдем, что работа, совершенная током, равна

$$A = U \cdot I \cdot t \text{ джоулей} = 0,24 U \cdot I \cdot t \text{ калорий.} \quad (4,3)$$

В рассматриваемом случае вся эта работа переходит в тепло, т. е. $A = Q$. Следовательно, $Q = 0,24 I \cdot U \cdot t$ калорий и, в силу закона Ома ($U = R \cdot I$), имеем

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t.$$

Таким образом, мы получили закон Джоуля — Ленца теоретическим путем, вычислив работу электрического тока.

Еще раз обращаем внимание на то, что *работа тока полностью переходит в тепло только в случае неподвижных проводников первого класса*. Если проходящий ток, кроме нагревания, совершает механическую работу (мотор), то работа, совершенная током ($A = 0,24 \cdot U \cdot I \cdot t$ калорий), лишь частью переходит в тепло Q , частью же расходуется на совершение внешней работы (мотор). В этих случаях A больше Q , и связь между U , R и I выражается более сложно, чем в случае неподвижных металлических проводов (надо, например, учитывать влияние электромагнитной индукции в движущихся

¹⁾ Или равноценного ей проводника, по которому течет ток (см. дальше § 115).

проводах, см. далее гл. XV), причем $R \cdot I$ составляет лишь часть всей величины U . Таким образом, формула $Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t$, выражающая закон Джоуля — Ленца, пригодна для вычисления тепла, выделенного током, во всех случаях. Применение же выражения $0,24 \cdot U \cdot I \cdot t$, дающего работу тока, для оценки выделяющегося в проводах тепла возможно только в тех случаях, когда вся эта работа переходит в тепло, т. е. когда на рассматриваемом участке цепи происходит нагревание, но не работают моторы и не идут иные процессы, сопровождающиеся поглощением или выделением работы.

§ 58. Мощность электрического тока. Зная работу, совершаемую током за некоторый промежуток времени, можно рассчитать и мощность тока, под которой, так же как и в механике (т. I, «Механика»), понимают работу, совершаемую за единицу времени. Из формулы, определяющей работу постоянного тока $A = U \cdot I \cdot t$, следует, что мощность его P равна

$$P = \frac{A}{t} = U \cdot I. \quad (4,4)$$

Таким образом, *мощность постоянного тока на любом участке цепи выражается произведением силы тока на напряжение между концами участка.*

Нередко говорят о мощности электрического тока, потребляемой в сети, желая этим выразить мысль, что при помощи электрического тока («за счет тока») совершается работа моторов, нагреваются плитки и т. д. В соответствии с этим на приборах нередко обозначается их мощность, т. е. мощность тока, необходимая для нормального действия этих приборов. Так, например, 220-вольтовая электроплитка мощностью в 500 ватт есть плитка, для нормальной работы которой требуется ток около 2,3 ампера при напряжении 220 вольт (так как $2,3 \cdot 220 \approx 500$).

Если в формуле (4,4) ток выражен в амперах, а напряжение в вольтах, то мощность получится в джоулях в секунду (*дж/сек*), т. е. в ваттах (т. I, «Механика»). На практике употребляют также более крупные единицы мощности: 1 гектоватт = 100 ватт и 1 киловатт = 1000 ватт. Таким образом, ватт есть мощность, выделяемая током в 1 а в проводнике, между концами которого поддерживается напряжение в 1 в. Аналогично этому и для единицы работы

иногда вместо джоуля говорят: ватт-секунда. В практической электротехнике находят себе применение и более крупные единицы работы: 1 гектоватт-час равен работе, совершаемой током мощностью в 1 гектоватт в течение часа, или 1 киловатт-час равен работе, совершаемой током мощностью в 1 киловатт в течение одного часа (обозначается *квтч*). Нетрудно сосчитать, что $1 \text{ квтч} = 3\,600\,000 \text{ дж}$. В киловатт-часах обычно выражают энергию, на которую электростанции подают счета потребителям электроэнергии. Конечно, такой единицей работы можно пользоваться не только в электротехнике, но и для оценки работы любой машины, например, парового или автомобильного двигателя.

У п р а ж н е н и я. 58.1. Какое количество тепла выделяет 25-ваттная лампочка за каждую секунду?

58.2. Электрические станции Москвы отпускают энергию по цене 4 коп. за киловатт-час. Во что обходится 1 час горения электрической лампочки, потребляющей 0,2 а при напряжении 127 в?

58.3. Определите сопротивление электрической лампочки, рассчитанной на напряжение 127 в и потребляющей мощность 25 вт.

58.4. Две электрические 127-вольтовые лампочки расходуют соответственно мощности 15 и 100 вт. Какая из лампочек потребляет больший ток? У какой из лампочек больше сопротивление? Определите для каждой лампочки величину тока и сопротивление (когда лампочка накалена).

58.5. Освещение некоторой квартиры требует тока 5 а при 127 в. Какая мощность в киловаттах при этом расходуется?

58.6. Объясните, почему провода, ведущие ток к электрической лампочке, практически не нагреваются, в то время как нить лампочки раскаляется добела?

58.7. Чередующиеся куски медной, железной и никелиновой проволоки одинакового диаметра спаяны между собой на стык и включены в цепь тока. Какие проволоки будут разогреваться сильнее? Какие из этих проволок будут нагреваться сильнее, если они включены параллельно?

58.8. Можно ли включить в сеть с напряжением 220 в последовательно две лампы одинаковой мощности, рассчитанные на 110 в? Можно ли так же включить две 110-вольтовые лампы разной мощности, например лампы в 25 вт и 100 вт? Каково будет при этом напряжение на каждой из ламп и что произойдет?

58.9. Для освещения елки от сети в 220 в хотят использовать гирлянды маленьких лампочек, рассчитанные на напряжение в 110 в, включив их последовательно. Можно ли сделать это а) если гирлянды одинаковы, б) если одна гирлянда составлена из 6-вольтовых, а другая из 8-вольтовых ламп одинаковой мощности? в) если гирлянды составлены из 6- и 8-вольтовых ламп различной мощности, подобранных так, чтобы общая мощность, поглощаемая каждой из гирлянд, была одной и той же?

58.10. Молния — это электрический ток, проходящий в течение примерно $0,001 \text{ сек}$ (10^{-3} сек) между двумя облаками или облаком и Землей. Разность потенциалов на концах этих тел достигает миллиарда (10^9) вольт, а ток в среднем имеет величину $20\,000$ ($2 \cdot 10^4$) ампер. а)

Подсчитайте, во что обошлась бы одна молния по ценам МОГЭС (4 коп. за 1 *квтч*). б) Учитывая, что в среднем на поверхность Земли падает 100 молний в секунду, подсчитайте общий запас энергии, расходуемой на образование молний за год.

58.11. Во сколько раз повышение температуры при прохождении электрического тока больше у железных проводов, чем у медных того же сечения, если через них проходит ток одинаковой величины? Рассмотрите случай, когда провода хорошо изолированы, так что теплоотдачей их можно пренебречь, и ток сравнительно невелик и проходит в течение короткого времени, так что оба провода нагреваются слабо и температурными коэффициентами их проводимостей и теплоемкостей также можно пренебречь. Теплоемкость меди 0,09, теплоемкость железа 0,11, плотность меди 8,9 г/см³, плотность железа 7,9 г/см³. Воспользуйтесь также таблицей 2 (стр. 129).

§ 59. Контактная сварка. Тепловое действие тока играет большую роль в современной технике. Рассмотрим некоторые важные примеры его применения.

Если сопротивление какого-либо участка цепи значительно больше, чем сопротивление всех остальных участков, то здесь выделяется практически все джоулево тепло. Такой случай осуществляется в лампочках накаливания и в

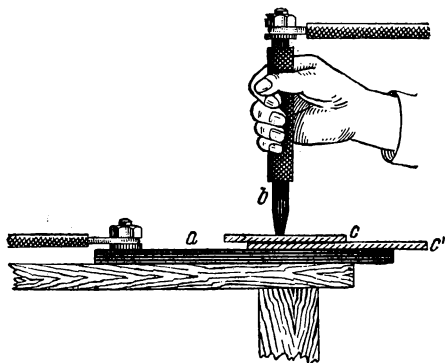


Рис. 95. Контактная сварка.

нагревательных приборах, сопротивление которых значительно больше, чем сопротивление подводящих проводов. Таким же распределением сопротивлений пользуются при так называемой **к о н т а к т н о й э л е к т р о с в а р к е**, применяемой для металлов со значительным удельным сопротивлением (никель, тантал, молибден и др.). Схема такой сварки изображена на рис. 95, где *a* — толстая медная пластина, *b* — медный заостренный стержень большого

поперечного сечения, c, c' — свариваемые детали, например две никелевые пластины, слегка зажатые между медными электродами. В этом случае все сопротивление участка практически как раз сосредоточено в месте контакта свариваемых деталей: во-первых, материал этих деталей имеет большое удельное сопротивление, и, во-вторых, место соприкосновения (контакт) представляет большое сопротивление, ибо касание всегда происходит в относительно небольших участках (отдельных точках) поверхности. При больших токах (употребляют сотни и тысячи ампер) детали раскаляются добела и свариваются, в то время как медные электроды почти не нагреваются.

У п р а ж н е н и е. 59.1. Можно ли при помощи контактной сварки сварить медные или серебряные детали?

§ 60. Электрические нагревательные приборы. Электрические печи. На рис. 96 изображена электрическая плитка, широко употребляющаяся в домашнем обиходе. Она состоит из огнеупорной керамической пластинки с каналом, в который помещена нагревающая спираль. Последняя делается

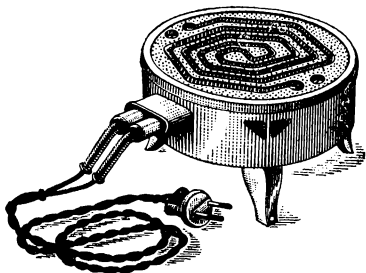


Рис. 96. Электрическая плитка.



Рис. 97. Электрический чайник.

из материала с большим удельным сопротивлением и высокой температурой плавления, обычно из нихрома или фехрала¹⁾. Концы спирали подведены к штепсельным контактам, которые при помощи шнура включают в осветительную цепь (штепсель).

¹⁾ Н и х р о м — сплав никеля и хрома. Ф е х р а л ь — сплав железа, хрома и алюминия, или хромоникелевая сталь. Эти сплавы отличаются тем, что их удельное сопротивление велико и почти не зависит от температуры. Кроме того, эти сплавы мало окисляются при высоких температурах.

На рис. 97 изображен электрический чайник. Он имеет в нижней части двойное дно, образующее полость,

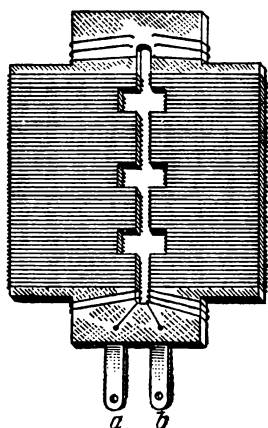


Рис. 98. Нагревательный элемент электрического прибора.

где находится «нагревательный элемент» или такая же плитка. Нагревательный элемент состоит обычно из слюдяной пластинки, обмотанной нагревающей проволокой (рис. 98). Нагревающая проволока изолируется от металлической коробки сверху тонкой слюдяной прокладкой, а снизу — толстым слоем асбеста, помещенным между дном коробки и нагревательным элементом. Концы обмотки, так же как и у плитки подведены к штепсельным контактам *a* и *b*. Подобным же образом устраиваются и другие электронагревательные приборы: электрические утюги, электрические паяльники и т. п.

На рис. 99 показано устройство лабораторной трубчатой платиновой печи:

Для создания высоких температур служат электрические печи. а — фарфоровая трубка, обмотан-

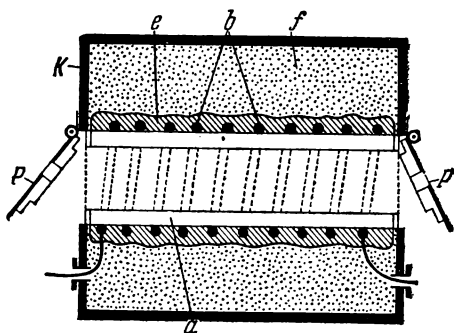


Рис. 99. Разрез лабораторной трубчатой платиновой печи для получения температуры до 1300°C .

ная платиновой проволокой или лентой *b*; проволока покрыта слоем огнеупорной массы *e* (каолин с каким-либо связующим веществом) и смонтирована внутри широкого металли-

ческого кожуха K . Все пространство между кожухом и фарфоровой трубой заполнено для лучшей тепловой изоляции каким-нибудь материалом f с малой теплопроводностью, благодаря чему поток тепла от ленты направляется главным образом к трубе a , внутри которой при закрытых крышках p, p получается температура до 1300°C . Применяя вместо платины более тугоплавкие металлы (молибден), в печах такого типа удается повысить температуру до 2500°C .

У п р а ж н е н и я. 60.1. Сопротивление обмотки электрического чайника, рассчитанного на 127 в, равно 30 ом. Сколько времени потребуется для нагревания в нем 500 г воды от 10 до 100°C , если половина всего тепла уходит вследствие теплопередачи в окружающее пространство?

60.2. Электрический утюг, рассчитанный на напряжение 127 в, потребляет ток 3 а. Во сколько копеек обходится 1 час работы утюга по ценам МОГЭС (4 коп. за 1 квтч)?

60.3. Сопротивление электрического утюга, работающего от осветительной сети 127 в, равно 40 ом. Какое количество тепла выделяется в утюге в 1 сек?

60.4. Плитку мощностью в 800 вт, рассчитанную на напряжение 220 в, включают в сеть напряжением 110 в. Какую мощность плитка будет поглощать при этом из сети? Будет ли она поглощать нормальную мощность (800 вт), если спираль ее разделить на две равные части и включить их в сеть параллельно, как показано на рис. 100? Какую мощность будет брать эта плитка, если разделить спираль на такие части, чтобы сопротивление одной из них, скажем AD на рис. 100, составляло $\frac{1}{3}$ общего сопротивления всей спирали AC ?

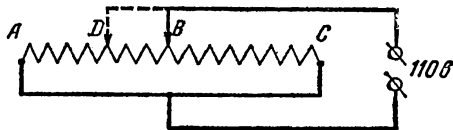


Рис. 100. К упражнению 60.4.

60.5. Подсчитайте: а) мощность, расходуемую в вашей квартире, когда включены все электрические лампочки и электрическая плитка или утюг; б) израсходованную электрическую энергию, если эти приборы оставались включенными в течение 3 часов.

§ 61. Понятие о расчете нагревательных приборов. Для правильной работы любого электронагревательного прибора его обмотка должна быть правильно рассчитана.

Рассмотрим, чем определяется температура, которую принимает проволока под действием тока. Выделяющееся джоулево тепло не остается внутри проволоки, но уходит вследствие теплопередачи (теплопроводности, конвекции и излучения) через боковую поверхность проволоки и ее концы. Количество тепла, ушедшее вследствие теплопередачи, тем больше, чем больше разность температур проволоки и окружающей среды и чем лучше отводит тепло окружающая среда. Поэтому после включения тока температура проволоки постепенно повышается, пока через некоторое достаточно долгое время не делается постоянной, а именно такой, что количество джоулева тепла,

выделяющееся в проволоке за каждую секунду, в точности равно количеству тепла, уходящему вследствие теплопередачи. Чем хуже проводит тепло окружающая среда, тем выше эта окончательная температура, и, наоборот, чем лучше эта среда проводит тепло и чем лучше идет охлаждение, тем более низкую температуру принимает проволока под действием данного тока. Мы видим, что *температура проволоки при данном токе тем выше, чем лучше ее тепловая изоляция.*

Поэтому стараются как можно лучше изолировать нагревательный прибор со всех сторон, кроме той, где должна быть использована высокая температура нагревательного элемента.

Чем меньше диаметр проволоки, тем больше сопротивление каждого ее метра и, следовательно, тем больше по закону Джоуля — Ленца (формула (3,1')) количество тепла, выделяемого данным током на каждой единице длины проволоки. С другой стороны, чем тоньше проволока, тем меньше ее боковая поверхность и тем меньше теплопередача. Поэтому *температура проволоки при данном токе тем выше, чем меньше ее диаметр.*

Чтобы нагревательная обмотка не разрушалась слишком быстро, ее рабочая температура не должна превышать определенной величины, зависящей от материала проволоки. Это значит, что для проволоки из данного материала и данной толщины существует некоторый предельный ток, выше которого проволока начинает быстро разрушаться. Из сказанного следует, что этот ток (*максимальная нагрузка*) зависит также и от тепловой изоляции и значительно больше для проволоки, находящейся в воздухе и, следовательно, хорошо охлаждающейся благодаря конвекции, чем для проволоки, заключенной, например, в асбест. Ниже приведены некоторые численные данные, дающие предельную нагрузку в амперах для нихрома в обычных электронагревательных приборах и для никелина в реостатах (табл. 4).

Т а б л и ц а 4
Максимальная допустимая нагрузка обмотки
в нагревательных приборах и реостатах

Материал	Диаметр в мм	Сопротивление 1 м в ом	Максимальная допустимая нагрузка в а
Нихром (нагревательные приборы)	0,3	15	2
	0,5	5,5	4,5
Никелин (реостаты)	0,2	13,0	1,5
	0,6	1,41	6,0
	1,0	0,51	10,0
	1,5	0,23	23,0

Предельная нагрузка в реостатах, указанная на приборе, определяется не опасностью разрушения обмотки, а допустимой температурой, выше которой возникает пожарная опасность.

У п р а ж н е н и е 61.1. У электрической печи, потреблявшей 0,5 *квт* при 127 в, требуется сменить перегоревшую обмотку. Пользуясь таблицей 4, определите, сколько метров нихромовой проволоки следует взять для этого, если диаметр проволоки 0,5 мм.

§ 62. Лампы накаливания. Самым важным применением нагревательных действий тока является электрическое освещение.

Электрическое освещение было изобретено в 1872 г. А. Н. Лодыгиным ¹⁾ в Петербурге. Он укрепил между толстыми медными проволоками угольный стерженек и заключил его, вместе с концами проволок, внутрь стеклянного закрытого шарика (рис. 101). При пропускании тока стерженек раскалялся и давал свет. Лодыгиным были сделаны также попытки откачивать воздух из шара, хотя имевшиеся в его распоряжении насосы были весьма несовершенны.

В 1879 г. Эдисон ²⁾ построил более совершенную лампочку накаливания, заменив угольный стерженек обугленную нитью бамбука и улучшив технику откачки.

В 1890 г. Лодыгиным была изобретена лампа накаливания с металлической (вольфрамовой) нитью.

Чем выше температура нити, тем большая часть излучаемой ею энергии отдается в виде света. Однако в первоначальных лампочках накаливания температура нити не могла быть выше 1500—1600° С, и поэтому лампочки накаливания хотя и представляли огромный шаг вперед по сравнению с прежними керосиновыми и другими лампами, но были мало экономичны: они потребляли около 6 *вт* на каждую свечу силы света. Для повышения экономичности требовалось изыскать новые материалы для нити, которые позволили бы повысить температуру ее накала.

В настоящее время техника изготовления тонких однородных нитей из вольфрама (температура плавления

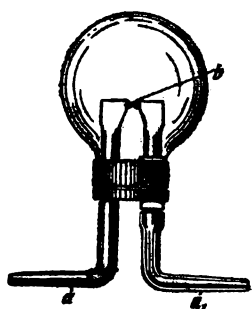


Рис. 101. Лампочка Лодыгина: *a* и *a*₁ — вводы, *b* — угольный стерженек.

¹⁾ Александр Николаевич Лодыгин (1847—1923) — русский электротехник и изобретатель.

²⁾ Томас Эдисон (1847—1931) — американский изобретатель.

3370° С) стоит очень высоко, и почти все современные лампы имеют вольфрамовые нити.

В 1913 г. Ленгмюр ¹⁾ предложил наполнять баллоны лампочек инертным газом (аргоном), присутствие которого замедляет испарение нити. Кроме того, Ленгмюр предложил свертывать нить в виде спирали, благодаря чему значительно уменьшается отдача тепла при соприкосновении с газом, наполняющим баллон и, следовательно, повышается температура нити.

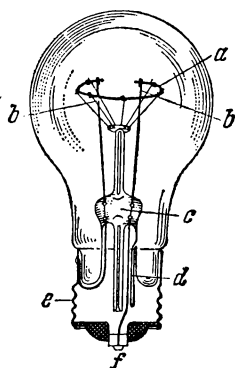


Рис. 102. Современная лампочка накаливания.

Применение вольфрамовых спиралей и инертных газов позволило повысить температуру накала до 2400° С и этим снизить расход энергии в мощных лампах до 0,6 *вт* на каждую свечу.

На рис. 102 показано устройство современной лампочки накаливания. Она содержит спиральную вольфрамовую нить *a*, прикрепленную к концам металлических вводов *b, b*. Вводы впаяны в стеклянную ножку лампы *c*, внутри которой проходят проволоки, подводящие ток к спирали. Для того чтобы при нагревании проволок стекло не растрескивалось, проволоки, идущие внутри стекла, делают из металлов с таким же коэффициентом расширения, как и у стекла. Для откачки воздуха служит небольшая трубка *d*, которая после удаления воздуха запаивается.

Для удобного включения лампы ее снабжают металлическим цоколем, укрепляемым на баллоне при помощи замазки. Цоколь состоит из металлической гильзы *e*, имеющей винтовой желоб, и изолированного от нее контакта *f*, к которым припаиваются провода от нити накала. Включение в цепь осуществляется ввертыванием цоколя лампы в специальный патрон. При ввертывании цоколя до соприкосновения его вывода со штифтом патрона концы спирали накала оказываются соединенными с проводами осветительной сети.

§ 63. Короткое замыкание. Плавкие предохранители. Сила тока в каком-либо участке цепи определяется по закону

¹⁾ Ирвинг Ленгмюр (род. в 1881 г.) — американский физико-химик.

Она сопротивлением участка и напряжением между его концами. При заданном напряжении она тем меньше, чем больше сопротивление данного участка. Так, например, сопротивление обычных лампочек накаливания сравнительно велико (сотни омов), и поэтому величина тока в них получается малой (несколько десятых ампера).

Если соединить провода помимо лампочки, то получится участок с очень малым сопротивлением, и ток может сделаться весьма большим. Говорят, что в этом случае имеет место **к о р о т к о е з а м ы к а н и е**. Коротким замыканием называют вообще всякое замыкание источника тока на очень

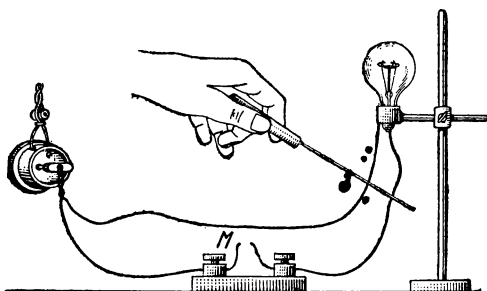


Рис. 103. При коротком замыкании плавкий предохранитель *M* расплавляется и размыкает цепь.

малое сопротивление. Развивающиеся при коротком замыкании большие токи чрезвычайно опасны из-за раскаливания проводов, а также крайне вредны для источника тока.

Для устранения опасностей короткого замыкания служат **п л а в к и е п р е д о х р а н и т е л и**. Это — тонкие медные проволоочки, или, еще лучше, проволоочки из легкоплавкого металла (например, свинца), вводимые последовательно в цепь тока и рассчитанные таким образом, чтобы они плавились при токе, превышающем ту величину, на которую данная цепь рассчитана. На рис. 103 показано действие предохранителей. При замыкании проводов электрической лампочки куском толстой медной проволоки (короткое замыкание) предохранитель *M* мгновенно плавится, и цепь размыкается.

Устройство наиболее употребительного «пробочного» предохранителя показано на рис. 104. Его название происходит от фарфоровой «пробки» *C*, внутри которой

помещается легкоплавкая проволока *а*. Пробка, подобно цоколю лампочки, ввинчивается в патрон предохранителя *В* и

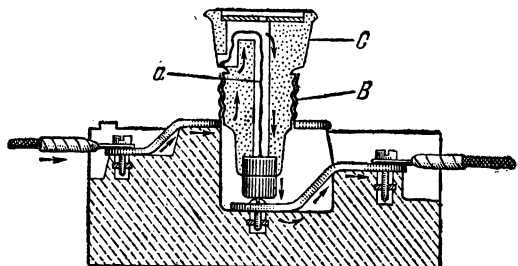


Рис. 104. Пробочный предохранитель.

после каждого короткого замыкания заменяется новой. Обычно предохранители или группы предохранителей ста-

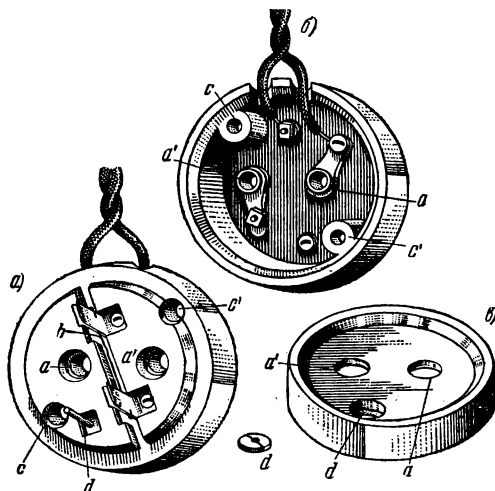


Рис. 105. Штепсельная розетка с предохранителем.

а) Вид сверху раскрытой штепсельной розетки; *б)* вид со стороны стены; *в)* крышка, *аа'* — гнезда для вилки; *б* — плавкий предохранитель; *а, сс'* — отверстия для шурупов, прикрепляющих штепсельную розетку к стене; *д* — приспособление для закрепления крышки.

вятся при вводе тока в домовладение и, кроме того, при вводе в каждую квартиру; нередко предохранителями снабжены и отдельные штепсели. Устройство штепсельного

предохранителя показано на рис. 105. Предохранитель отдельного штепселя должен плавиться при токе 3—5 ампер, предохранитель в квартире при токе 15—20 ампер, а предохранитель в доме при значительно больших токах — в несколько сот ампер.

§ 64. Электрическая проводка. На рис. 106 показано устройство комнатной электрической проводки. Ток со станции подводится по наружным проводам, которые входят

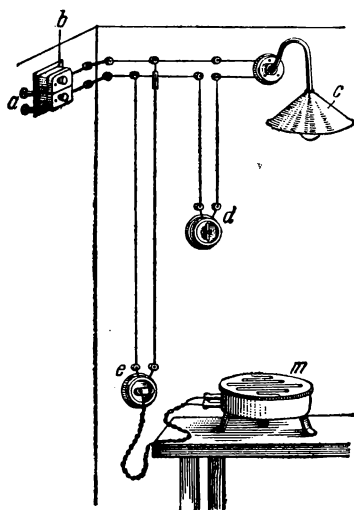


Рис. 106. Пример электрической проводки в квартире.

затем через фарфоровые проходные втулки *a* в помещение. Далее ток проходит через предохранители *b* и затем попадает к местам потребления: лампочке *c*, снабженной выключателем *d*, и штепселю *e* с приключенной к нему плиткой

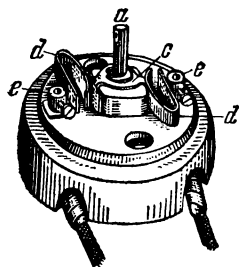


Рис. 107. Выключатель обычного типа.

т. Для того чтобы лампочка и штепсель могли работать независимо друг от друга, они соединяются **п а р а л л е л ь н о**.

Нужно иметь в виду, что существуют детально разработанные и утвержденные надлежащими государственными органами правила, которых обязательно должны придерживаться все лица, осуществляющие электрическую проводку или переделывающие ее. Эти правила определяют сечение и тип проводов, которые должны применяться в различных случаях, расположение изолирующих роликов, на которых крепятся провода, способы изоляции проводов при проходе через стены, способы соединения и разветвления

проводов и т. п. Чрезвычайно важно тщательно соблюдать эти правила, потому что проводка, выполненная не по правилам, легко может стать причиной пожара.

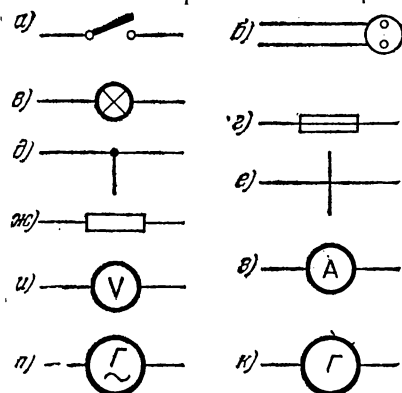


Рис. 108. Условные обозначения на электрических схемах: *а* — выключатель простой; *б* — штепсельная розетка; *в* — лампа; *г* — плавкий предохранитель; *д* — соединение проводов; *е* — перекрещивание проводов без соединения; *ж* — печи сопротивления; *з* — амперметр; *и* — вольтметр; *к* — генератор или мотор постоянного тока; *л* — генератор или мотор переменного тока.

Устройство выключателя обычного типа показано на рис. 107. При повороте рукоятки *а* скрепленная с ней латун-

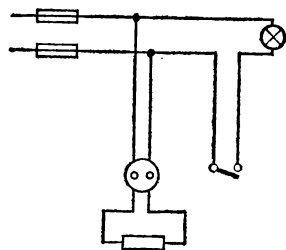


Рис. 109. Схематическое изображение электрической проводки, показанной на рис. 106.

ная пластинка *с* либо соединяет, либо разъединяет между собой пружинящие контакты *д, д*, которые приключаются к проводам при помощи зажимов *е, е*. При монтаже

выключателя один из проводов, ведущих к лампочке, разрезается, и образовавшиеся концы соединяются с выключателем.

Соединение проводов в электрических сетях, а также способы включения в них различных приборов и машин графически изображают на специальных чертежах — электрических схемах. Такими схемами мы были вынуждены пользоваться уже и раньше. При этом для разных деталей сети применяют стандартные обозначения, образцы которых приведены на рис. 108. На рис. 109 показан простой пример электрической схемы.

У п р а ж н е н и я. 64.1. Начертите схему электрической проводки в вашей комнате.

64.2. Начертите схему включения в осветительную сеть с напряжением 220 в трех лампочек, из которых одна требует для нормального накала 220 в, а две другие — по 110 в каждая.

64.3. Начертите схему включения двух штепселей и двух предохранителей так, чтобы при коротком замыкании в каком-либо из штепселей второй не выбывал из строя.

ГЛАВА V

ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ЧЕРЕЗ ЭЛЕКТРОЛИТЫ

§ 65. Первый закон Фарадея. В § 40 мы видели, что при прохождении тока через некоторые растворы, например, через раствор серной кислоты, происходит разложение воды на составные части — водород и кислород, выделяющиеся на пластинах, соединенных соответственно с отрицательным и положительным полюсами батареи. Такого рода растворы, разлагающиеся химически при прохождении через них тока, мы будем называть **э л е к т р о л и т а м и**, а самый процесс разложения вещества электрическим током — **э л е к т р о л и з о м**. Далее мы будем называть проводники, погруженные в электролит для подведения к нему тока, **э л е к т р о д а м и**: положительный электрод — **а н о д о м**, а отрицательный — **к а т о д о м**¹⁾.

Продукты разложения электролита, например, водород и кислород в опыте, описанном в § 40, выделяются на электродах все время, пока идет ток, и их количества можно измерить. Но особенно легко измерять количество выделяющегося вещества, если подобрать такой раствор, при котором выделяющееся вещество оседает в виде **т в е р д о г о** осадка на электроде. Так, если пропускать ток через раствор медного купороса (CuSO_4), то на катоде откладывается медь. Это явление легко наблюдать, если сделать катод, например, из угля; на черной поверхности угля ясно заметен красноватый слой выделившейся меди. Взвешивая катод до и после опыта, можно точно определить массу осадившегося металла.

¹⁾ От греческого «ана» — вверх, «ката» — вниз, «одос» — путь. «Вверх» и «вниз» введены Фарадеем, не совсем удачно, для обозначения противоположности направлений, в которых движутся частицы, выделяющиеся на аноде и катоде.

Измерения показывают, что масса вещества, выделенного на электродах, зависит от силы тока и времени электролиза.

Замыкая цепь на разные промежутки времени, можно убедиться в том, что масса выделенного вещества пропорциональна времени прохождения тока. Для того

чтобы установить, как она зависит от величины тока, поступим следующим образом. Изготовим несколько совершенно одинаковых электролитических ванн и составим из них цепь, как показано на рис. 110, а. Так как мы имеем дело с установившимся током (§ 42), то через ванны I и II проходит ток одной и той же величины. Такой же ток проходит и через обе ванны I и 2 вместе, а так как эти ванны одинаковы, то очевидно, что токи через ванны I и 2 равны друг другу и, следовательно, каждый из них равен половине тока, идущего через ванну I или II. Точно так же,

поместив в разветвлении три одинаковые ванны (рис. 110, б), мы получим способ пропустить через каждую из этих ванн ток, вдвое меньший тока, идущего через ванну I или II, и так далее. Измеряя массу вещества (например, меди или серебра), выделившегося на катодах каждой из этих ванн, мы убедимся, что массы вещества, выделяющиеся в ваннах I и 2 (или I, 2 и 3 и т. д.), равны между собой и составляют половину (или треть и т. д.) массы, выделенной в ванне I и II. Таким образом, опыт показывает, что масса выделенного вещества пропорциональна силе тока.

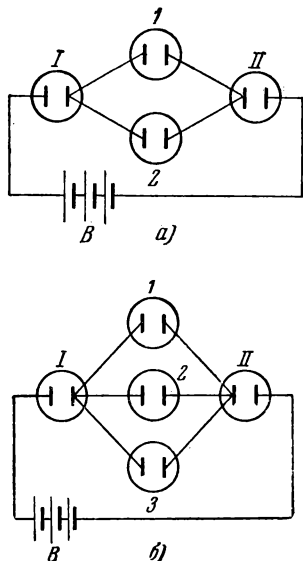


Рис. 110. Схема опыта для установления зависимости массы выделенного током вещества от величины тока. Ток, создаваемый батареей гальванических элементов В, проходит через электролитические ванны, осаждающая на электродах вещество. а) Ток между ваннами I и II распределяется между двумя одинаковыми ваннами I и 2. б) Ток между ваннами I и II распределяется между тремя одинаковыми ваннами I, 2 и 3.

Итак, масса выделенного вещества пропорциональна и силе тока и времени электролиза, т. е. их произведению. Но это произведение, согласно формуле (3,1), равно за ряд у, прошедшему через электролит. Мы видим, что *масса вещества, выделенного на электроде, пропорциональна заряду, или количеству электричества, прошедшему через электролит*. Этот важный закон был установлен впервые Фарадеем и носит название первого закона Фарадея.

Если m — масса выделенного вещества, I — ток, t — время электролиза, а q — полный заряд, прошедший через ванну за время t , то закон Фарадея можно записать так:

$$m = K \cdot q = K \cdot I \cdot t, \quad (5,1)$$

где K — коэффициент пропорциональности.

Полагая в формуле (5,1) заряд $q = 1$ к, мы получим, что K равно массе вещества, выделяемой зарядом в 1 к, или иначе — массе, выделяемой током в 1 а за 1 сек.

Исследования Фарадея показали, что эта величина является характерной для каждого вещества. Так, например, при электролизе раствора ляписа (азотнокислого серебра AgNO_3) один кулон выделяет 1,1180 мг серебра; точно такие же количества серебра выделяются одним кулоном при электролизе любой серебряной соли, например, хлористого серебра AgCl и т. д. При электролизе соли другого металла один кулон выделяет иное его количество. Величина K называется электрохимическим эквивалентом данного вещества. Таким образом, *электрохимическим эквивалентом какого-нибудь вещества называется масса этого вещества, выделяемая при электролизе одним кулоном протекающего через раствор электричества*.

В таблице 5 приведены некоторые значения электрохимических эквивалентов.

Т а б л и ц а 5
Электрохимические эквиваленты
некоторых веществ

Вещество	K в мг/к
Серебро (Ag)	1,118
Водород (H)	0,01045
Медь (Cu)	0,3294
Цинк (Zn)	0,3388

§ 66. Второй закон Фарадея. Из табл. 5.2 мы видим, что электрохимические эквиваленты различных веществ очень существенно отличны один от другого. От каких же свойств вещества зависит величина его электрохимического эквивалента?

Ответ на этот вопрос дает следующий важный закон, также установленный Фарадеем на опыте (второй закон Фарадея): *электрохимические эквиваленты различных веществ пропорциональны их атомным весам и обратно пропорциональны числам, выражающим их химическую валентность*¹⁾.

Для лучшего уяснения этого закона рассмотрим конкретный пример. Атомный вес серебра равен 108, его валентность 1. Атомный вес цинка равен 65,4, а валентность 2. Поэтому по второму закону Фарадея электрохимические эквиваленты серебра и цинка должны относиться, как $\frac{108}{1} : \frac{65,4}{2} = 3,30$. Рассматривая опытные значения электрохимических эквивалентов, мы находим из таблицы 5 для серебра $K = 1,118 \text{ мг/к}$, а для цинка $K = 0,3388 \text{ мг/к}$; их отношение равно $\frac{1,118}{0,3388} = 3,30$, что и соответствует второму закону Фарадея.

Если обозначить по-прежнему через K электрохимический эквивалент вещества, через A — его атомный вес, а через n — валентность ($n = 1, 2, \dots$), то второй закон Фарадея можно записать в виде следующей формулы:

$$K = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n}. \quad (5,2)$$

Здесь мы обозначили через $\frac{1}{F}$ — коэффициент пропорциональности, который является уже универсальной постоянной, т. е. имеет одинаковое значение для всех веществ. Если измерить электрохимические эквиваленты в г/к , то найдем, что $\frac{1}{F} = 1,037 \cdot 10^{-5} \text{ г/к}$, а $F = 96\,400 \text{ к/г}$.

Некоторые элементы в разных соединениях обладают различной валентностью. Так, например, медь одновалентна в хлористой меди (CuCl), заиси меди (Cu_2O) и еще в некоторых солях, а медь двувалентна в хлорной меди (CuCl_2), окиси меди

¹⁾ Напоминаем, что валентность любого атома определяется числом атомов водорода, которое способно соединяться с данным атомом или которое может быть замещено данным атомом. Так, например, хлор или

(CuO), медном купоросе (CuSO₄) и еще в некоторых соединениях. При электролизе в растворе с одновалентной медью заряд в один кулон всегда выделяет 0,6588 мг меди. При электролизе же в растворе с двухвалентной медью один кулон выделяет всегда в два раза меньшее количество меди, именно 0,3294 мг. Как мы видим, медь имеет два значения электрохимического эквивалента (см. табл. 5).

Отношение атомного веса какого-либо вещества к его валентности (A/n) называют химическим эквивалентом данного вещества. Это отношение показывает, сколько граммов данного вещества необходимо для замещения одного грамм-атома водорода в химических соединениях ¹⁾. У одновалентных веществ химический эквивалент равен грамм-атому. Пользуясь этим понятием, можно выразить второй закон Фарадея еще следующим образом: *электрохимические эквиваленты различных веществ пропорциональны их химическим эквивалентам.*

Объединяя формулы (5,1) и (5,2), можно выразить оба закона Фарадея в виде одной формулы:

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} \cdot q = \frac{A \cdot q}{F \cdot n}, \quad (5,3)$$

где m — масса вещества, выделившегося при прохождении через электролит количества электричества q .

Эта формула имеет простой физический смысл. Положим в ней $m = A/n$, т. е. возьмем массу одного химического эквивалента данного вещества. Тогда получим $F = q$. Это значит, что F численно равно заряду, который необходимо пропустить через любой электролит, чтобы выделить на электродах вещество в количестве, равном одному химическому эквиваленту. Величина F равна 96 400 к. Число F называется числом Фарадея.

Упражнения. 66.1. Каким образом, опустив два провода от гальванического элемента в стакан с водой, можно узнать, существует ли между ними напряжение? **Указания.** Вода, не подвергнутая специальной тщательной очистке, всегда содержит растворы различных солей и является проводником.

66.2. Для того чтобы определить, какой из полюсов источника тока положительный, а какой отрицательный, на практике часто опускают

серебро (в соединениях HCl, AgCl) одновалентны; цинк или кислород (в соединениях ZnO, H₂O) двухвалентны и т. д. Валентность водорода по определению выражается числом 1.

¹⁾ Напомним, что количество вещества, число граммов которого равняется его атомному весу, т. е. A , называется грамм-атомом. В 1 грамм-атоме любого вещества содержится $6,02 \cdot 10^{23}$ атомов (число Авогадро, т. I, «Теплота»).

провода, соединенные с полюсами, в стакан с водой и наблюдают, возле какого из проводов выделяется больше газа. Как по этим данным определить, какой из полюсов отрицательный?

66.3. Найдите электрохимические эквиваленты свинца, натрия и алюминия. Вычислите, какие количества этих веществ могут быть выделены током в 5 а в продолжение 10 час.

66.4. Зная, что электрохимический эквивалент водорода равен 0,01045 мг/к, вычислите электрохимический эквивалент хлора. Валентность хлора равна 1, атомный вес хлора 35,4, атомный вес водорода 1,008.

§ 67. Ионная проводимость электролитов. Самый факт разложения электролитов при прохождении через них тока показывает, что в них движение зарядов сопровождается движением атомов или групп атомов, связанных друг с другом (например, SO_4 , NO_3 и т. п.); эти атомы или атомные группы представляют собой части молекулы растворенного вещества. Естественно предположить, что заряжены именно эти части молекулы в растворе и что они являются носителями электрического заряда. Их перемещение под действием сил электрического поля и представляет собой электрический ток, идущий через электролит.

Было обнаружено, что при прохождении тока через электролит выделение вещества происходит на обоих электродах. По химическому составу это разные части молекулы растворенного вещества. По количеству, если измерять его в химических эквивалентах, они равны. Знаки зарядов у них, очевидно, противоположны.

Мы говорили уже (§ 5), что заряженные атомы называются ионами. То же название носят заряженные молекулы или их части. Мы можем, следовательно, сказать, что электропроводность электролитов является ионной, т. е. обусловлена движением в них положительных и отрицательных ионов, которые образуются из нейтральной молекулы путем распада ее на две части, заряженные равными и противоположными зарядами. Молекулы растворенного вещества, которые до растворения были электрически нейтральны, при растворении распадаются на положительные и отрицательные ионы, способные перемещаться независимо друг от друга.

Эти представления иллюстрируются рис. 111. Кружками между электродами со значками $+$ и $-$ схематически изображены положительные и отрицательные ионы растворенного вещества. Пока между электродами А и К не создано поле, ионы эти совершают только беспорядочное

тепловое движение, как и все остальные молекулы раствора (рис. 111, а). В каждом направлении за единицу времени протекает одинаковый положительный и отрицательный заряд, т. е. нет направленного тока — преимущественного переноса заряда в определенном направлении. При наложении разности потенциалов на электроды А и К (рис. 111, б), когда внутри электролита возникает электрическое поле, на это беспорядочное движение накладывается упорядоченное движение ионов различных знаков в противоположные стороны: отрицательных — к аноду А, положительных — к катоду К.

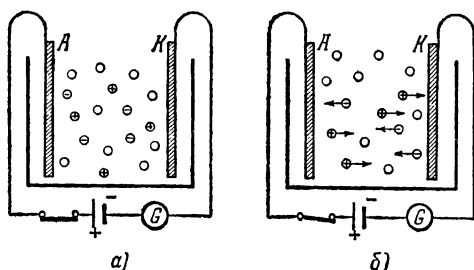


Рис. 111. а) Проводимость электролита зависит от наличия положительных и отрицательных ионов внутри него, обозначенных кружками со знаками + или -. б) Схематическое изображение процесса ионной проводимости в электролитах.

При соприкосновении с катодом положительные ионы получают недостающие им электроны и выделяются в виде нейтральных атомов, а взамен электронов, ушедших на нейтрализацию ионов, новое количество электронов переходит от батареи к катоду. Точно так же отрицательные ионы при соприкосновении с анодом отдают ему свои избыточные электроны, превращаясь в нейтральные атомы; электроны же уходят по металлическим проводам в батарею. Таким образом, ток в электролите обусловлен движущимися ионами; на электродах же происходит нейтрализация ионов и выделение их в виде нейтральных атомов (или молекул). Итак, *электрический ток в электролитах представляет собой движение положительных и отрицательных ионов.*

Такое представление об электролизе подкрепляется чрезвычайно многочисленными фактами.

С этой точки зрения первый закон Фарадея (§ 65) получает простое объяснение. Каждый осаждающийся на электроде ион переносит с собой некоторый электрический заряд. Это значит, что полный заряд, перенесенный всеми ионами, должен быть строго пропорционален полному количеству ионов, осевших на электродах, т. е. массе выделенного вещества. А это и есть первый закон Фарадея. Так же естественно и просто объясняется с этой точки зрения и второй закон Фарадея, дающий возможность вычислить элементарный электрический заряд, связанный с каждым ионом (§ 69).

Отметим, что название «ион» введено Фарадеем («ион» — по-гречески значит «идущий»). Ионы, заряженные положительно и выделяющиеся на катоде, Фарадей назвал катионами, ионы, выделяющиеся на аноде, — анионами.

Опыт показал, что водород и металлы всегда выделяются на катоде; это значит, что в электролитах водород и металлы образуют положительные ионы.

Упражнения. 67.1. При прохождении электрического тока через электролиты они нагреваются. Исходя из представлений об ионной проводимости, объясните это.

67.2. Почему провода осветительной сети непременно имеют резиновую оболочку, а провода, предназначенные для сырых помещений, кроме того, бывают просмолены снаружи?

67.3. Почему гораздо опаснее браться за электрические провода мокрыми руками, чем сухими?

§ 68. Движение ионов в электролитах. Движение ионов в электролитах в некоторых случаях может быть показано весьма наглядно.

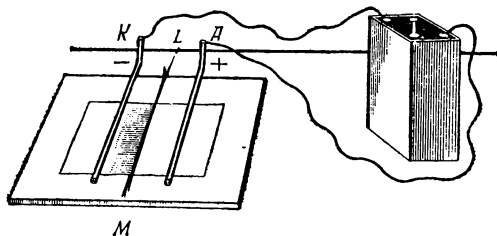


Рис. 112. Опыт, показывающий движение ионов. Лист фильтровальной бумаги пропитан раствором электролита и фенолфталеина. LM — нитка, смоченная раствором электролита.

Пропитаем листок фильтровальной бумаги раствором электролита (сернистого натрия, Na_2SO_4) и фенолфталеина и поместим на стеклянную пластинку (рис. 112). Поперек бумаги положим обыкновенную белую

нитку, смоченную раствором едкого натра (NaOH). Бумажка под ниткой окрасится в малиновый цвет, благодаря взаимодействию ионов гидроксила (OH) из NaOH с фенолфталеином. Затем прижмем к краям листка проволоочные электроды, присоединенные к гальваническому элементу, и включим ток. Ионы гидроксила из едкого натра начнут двигаться к аноду, окрашивая бумагу в малиновый цвет. По скорости перемещения малинового края можно судить о средней скорости движения ионов под влиянием электрического поля внутри электролита. Опыт показывает, что эта скорость пропорциональна напряженности поля внутри электролита. При заданном поле эта скорость для разных ионов несколько различна. Но в общем она невелика и для обычно применяющихся полей измеряется сотыми и даже тысячными долями *см/сек.*



Рис. 113. К упражнению 68.1. Полуюсоискатель.

У п р а ж н е н и е . 68.1.
Для определения знака полюсов источника употребля-

ют «полуюсоискатели», представляющие собой небольшую стеклянную ампулу с двумя введенными в нее проволоками (рис. 113). Ампулка заполняется раствором поваренной соли с добавленным к нему фенолфталеином, краснеющим под действием щелочи. На каком из полюсов будет появляться красная окраска?

§ 69. Элементарный электрический заряд. Из формулы (5,3), выражающей оба закона Фарадея, следует, что если $q=F$, то $m = \frac{A}{n}$, т. е. при прохождении через электролит

заряда, равного 96 400 кулонам, выделяется $\frac{A}{n}$ граммов любого вещества, т. е. $1/n$ грамм-атома этого вещества. Иначе говоря, для выделения одного грамм-атома вещества (т. е. A граммов его) через электролит должен протечь заряд $q=n \cdot F$ кулонов. Таким образом, при выделении 1 грамм-атома *о д н о в а л е н т н о г о* вещества (1 г водорода, 23 г натрия, 108 г серебра и т. д.) через электролит проходит $F=96\,400$ к; при выделении 1 грамм-атома *д в у х в а л е н т н о г о* вещества (16 г кислорода, 65,4 г цинка, 63,6 г меди и т. д.) через электролит проходит $2F=2 \cdot 96\,400 = 192\,800$ к и т. д.

Но мы знаем, что в одном грамм-атоме любого вещества содержится одно и то же число атомов его $N=6,02 \cdot 10^{23}$ (число Авогадро, т. I, «Теплота»). Таким образом, каждый ион *о д н о в а л е н т н о г о* вещества, выделяющийся на электроде, несет на себе заряд

$$e = \frac{F}{N} = \frac{96\,400}{6,02 \cdot 10^{23}} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ к.} \quad (5,4)$$

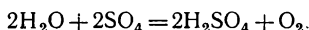
При выделении каждого атома двухвалентного вещества через электролит проходит вдвое больший заряд $\frac{2F}{N} = 3,20 \cdot 10^{-19}$ к и т. д. Вообще при выделении каждого атома n -валентного вещества через электролит переносится заряд $\frac{n \cdot F}{N} = n \cdot e$ кулонов.

Мы видим, что заряды, переносимые при электролизе с каждым ионом, представляют собой целые кратные некоторого минимального количества электричества, равного $1,60 \cdot 10^{-19}$ к. Любой одновалентный ион (ион калия, серебра и т. д.) переносит один такой заряд. Любой двухвалентный ион (ион цинка, ртути и т. д.) переносит два таких заряда и т. д. Никогда не встречается при электролизе случаев, когда бы с ионом переносился заряд, содержащий дробную часть от $1,60 \cdot 10^{-19}$ к. Гельмгольц¹⁾, обративший внимание на это следствие из законов Фарадея, сделал отсюда заключение, что указанное количество электричества — $1,60 \cdot 10^{-19}$ к — представляет собой наименьшее количество электричества, существующее в природе; этот минимальный заряд получил название элементарного заряда, или атома электричества. Одновалентные анионы (ионы хлора, иода и др.) несут на себе один отрицательный элементарный заряд, одновалентные катионы (ионы водорода, натрия, калия, серебра и т. д.) — один положительный элементарный заряд, двухвалентные анионы — два отрицательных элементарных заряда, а двухвалентные катионы — два положительных элементарных заряда и т. д. Таким образом, в явлениях электролиза исследователи впервые столкнулись с проявлениями атомной природы электричества (§ 5) и сумели определить величину элементарного электрического заряда. Позже были обнаружены и другие явления, в которых проявляется атомная природа электричества, и были найдены различные другие способы измерения элементарного отрицательного заряда — заряда электрона. Все эти измерения дали для величины заряда электрона то же значение, какое мы получили только что из закона Фарадея. Это является лучшим подтверждением правильности того ионного механизма прохождения тока через электролиты, который мы обрисовали в предыдущем параграфе.

¹⁾ Герман Гельмгольц (1821—1894) — немецкий физик и физиолог.

Ионы принято обозначать знаками + или — около соответствующих формул (обычно справа сверху). Число знаков + или — равно валентности иона (например, ионы меди бывают Cu^+ или Cu^{++} , ионы хлора только Cl^- и т. д.).

§ 70. Первичные и вторичные процессы при электролизе. Из изложенного выше представления о ионной проводимости электролитов вытекает, что п е р в и ч н ы м результатом электролиза является выделение на электродах составных частей молекулы растворенного вещества. Однако фактически мы часто обнаруживаем на одном или на обоих электродах не те атомы или атомные группы, которые перемещались в растворе и первоначально выделялись на электродах, а другие, освобождающиеся при в т о р и ч н ы х химических реакциях, в которые вступают освободившиеся первичные атомы и группы. Например, при электролизе раствора медного купороса (CuSO_4) на катоде выделяется, как мы говорили, медь, на аноде же мы обнаруживаем выделение не группы SO_4 , а кислорода. Одновременно наблюдается образование в растворе серной кислоты (H_2SO_4). Это объясняется тем, что группа SO_4 неустойчива; выделившись из раствора, она сейчас же вступает в реакцию с водой по уравнению

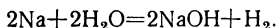


Кислород выделяется в виде пузырьков газа, а серная кислота остается в растворе.

Аналогичные вторичные реакции имеют место и при электролизе других солей и кислот. Мы видели, например, что при электролизе слабого раствора серной кислоты на электродах выделяются водород и кислород. Но этот окончательный результат является, как и в разобранный выше примере, следствием осложняющих вторичных химических реакций, налагающихся на простой первичный процесс. Сначала на катоде выделяется в виде пузырьков газа водород, а на аноде — группа SO_4 . Эта группа сейчас же вступает с водой в реакцию по написанному выше уравнению, и в результате молекула серной кислоты снова восстанавливается, а выделяется на аноде кислород воды. Внешне процесс протекает так, что количество серной кислоты в растворе остается неизменным, а количество воды убывает. Поэтому в этом случае, как и при электролизе многих других кислот и оснований, часто говорят о р а з л о ж е н и и в о д ы электрическим током или о в т о р и ч н ы х реакциях в о д ы. Это название не совсем точно. Оно правильно передает о к о н ч а т е л ь н ы й результат, но затемняет различие между тем первичным процессом, который непосредственно связан с прохождением тока через электролит, и вторичными химическими реакциями между продуктами этого первичного процесса.

Различие между первичными и вторичными процессами при электролизе очень удобно показать на следующем опыте. Будем производить электролиз раствора обычной поваренной соли (NaCl), взяв в качестве электродов, например, медные пластинки. На катоде мы будем наблюдать выделение водорода и образование едкого натра (NaOH), а на аноде — образование хлористой меди (CuCl), т. е. соединения хлора с металлом анода. Нетрудно показать, однако, что все эти продукты являются результатом в т о р и ч н ы х реакций, в которые вступают выделившиеся на электродах части молекулы хлористого натрия: натрий на катоде и хлор на аноде.

Чтобы убедиться в том, что первичным процессом является именно выделение на электродах натрия и хлора, повторим этот опыт, взяв в качестве анода угольный стержень, а в качестве катода — слой жидкой ртути, налитой на дно сосуда (рис. 114). Освобождающийся на аноде хлор не реагирует с углем и выделяется в виде пузырьков газа. На катоде же выделяется натрий. Правда, непосредственно мы этого натрия заметить не можем, потому что выделившиеся на поверхности ртути атомы его сейчас же просачиваются (диффундируют) в толщу жидкой ртути. Однако обнаружить их нетрудно. Достаточно после прохождения тока в течение некоторого времени перегнуть ртуть или, еще проще, облить ее горячей водой. Натрий вступает при этом с водой в химическую реакцию по уравнению



Пузырьки водорода выделяются на поверхности ртути, а едкий натр (NaOH) растворяется в воде, сообщая ей щелочные свойства: красная лакмусовая бумажка, погруженная в эту воду, окрашивается в синий цвет. Таким образом, выбрав надлежащим образом электроды, мы наблюдаем выделение на них первичных продуктов электролиза: натрия и хлора.

Важно отметить, однако, что независимо от того, выделяются ли на электродах первичные продукты электролиза или продукты вторичных реакций, законы Фарадея всегда сохраняют силу. Например, для выделения

одного грамма водорода (одного грамм-атома) требуется прохождение через электролит заряда в 96 400 к, независимо от того, является ли этот водород первичным продуктом, как при электролизе серной кислоты (H_2SO_4), или продуктом вторичной реакции, как при электролизе поваренной соли (NaCl). Это становится совершенно понятным, если мы вспомним, что каждый атом какого-нибудь вещества, выделяющийся на электродах, вступая в дальнейшие химические реакции, может заменить собой либо один атом или группу той же валентности, либо несколько атомов, общая сумма валентностей которых равна его валентности.

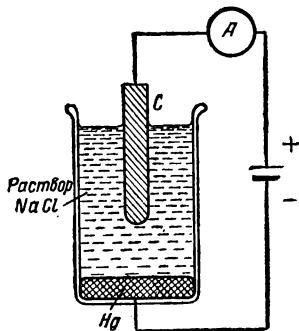


Рис. 114. Электролиз раствора поваренной соли; на аноде выделяется хлор, на катоде — натрий.

§ 71. Электролитическая диссоциация. Мы видим, что представление об ионной проводимости действительно хорошо и просто объясняет явление электролиза. Откуда же берутся ионы внутри электролита, если до растворения молекулы растворенного вещества были в целом не заряжены? Возникают ли эти ионы под действием тока или же они имеются внутри электролита с самого начала, еще до включения тока?

Несложные опыты и рассуждения показывают, что разделение молекул на заряженные ионы не связано

с наличием тока. Действительно, если бы молекулы разрывались электрическим полем, имеющимся при электролизе, то должна была бы существовать некоторая минимальная напряженность поля в электролите, необходимая для начала электролиза и зависящая от прочности молекул. Опыт же показывает, что это не так и что электролиз начинается при любом, сколь угодно малом поле. Это можно проверить, например, на электролизе медного купороса при медных электродах, когда нет искажающего влияния поляризации электродов (см. дальше § 77), какое бывает, например,

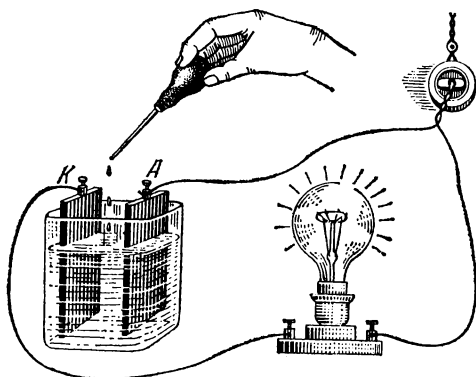


Рис. 115. Водный раствор кислоты или соли проводит электрический ток. *A* и *K* — электроды.

при электролизе подкисленной воды. Подобного рода опыты показывают, что ионы возникают не под действием тока, а образуются в процессе растворения вещества. Образование ионов при растворении носит название *электролитической диссоциации*.

Растворение не всегда сопровождается диссоциацией на ионы, а поэтому и не все растворы проводят электрический ток. Следующий опыт наглядно показывает такое различие.

Соединим последовательно с электрической лампочкой сосуд, содержащий дистиллированную воду и два металлических электрода, и включим их в осветительную сеть. Лампочка накаливаться не будет, так как дистиллированная вода является практически непроводником: в ней растворено

лишь ничтожное количество примесей, а сами молекулы воды почти недиссоциированы. Бросим теперь в воду щепотку сахара. Раствор по-прежнему будет оставаться непроводником, а значит, молекулы сахара при растворении не диссоциируют. Но если вместо сахара растворить в воде щепотку поваренной соли или несколько капель соляной кислоты, то лампочка накаливается (рис. 115): водный раствор соли проводит электричество, а следовательно, в нем происходит электролитическая диссоциация. Конечно, в этом опыте лампочка служит только индикатором тока и может быть заменена каким-нибудь измерительным прибором.

Представление об электролитической диссоциации, сопровождающей растворение, было введено Аррениусом ¹⁾. Аррениус следующим образом объяснил различие между электролитами и неэлектролитами, равно как и то обстоятельство, что именно водные растворы особенно хорошо проводят электричество. К числу электролитов относятся вещества, молекулы которых построены из положительно и отрицательно заряженных атомов, сдерживаемых силами электрического взаимодействия. Однако сила взаимодействия между двумя зарядами в среде с диэлектрической постоянной ϵ , согласно формуле (2,13), уменьшается в ϵ раз. Поэтому в растворителе с большой диэлектрической постоянной (у воды $\epsilon=81$) силы, сдерживающие ионы в молекуле, значительно уменьшаются. Молекулы из таких слабо связанных ионов под действием непрерывных тепловых соударений «разбиваются» на заряженные части — ионы, т. е. испытывают электролитическую диссоциацию.

Упражнение 71.1. Почему вокруг электролита, например вокруг раствора поваренной соли, нет электрического поля и он представляется нам незаряженным, хотя внутри него имеются заряженные ионы?

71.2. Почему все разноименные ионы в электролите не собираются под действием взаимного притяжения в нейтральные молекулы? Какая причина поддерживает все время ионизацию внутри электролита?

§ 72. Градуировка амперметров при помощи явления электролиза. В § 11 мы определили единицу заряда при помощи закона Кулона. Однако измерение сил электрического взаимодействия требует длительных операций и является сравнительно весьма неточным. В противоположность этому явление электролиза дает практически удобный способ измерения заряда, прошедшего через некоторый участок цепи. Для этого достаточно включить в этот участок электролитическую ванну, например серебряную, и измерить массу выделившегося на электродах вещества. Частное

¹⁾ Сванте Аррениус (1859—1927) — шведский физик и химик.

от деления массы осадка на его электрохимический эквивалент будет равно заряду, прошедшему через участок цепи.

Для определения силы тока в цепи достаточно определить количество осадка на электродах и время, в течение которого этот осадок образовался. Если ток оставался за это время неизменным, то частное от деления массы осадка на время и на электрохимический эквивалент даст величину тока в цепи.

Таким образом, первый закон Фарадея позволяет свести измерения тока к взвешиванию и к измерению времени, т. е. к очень простым и чрезвычайно точным операциям.

Конечно, проще всего было бы за единицу количества электричества (и за соответствующую единицу тока) принять такое количество, которое выделяет при электролизе единицу массы какого-либо вещества, например, 1 г или 1 мг серебра¹⁾. Но мы уже условились за единицу электричества принимать количество, определяемое по закону Кулона (§ 11), или — для практических измерений — кратную этому количеству величину в 1 к; поэтому потребовались очень тщательные и трудные опыты по установлению электрохимических эквивалентов, с помощью которых мы можем измерять путем электролиза величину заряда в уже выбранных единицах, кулонах, а ток — в амперах. Пользуясь установленными значениями электрохимических эквивалентов, можно очень удобно и точно градуировать амперметры (гальванометры) любого устройства. Для этого достаточно соединить последовательно электролитическую ванну и амперметр, пропускать в течение известного времени неизменный ток (о чем можно судить по постоянству показаний амперметра), а затем определить взвешиванием количество выделившегося вещества. Зная его электрохимический эквивалент, можно вычислить количество прошедшего электричества в кулонах и, разделив последнее на время опыта t , найти ток в амперах. Конечно, на практике указанным способом пользуются лишь для градуировки эталонных амперметров. Имея та-

¹⁾ Фарадей предлагал для абсолютных измерений электричества принять за единицу то количество электричества, которое при электролизе воды выделяет в приборе для электролиза (вольтаметре) одну сотую кубического дюйма гремучего газа. Это количество электричества в пересчете на современные единицы приблизительно равно 0,7 к.

кие тщательно проградуированные амперметры, можно, включив их последовательно с исследуемым амперметром, проградуировать этот последний. Электролитический же способ всегда может быть применен для контроля показаний эталонного амперметра, если возникает сомнение в его исправности.

§ 73. Технические применения электролиза. Явление электролиза находит себе многочисленные технические применения.

1) Электролитический метод получения чистых металлов. Хорошим примером является электролитическое очищение, или рафинирование меди. Медные руды содержат сернистые соединения меди, ее окислы, а также и примеси посторонних металлов (Ni, Pb, Sb, As, Bi и др.). Полученная непосредственно из руды медь, содержащая примеси, отливается в виде пластин и помещается в качестве анода в раствор CuSO_4 . Подбирая определенное напряжение на электродах ванны (0,20—0,25 в), можно добиться, чтобы на катоде выделялась только металлическая медь. При этом посторонние примеси либо переходят в раствор (без выделения на катоде), либо выпадают на дно ванны в виде осадка («анодный шлам»).

Электролитическое извлечение металлов может происходить не только из водных растворов, но также и из расплавов этих веществ, которые и в твердом состоянии образованы из ионов¹⁾ (например, NaCl); при плавлении их ионы приобретают необходимую подвижность. Электролиз расплавов лежит в основе процесса огромной технической важности — получения металлического алюминия из бокситов, содержащих окись алюминия Al_2O_3 (рис. 116). Так как при этих процессах применяют очень большие токи, то выделяемая, согласно закону Джоуля—Ленца, теплота оказывается достаточной для поддержания вещества в расплавленном состоянии.

Получение металлов путем электролиза (электрометаллургия) играет в современной цветной металлургии исключительно важную роль. В настоящее время весь алюминий добывается электролитически. Для добывания алюминия строят гигантские предприятия. Количество

¹⁾ См. т. I, «Теплота».

энергии, затрачиваемое на электрометаллургию во всем мире, исчисляется миллиардами киловатт-часов в год.

У п р а ж н е н и е. 73.1. Какова мощность тока, при помощи которого можно получить 150 кг алюминия в сутки? Какова необходимая поверхность электродов? Электролитическое получение алюминия ведется при напряжении около 5 в и плотности тока около 0,4 а на дм^2 . Потери составляют около 5% всей затраченной энергии.

2) **Г а л ь в а н о с т е г и я.** Посредством электролиза можно покрыть металлические предметы слоем другого металла. Этот процесс называется **г а л ь в а н о с т е г и е й**. Особое техническое значение имеют при этом электролитические покрытия трудно окисляемыми металлами, в частности — никелирование и хромирование, а также серебрение

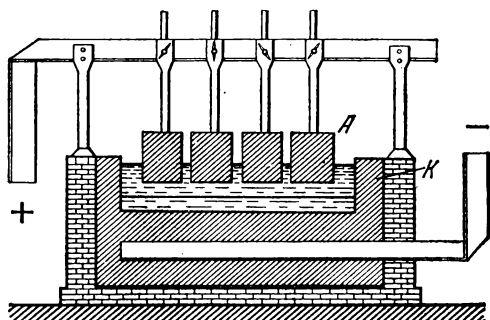


Рис. 116. Получение металлического алюминия электролизом расплавленных бокситов, содержащих окись алюминия. А — угольные аноды, К — дно и стенки угольной ванны, служащие катодом.

и золочение, часто применяемые для предохранения металлов от разрушения на воздухе (от **к о р р о з и и**).

Для получения нужных покрытий предмет тщательно очищают механически, хорошо обезжиривают и помещают как катод в электролитическую ванну, содержащую соль того металла, которым желают покрыть предмет. На рис. 117 изображена электролитическая ванна для никелирования. К — покрываемый предмет (катод), АА — никелевые пластины (аноды). В качестве электролита употребляют различные растворы солей никеля. Для более равномерного покрытия полезно применять две пластины в качестве анода, помещая предмет между ними.

У п р а ж н е н и я. 73.2. При электролитическом никелировании обычно употребляют ток около $0,4 \text{ а}$ на каждый дм^2 никелируемой поверхности. Сколько времени нужно вести электролиз, чтобы получить слой никеля толщиной $0,02 \text{ мм}$? Плотность никеля $8,8 \text{ г/см}^3$. У к а з а н и е. Значение электрохимического эквивалента никеля, необходимое для решения, вычислите сами, принимая во внимание, что никель двухвалентен и атомный вес его равен 58,69.

73.3. Какое количество сернистого никеля должно быть израсходовано, чтобы за счет содержащегося в нем никеля никелировать поверхность в 50 см^2 при толщине покрытия $0,02 \text{ мм}$? Сколько времени нужно проводить никелирование при плотности тока $0,3 \text{ а}$ на 1 дм^2 ?

3) Г а л ь в а н о п л а с т и к а. Посредством электролиза можно не только покрыть предметы слоем того или иного

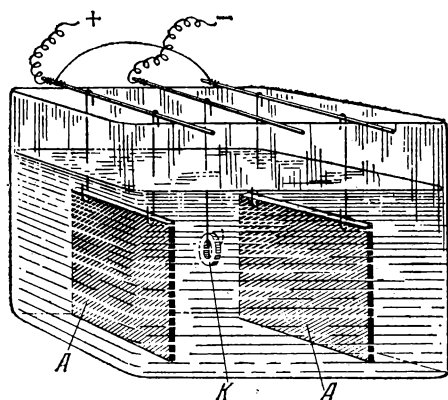


Рис. 117. Электролитическое никелирование. А — никелевые аноды; К — катод, которым служит никелируемый предмет.

металла, но и изготовить их рельефные металлические копии (например, монет, медалей и т. п.). Этот процесс был изобретен Б. С. Якоби¹⁾ в России в сороковых годах прошлого века и называется гальванопластикой. Для изготовления рельефной копии с предмета сначала делают слепок из какого-либо пластичного материала, например из воска. Этот слепок делают электропроводным, натирая его

¹⁾ Борис Семенович Якоби (1801—1874)— русский физик и электротехник, член Российской Академии наук.

графитом, и погружают в электролитическую ванну в качестве катода, где на нем и осаждается слой металла нужной толщины.

Гальванопластика находит важное применение в типографском деле, в процессе э л е к т р о т и п и и. В этом процессе сначала изготавливают обычный набор текста и снимают с него слепок из воска или пластмассы. После натира-ния слепка графитом на нем осаждают в электролитической ванне толстый слой меди и для придания прочности слою меди копию заливают с задней стороны «типографским металлом» ¹⁾. Полученная рельефная копия набора употребляется затем для печатания.

¹⁾ «Типографский металл» — легкоплавкий сплав на основе свинца.

ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ТОКА

§ 74. Введение. Открытие Вольта. В гл. III мы показали, что непрерывный электрический ток может поддерживаться в цепи проводников с сопротивлением только при условии, что в цепи действует какой-либо генератор, являющийся источником электродвижущей (электроразделительной) силы. При прохождении тока в цепи непрерывно выделяется энергия, например, в форме тепла, нагревающего провода; энергия эта доставляется генератором в результате тех или иных происходящих в нем процессов, которые могут быть весьма разнообразны; в соответствии с этим весьма разнообразными могут быть и генераторы э. д. с. В § 39 мы использовали в качестве генератора электрическую машину, работающую за счет энергии вращающего ее двигателя (например, мускульной энергии). Мы уже указывали, что количества электричества, разделяемые такой машиной за 1 секунду, весьма незначительны, и поэтому такая машина не может обеспечить поддержание тока сколько-нибудь значительной величины.

Первым генератором э. д. с., открывшим возможность широкого изучения и практического использования электрического тока, явился гальванический элемент, в котором энергия, выделяемая в цепи тока, получается за счет энергии, освобождающейся при химических реакциях, сопровождающих работу элемента.

Такой химический генератор был впервые построен Вольта¹⁾. Вольта установил, что разделенные электрическими зарядами (возникновение э. д. с.) происходит при соприкосновении различных проводников,

¹⁾ Алессандро Вольта (1745—1827) — итальянский физик.

так что на границе соприкосновения на одном из металлов скапливаются отрицательные заряды (избыток электронов), а на другом — положительные (недостаток электронов).

Гальванический элемент получил свое название по имени Гальвани¹⁾, опыты которого дали толчок к исследованиям Вольта. Гальвани обнаружил, что свежепрепарированная лягушечья лапка, подвешенная на медном крючке к железным перилам, сокращалась всякий раз, когда она касалась железа (рис. 118). Так как в эти времена уже

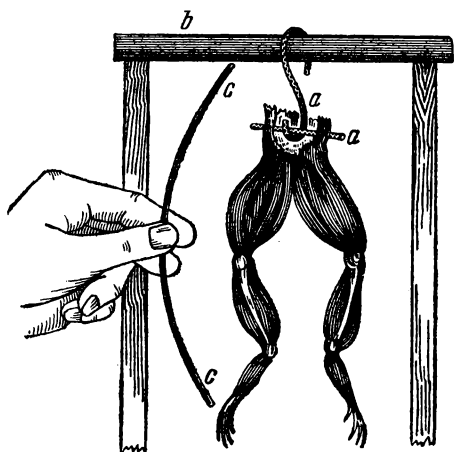


Рис. 118. Один из опытов Гальвани. Поясничные нервы лягушки соединены с латунным крючком *a*, который висит на железном стержне *b*. Если мускулы лапок лягушки соединить со стержнем *b* посредством железной палочки *c*, то они резко сокращаются.

было известно, что препарированная лапка лягушки сокращается при пропускании через нее электрического разряда (например, разряда лейденской банки), то Гальвани правильно приписал наблюдаемое им явление действию разряда, но он ошибочно полагал, что электрические заряды вырабатываются вследствие каких-то жизненных процессов в лапке лягушки. Вольта, поставив правильные физические опыты, установил, что явление связано с наличием двух различных металлов (медь крючка и железо перил), соприкасающихся с электролитами (жидкостью в лягушечьей лапке и слоем влаги, покрывающей в обычных условиях все металлические предметы), и что лягушечья лапка играла лишь роль чувствительного прибора, обнаруживающего наличие тока.

¹⁾ Луиджи Гальвани (1737—1798) — итальянский врач и анатом.

§ 75. Правило Вольты. Гальванический элемент. Явление, установленное Гальвани и Вольты, — разделение зарядов, т. е. возникновение э. д. с. на границе соприкосновения различных проводников, — было использовано для построения гальванического элемента. Однако, как выяснил Вольт, нельзя получить гальванический элемент, если составить замкнутую цепь из одних проводников 1-го класса (уголь и металлы), которые не претерпевают никаких химических изменений при прохождении тока (§ 40). Это показывает следующий опыт.

Прикрutим к концам железной проволоки по куску медной проволоки и свободные медные концы присоединим к чувствительному гальванометру (рис. 119). Мы получим замкнутую цепь, состоя-

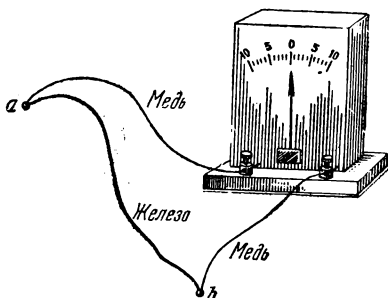


Рис. 119. В замкнутой цепи, составленной из одних только проводников 1-го класса, ток не возникает.
а и b — спай двух металлов.

щую из железа, двух медных проволок и проволоки (в виде нити или катушки), представляющей собой основную часть нашего гальванометра. Таким образом, эта цепь состоит целиком из металлов (проводников 1-го класса). В этих условиях даже весьма чувствительный гальванометр не обнаруживает тока. Ток не будет и в том случае, если вместо железной проволоки мы возьмем цинковую или еще какую-либо иную, если вместо скручивания мы спаяем два проводника, т. е. введем слой третьего металла — олова, или составим более сложную цепь, содержащую не два разных металла, а три, четыре и вообще любое их количество. Это значит, что *в цепи, состоящей из произвольного количества любых металлов, э. д. с. равна нулю* (правило Вольты).

Правило Вольты стоит в глубокой связи с тем обстоятельством, что *металлы* (проводники 1-го класса) *не испытывают химических изменений при прохождении тока* (§ 40). Если бы правило Вольты не соблюдалось, то мы могли бы устроить цепь, в которой ток длительно шел бы и совершал разнообразную работу (например, вращал мотор) без уменьшения запаса энергии этой цепи.

Действительно, внутренняя энергия такой цепи не может уменьшаться, ибо вещества, ее составляющие (металлы), не изменяются. Но если внутренняя энергия цепи не уменьшается и к цепи не подводится извне тепло, то по закону сохранения энергии не может и совершаться работа, т. е. в цепи не может поддерживаться длительный ток.

Нетрудно понять, почему в замкнутой цепи из различных проводников 1-го класса не идет ток, т. е. э. д. с. равна нулю, хотя на границах соприкосновения отдельных проводников возникает, как мы указывали, электродвижущая

сила. В такой цепи есть несколько мест соприкосновения различных металлов, по крайней мере два (рис. 120, а), или больше (рис. 120, б). Следовательно, в цепи возникает несколько э. д. с., различных по величине и по направлению (знаку), так что общая (резльтирующая) э. д. с. равна алгебраической

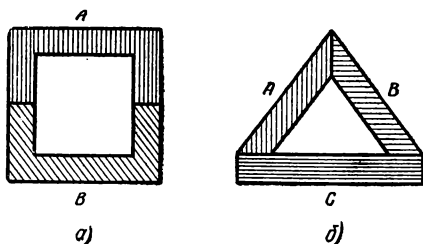


Рис. 120. Цепь, составленная из нескольких проводников 1-го класса:
а) из двух (А и В), б) из трех (А, В и С).

сумме всех отдельных э. д. с. Поскольку опыт показывает, что в такой цепи нет тока (что можно предвидеть на основании закона сохранения энергии), то, следовательно, *алгебраическая сумма всех э. д. с. в замкнутой цепи, составленной из проводников 1-го класса, равна нулю.*

Однако явление меняется, если хотя бы один из участков цепи оказывается проводником 2-го класса. Изменение химического состава этого проводника при прохождении тока может быть началом ряда химических превращений, в результате которых внутренняя (химическая) энергия тел, составляющих цепь, будет уменьшаться, и за счет этой энергии может поддерживаться ток в цепи. Действительно, Вольта, погрузив медную и цинковую пластинки в раствор серной кислоты, осуществил первый гальванический элемент, и поныне называемый элементом Вольта (рис. 121). Соединяя каким-либо проводником, например металлической проволокой, медную и цинковую пластины (электроды) элемента Вольта, мы получим в этой замкнутой цепи электрический ток.

Элемент Вольта содержит все необходимые для любого гальванического элемента части: два различных проводника 1-го класса (цинк и медь), соприкасающиеся с проводником 2-го класса (раствор серной кислоты). Но практически по причинам, которые будут выяснены в § 77, этот элемент неудобен, так как э. д. с. его, вначале равная 1,1 в, при работе элемента быстро падает. Поэтому на практике чаще применяют другие элементы, отличающиеся от элемента Вольта иным подбором проводников 1-го и 2-го класса.

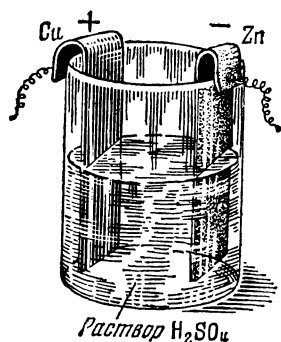


Рис. 121. Элемент Вольта: цепь, в которой два различных металла (медь и цинк) соприкасаются с электролитом (раствором серной кислоты).

Пластины гальванического элемента, между которыми возникает разность потенциалов, называются *пол ю с а м и* (или *э л е к т р о д а м и*). Тот полюс, у которого потенциал выше, называется *п о л о ж и т е л ь н ы м* (или *а н о д о м*), другой — *о т р и ц а т е л ь н ы м* (*к а т о д о м*). В элементе Вольта положительным полюсом служит медь.

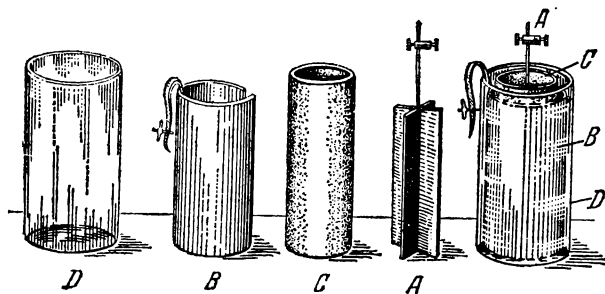


Рис. 122. Элемент Даниеля. А, В, С, D — отдельные части его. Справа — элемент в собранном виде.

Очень часто употребляется элемент Даниеля, положительным электродом которого является медь, погруженная в медный купорос, а отрицательным — цинк, погруженный в цинковый купорос или серную кислоту. В обычной конструкции, часто встречающейся в школах (рис. 122),

электроды помещаются в стеклянный сосуд *D*; цинковый электрод *A* окружен раствором ZnSO_4 , а медный *B* — раствором CuSO_4 . Чтобы предохранить растворы от быстрого смешивания, они разделены пористой перегородкой *C* из необожженной глины.

Такое устройство, объясненное ниже (§ 78), обеспечивает длительное равномерное действие элемента Даниеля, что не имеет места у элемента Вольта; э. д. с. элемента Даниеля равна 1,09 в.

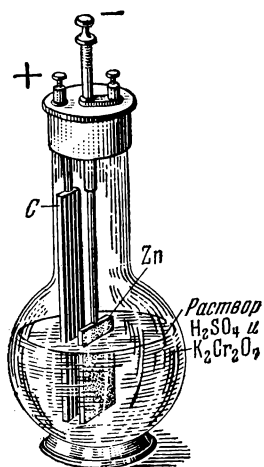


Рис. 123. Элемент Грене. Электроды — уголь (анод) и цинк (катод) — погружены в раствор серной кислоты, к которой добавлен двуххромовокислый калий.

На рис. 123 изображен элемент Грене. Он состоит из угольной и цинковой пластин, погруженных в водный раствор серной кислоты и двуххромовокислого калия ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). Для того чтобы цинк не растворялся в кислоте в то время, когда элементом не пользуются, цинковый электрод сделан подъемным. Положительным полюсом в этом элементе является уголь, отрицательным — цинк; э. д. с. около 2 в.

В § 77 мы увидим, что в большинстве гальванических элементов при длительном их использовании возникают вторичные процессы, изменяющие даваемое ими напряжение. Однако некоторые гальванические элементы отличаются исключительным постоянством напряжения и поэтому находят широкое применение при электрических измерениях в качестве эталона напряжения. Служащие для этого элементы изготавливаются по точным, установленным международными соглашениями рецептам, определяющим химический состав и концентрацию их электролитов. Они называются нормальными элементами. В настоящее время чаще всего употребляется нормальный элемент Вестона, дающий при 18°C напряжение в 1,0187 в.

Заметим, что э. д. с. того или иного гальванического элемента определяется только подбором металлов и электролитов и совершенно не зависит от величины площади

д и электродов, соприкасающихся с электролитом. Причины этого станут вполне ясны, когда мы разберем процесс возникновения э. д. с. в элементе.

§ 76. Как возникают э. д. с. и ток в гальваническом элементе? Легко заметить, что один из электродов гальванического элемента (обычно цинковый) постепенно изнашивается (растворяется), если элемент дает в течение длительного времени электрический ток. Поэтому можно предполагать, что возникновение э. д. с. гальванического элемента стоит в связи с процессом растворения металла. Действительно, исследование обнаруживает, что при погружении металла в разведенную кислоту начинается процесс растворения металла в кислоте. При этом, однако, в раствор переходят не нейтральные атомы металла, а его положительные ионы, избыточные же электроны остаются в металле и заряжают его отрицательно (рис. 124). Однако этот процесс растворения очень скоро пр

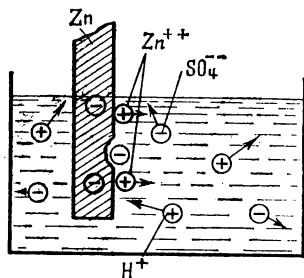


Рис. 124. Возникновение э. д. с. между цинком и раствором серной кислоты.

и а в л и а е т с я, ибо по мере увеличения концентрации ионов в растворе начинает все большую роль играть обратный процесс: ионы, окружающие электрод, в своем тепловом движении налетают на электрод и выделяются на нем, нейтрализуясь избыточными электронами, остающимися в металле. Вскоре устанавливается равновесие: число ионов, переходящих в раствор за какое-нибудь время, становится равным числу ионов, осаждающихся из раствора за то же время. Этому равновесному состоянию соответствует определенная разность потенциалов между металлом и раствором, характерная для природы металла и растворителя. Величина возникающей разности потенциалов, конечно, не зависит от размеров погруженной части металла, ибо указанное равновесие устанавливается у каждого участка поверхности, соприкасающегося с раствором.

Заметим, что при соприкосновении с электролитами все металлы заряжаются отрицательно. В элементе

Вольта, например, и медь и цинк переходят в раствор в виде положительных ионов, и оба электрода заряжаются отрицательно. Но избыток отрицательного заряда и соответственно разность потенциалов между кислотой и медью меньше, чем между кислотой и цинком. Поэтому для того чтобы использовать образовавшуюся разность потенциалов между металлом и растворителем, мы должны погрузить в растворитель еще один электрод из другого материала. Действительно, если в серную кислоту погрузить два цинковых электрода, то потенциал каждого из них будет на одну и ту же величину ниже потенциала раствора, а следовательно, между обоими цинковыми электродами разность потенциалов окажется равной нулю и прибор наш не будет годиться в качестве гальванического элемента. Но если второй электрод сделан из другого материала, то разность потенциалов между ним и раствором будет иной, чем для первого из наших электродов. Следовательно, между двумя различными электродами обнаруживается разность потенциалов, зависящая как от природы растворителя, так и от природы обоих электродов. Например, в случае элемента Вольта (цинк — серная кислота — медь) разность потенциалов между кислотой и цинком, так же как и между кислотой и медью отрицательна. Иными словами, если мы будем отсчитывать все разности потенциалов от уровня кислоты, потенциал которой мы примем за 0, то потенциал меди будет равен: $-U_1$ в, а потенциал цинка: $-U_2$ в, причем по абсолютной величине U_2 больше U_1 на 1,1 в. Таким образом между медью и цинком окажется разность потенциалов $(-U_1) - (-U_2) = U_2 - U_1 = 1,1$ в. Под действием этой разности потенциалов электроны будут переходить по проволоке с цинковой пластины, где их избыток больше, на медную, где их избыток меньше. [Условно направление тока, конечно, обратное — от Cu (+) к Zn (—)]. Мы видим теперь, почему э. д. с. элемента не зависит от площади электродов: она представляет собой разность напряжений, возникающих на границах между электролитом и электродами, а каждое из этих напряжений зависит только от природы электродов и от характера взаимодействия между ними и электролитом.

Рассмотрим теперь на примере элемента Даниеля, как происходит движение зарядов в цепи замкнутого гальванического элемента и каким образом поддерживается это дви-

жение зарядов, т. е. электрический ток. Для ясности элемент Даниеля изображен на рис. 125 в схематическом виде, причем два сосуда рис. 123 заменены двумя камерами (левой и правой), разделенными пористой перегородкой. В правой камере находится цинковый электрод в растворе цинковой соли (ZnSO_4), а в левой — медный электрод в растворе медной соли (CuSO_4). Когда элемент разомкнут, между каждым электродом и окружающим его электролитом устанавливается такая разность потенциалов, при которой имеет место равновесие, т. е. одинаковое количество ионов переходит за единицу времени из электролита на электрод и обратно. Металлы не растворяются и не наращиваются; концентрация растворов не меняется.

Посмотрим теперь, что произойдет, когда мы соединим электроды металлической проволокой, как показано на рис. 125. Так как между медным и цинковым электродом существует, как мы видели, некоторая разность потенциалов, то во внешней цепи электроны начнут уходить от электрода с более низким потенциалом (цинкового) к электроду с более высоким потенциалом (медному). При этом равновесие между электродом и окружающим его электролитом в обеих камерах нарушается. В правой камере цинк становится недостаточно отрицательным (часть электронов с него ушла); в левой камере медь становится слишком отрицательной (сюда пришли лишние электроны). Вследствие этого в правой камере цинк начнет растворяться; в раствор будут переходить дополнительные ионы Zn^{++} , а на цинке будут оставаться электроны, восстанавливающие его заряд. В левой камере, наоборот, ионы Cu^{++} будут нейтрализоваться на электроде избыточными электронами и осаждаться на нем в виде нейтральных атомов. Таким образом, в результате растворения цинка и осаждения меди разность потенциалов между этими электродами будет все время сохранять постоянное значение, и в цепи будет идти длительный ток постоянной величины.

Мы видим, что при описанном процессе в правой камере должны были бы накапливаться избыточные ионы Zn^{++} ,

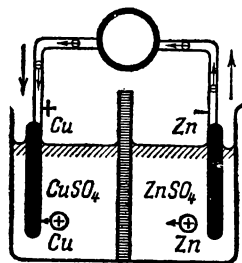


Рис. 125. Схематическое изображение движения зарядов в замкнутом гальваническом элементе Даниеля.

а в левой — избыточные ионы SO_4^{--} . Но эти противоположно заряженные частицы притягивают друг друга, и так как перегородка между камерами пористая, то ионы SO_4^{--} просачиваются через нее из левой камеры в правую, и концентрация ZnSO_4 в правой камере возрастает. В левой камере, наоборот, вследствие ухода ионов Cu^{++} к меди и ионов SO_4^{--} в правую камеру концентрация CuSO_4 в растворе убывает. Понятно, что если бы элемент работал в этих условиях достаточно долго, то концентрация ZnSO_4 в правой камере достигла бы насыщения и из раствора начали бы выпадать кристаллы ZnSO_4 , а в левой камере

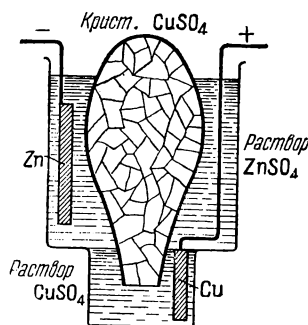


Рис. 126. Элемент Мейдингера.

концентрация CuSO_4 стала бы настолько малой, что э. д. с. элемента упала бы до нуля, и элемент не мог бы дальше работать. Поэтому, чтобы обеспечить длительную работу элемента, вводят в раствор запас кристаллов CuSO_4 , которые постепенно растворяются и поддерживают раствор в состоянии насыщенности. В сосуде рис. 125 избыточные кристаллы CuSO_4 и ZnSO_4 лежат просто на дне (не изображены). В технике же обычно пользуются элементом Даниеля

в той форме, которую ему придал Мейдингер (рис. 126). Здесь запас кристаллов медного купороса находится в специальном коническом сосуде; медный и цинковый электроды и растворы соответствующих электролитов расположены не рядом друг с другом, а один над другим; пористая перегородка отсутствует, но жидкости не смешиваются, так как раствор CuSO_4 , находящийся внизу, имеет большую плотность, чем верхний раствор ZnSO_4 .

Мы видим, таким образом, что в то время, как во внешней цепи гальванического элемента (в проволоке) движутся электроны от места с более низким потенциалом к месту с более высоким, т. е. от цинкового электрода к медному, в электролите движутся ионы: отрицательные (анионы SO_4^{--}) от меди к цинку и положительные (катионы Cu^{++} и Zn^{++}) от цинка к меди. Таким образом поддерживается непрерывный круговорот зарядов как в элементе по проводам, состав-

ляющим внешнюю цепь, так и в н у т р и элемента, через электролит. Направление движения электронов и катионов в случае элемента Даниеля показано на рис. 125 схематически маленькими стрелками. Согласно условному обозначению направления тока (§ 41), все эти потоки зарядов образуют общий ток, циркулирующий по цепи в направлении от меди к цинку.

Так же в основном происходит процесс возникновения э. д. с. и тока и в других гальванических элементах, хотя часто этот основной процесс осложняется вторичными реакциями, происходящими на электродах.

Источником энергии электрического тока является энергия, выделяющаяся при химических реакциях между электродами и электролитами, связанных с прохождением тока. В элементе Даниеля, как мы видели, таких реакций две: растворение цинка и превращение его в ZnSO_4 , с одной стороны, и выделение меди из раствора CuSO_4 , с другой стороны. Первая из этих реакций идет с выделением энергии. Если ее провести в калориметре, то можно определить, что при растворении 1 грамм-атома цинка (65,4 г) выделяется количество теплоты, эквивалентное энергии в $4,4 \cdot 10^5$ дж. Напротив, реакция выделения меди — это реакция, требующая притока энергии извне. На выделение 1 грамм-атома меди нужно затратить энергию в $2,34 \cdot 10^5$ дж. Разность значений энергии, освобождающейся при растворении цинка и поглощаемой при выделении меди, равна $(4,4 - 2,34) \cdot 10^5 = 2,06 \cdot 10^5$ дж. Это и есть тот запас энергии, который может дать наша батарея при растворении одного грамм-атома цинка и соответственно выделении одного грамм-атома меди.

Отсюда нетрудно рассчитать теоретически, какова должна быть э. д. с. элемента Даниеля. Положим, что ток, отбираемый от элемента, настолько мал, что напряжение U между его зажимами практически равно его э. д. с. Мы знаем (§ 57), что работа, совершаемая током, равна заряду Q , протекшему в цепи, умноженному на напряжение U . Но при выделении на электроде одного грамм-атома двухвалентной меди через цепь протекает заряд $Q = 2,96 \cdot 10^4$ к. Стало быть, работа, совершаемая током, равна $2,96 \cdot 10^4 \cdot U$ дж $\approx 1,93 \cdot 10^5 \cdot U$ дж. Эта работа, очевидно, должна быть равна энергии, освобождающейся в результате химических реакций, происходящих в элементе. Таким образом,

$$1,93 \cdot 10^5 \cdot U = 2,06 \cdot 10^5 \text{ дж,}$$

откуда

$$U = 1,07 \text{ в.}$$

Полученное нами значение очень близко к истинному (1,09 в).

Очевидно, что растворение электрода (цинка) происходит только тогда, когда от гальванического элемента берут ток; в неработающем (разомкнутом) элементе электрод не должен растворяться (изнашиваться). Практически, однако,

такое растворение имеет место. Причина лежит в том, что цинк обычно содержит некоторые включения из других

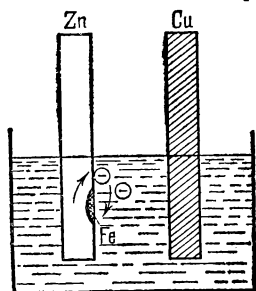


Рис. 127. Возникновение паразитных токов в гальваническом элементе.

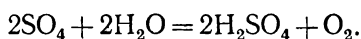
металлов, которые соприкасаются с растворителем и играют роль второго электрода. Таким образом, загрязненный цинк, опущенный в кислоту, представляет сам по себе гальванический элемент и притом коротко замкнутый и, следовательно, работающий. Благодаря этим «паразитным» токам (рис. 127) может происходить растворение цинкового электрода, когда основной гальванический элемент разомкнут и не работает. Чтобы избежать этого, надо применять очень чистые металлы, как, например, в «нормальных» гальванических элементах, или делать цинковый электрод подъемным, как, например, в элементе Грене (§ 75).

У п р а ж н е н и е. 76.1. Сколько цинка растворится под действием тока в элементе Даниеля, если он посылает ток силой $0,5 \text{ а}$ в течение 5 мин ? Электрохимический эквивалент цинка равен $0,339 \text{ мг/к.}$

§ 77. Поляризация электродов. При замыкании элемента Вольта на внешнюю цепь, содержащую амперметр, легко заметить, что показания амперметра не остаются постоянными, а непрерывно делаются все меньше и меньше. Через несколько минут после замыкания величина тока падает в несколько раз. Таким образом, элемент Вольта оказывается непригодным для получения постоянного по величине тока. В чем же заключается причина уменьшения тока?

Ответ на этот вопрос мы находим в следующем опыте. Опустим в подкисленную воду два одинаковых электрода, например платиновых или угольных (рис. 128, а), и присоединим их к амперметру. Амперметр не покажет никакого тока, что и неудивительно, так как мы уже знаем, что между двумя одинаковыми электродами (уголь — уголь) даже в растворе электролита не возникает разности потенциалов. Отсоединим теперь эти угольные электроды от амперметра и приключим их к гальваническому элементу или какому-нибудь иному генератору тока. Сейчас же начнется электролиз серной кислоты, и на одном из электродов бу-

дет выделяться водород, а на другом — кислород, получающийся при вторичной реакции между выделяющимися группами SO_4 и водой:



Если отключить электроды от элемента, то они остаются покрытыми пузырьками соответствующих газов.

Присоединим теперь электроды снова к амперметру (рис. 128, б). В этом случае в цепи появляется заметный ток, текущий от «кислородного» электрода к «водородному»: «водородный» электрод играет роль отрицательного полюса. Возникший ток, однако, быстро ослабевает; одновременно с этим исчезает и газ на электродах, и когда пропадают последние следы газа, то прекращается и ток.

Объяснение этого опыта заключается в том, что после электролиза оба электрода делаются неодинаковыми: один из них покрывается слоем кислорода, а другой — водорода. Поэтому и потенциалы обеих пластинок относительно раствора тоже становятся различными, и между ними возникает разность потенциалов, так что угольные электроды делаются подобными полюсам гальванического элемента. По этой причине описанное явление получило название поляризации, а возникающая при этом э. д. с. — электродвижущей силы поляризации.

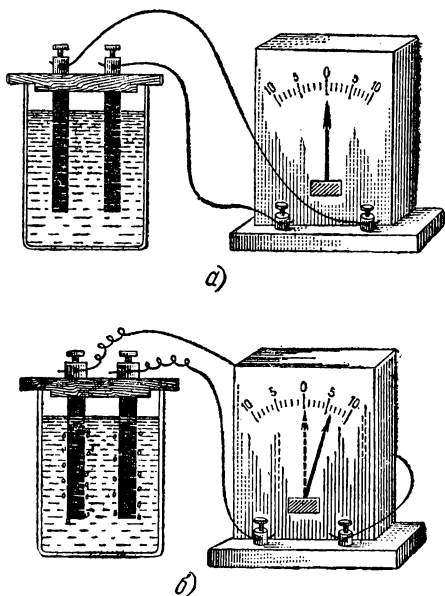


Рис. 128. Опыт, показывающий э. д. с. поляризации: а) в подкисленную воду опущены два одинаковых электрода, тока в цепи нет; б) после того как в цепи был пропущен ток, между электродами возникает э. д. с. поляризации.

Теперь нетрудно понять, почему элемент Вольта обладает плохими качествами. Мы знаем (§ 76), что внутри элемента также течет ток, причем положительные ионы, в частности ионы водорода, перемещаются от отрицательного полюса (цинка) к положительному (меди). Поэтому на положительном полюсе выделяется водород и возникает дополнительная э. д. с. поляризации, стремящаяся вызвать ток противоположного направления. Появление э. д. с. поляризации и есть основная причина ослабления тока.

Отметим, что выделение газов на электродах нежелательно еще и по другой причине. Газы, выделившиеся на электродах, не проводят электричества. Поэтому появление на электродах пузырьков газа уменьшает поверхность соприкосновения металла и электролита и, следовательно, увеличивает внутреннее сопротивление элемента и этим также способствует ослаблению тока.

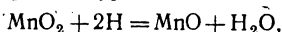
Из сказанного следует, что поляризация в гальванических элементах весьма нежелательна. Поэтому при конструировании гальванических элементов всегда стараются создать д е п о л я р и з а ц и ю, т. е. такие процессы, которые, по возможности, устранили бы поляризацию.

У п р а ж н е н и е 77.1. Улучшится ли качество элемента Вольта, если удалять водород с положительного электрода механически, например, все время протирая медную пластину жесткой щеточкой?

§ 78. Деполяризация в гальванических элементах. Основным материалом для отрицательных электродов в современных элементах является цинк. При этом электролит подбирают таким образом, чтобы переходящие в раствор положительные ионы цинка, соединяясь с имеющимися там отрицательными ионами электролита, давали с последними растворимое соединение без выделения газа. Так, например, если электролитом является раствор H_2SO_4 , то при растворении цинка образуется растворимая соль $ZnSO_4$. Таким образом, задача деполяризации сводится только к устранению водорода на положительном электроде.

В настоящее время применяют исключительно х и м и ч е с к у ю д е п о л я р и з а ц и ю. Ее сущность заключается в том, что в элемент вводят какой-либо сильный окислитель, который вступает в химическую реакцию с водородом, выделяющимся у положительного электрода, и этим предотвращает его выделение в газообразном состоянии.

Рассмотрим некоторые примеры деполяризации в элементах. На рис. 129 показано устройство гальванического элемента Лекланше. Его электродами являются угольный стержень *C* и цинковый цилиндр *Zn*, а электролитом служит водный раствор нашатыря (хлористого аммония, NH_4Cl). В качестве деполяризатора в этом элементе употребляют перекись марганца (MnO_2). Для деполяризации угольный стержень помещают внутри холщового мешка *D*, который набивают измельченной перекисью марганца, смешанной для лучшей проводимости с графитом. Выделяющийся при работе водород вступает в реакцию с деполяризатором по уравнению



в результате чего водород окисляется кислородом деполяризатора, образуя воду, и в газообразном состоянии не выделяется; э. д. с. элемента Лекланше около 1,4 в.

На рис. 130 показано устройство так называемого «сухого» элемента, имеющего обширные применения. Это — элемент Лекланше, в котором вместо жидкого электролита использована крахмалистая масса *M* консистенции густого клейстера, содержащая нашатырь. Сверху элемент заливается слоем смолы *P*, препятствующим выпадению массы при опрокидывании элемента и предохраняющим ее от быстрого высыхания. Угольный электрод *C* имеет вид стерженька, а цинковый электрод *Zn* образует корпус элемента. Подобным образом устроены батарейки для карманных фонарей: они содержат два или три маленьких сухих элемента, соединенных последовательно.

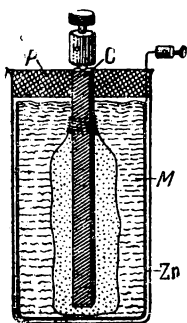


Рис. 130. Сухой элемент Лекланше.

Вторым примером может служить описанный в § 75 элемент Грене. Он содержит в качестве электролита водный раствор серной кислоты с добавкой двуххромовокислого калия ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). Эта смесь служит чрезвычайно сильным окислителем, и поэтому водород, выделяющийся на угольном электроде, сразу же окисляется в воду, чем и предотвращается поляризация элемента.

Очень хорошо устранена поляризация в элементе Даниеля (§ 75). При работе элемента у катода (*Zn*) происходит образование растворимого ZnSO_4 , а на аноде (*Cu*) выделяется металлическая медь. Таким образом, поверхность металлических электродов остается чистой, и поляризация не возникает.

В последнее время успешно пользуются так называемым воздушным деполяризатором, при котором для окисления водорода используется кислород воздуха, подводимый к аноду при помощи специального устройства.

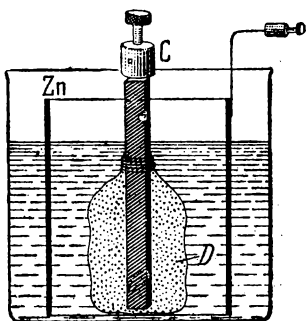


Рис. 129. Элемент Лекланше.

§ 79. Аккумуляторы. Явление поляризации, вредное в гальванических элементах, находит, однако, и полезное применение. В 1895 г. Плантэ показал, что э. д. с. поляризации можно использовать для практического получения электрического тока. Он построил элемент с двумя свинцовыми электродами, погруженными в раствор серной кислоты. Элемент в таком виде не обладает еще э. д. с., так как оба его электрода одинаковы. Если, однако, через такой элемент пропустить известное время ток, то на его электродах выделяются продукты электролиза, которые вступают в химическую реакцию с электродами. Благодаря этому электроды оказываются различными по химическому составу, и появляется определенная э. д. с. — именно, э. д. с. поляризации, равная приблизительно 2 в. Элемент в таком состоянии является уже сам источником тока и при замыкании на какую-либо цепь может создавать в ней в течение некоторого времени электрический ток. Таким образом, для появления э. д. с. в элементе Планте через него необходимо пропустить в течение известного времени ток от постоянного источника. Этот процесс называется зарядкой элемента.

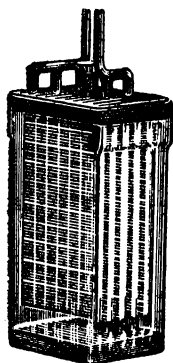


Рис. 131. Свинцовый аккумулятор.

Элемент Планте и ему подобные, использующие явление поляризации, называются вторичными элементами, или аккумуляторами, так как в них можно запасать (аккумулировать) энергию. После израсходования энергии аккумулятора его можно вновь зарядить пропусканьем тока и повторять этот процесс много раз.

С энергетической точки зрения дело обстоит так. Реакции, протекающие в аккумуляторе при его зарядке и делающие первоначально одинаковые электроды химически различными, — являются реакциями, которые могут осуществляться лишь при притоке энергии извне. Эту энергию доставляет генератор, при помощи которого мы заставляем ионы перемещаться в растворе и выделяться на соответствующих электродах. Напротив, при разрядке аккумулятора в нем происходят реакции, идущие с выделением энергии. Эти реакции и являются источником э. д. с. аккумулятора. Таким образом, при зарядке аккумулятора происходит превращение электрической энергии в скрытую химическую форму энергии, а при его разрядке — обратный переход химической энергии в форму энергии электрического тока.

Устройство современного свинцового аккумулятора показано на рис. 131. Он состоит из ряда положительных и отрицательных пластин, находящихся в баке с водным раствором (15—20%) серной кислоты. Все положительные пластины соединены между собой также, как и все отрицательные, благодаря чему в небольшом сосуде можно иметь большую площадь электродов, разделенных тонким слоем электролита, т. е. иметь элемент с чрезвычайно малым внутренним сопротивлением¹⁾.

Отрицательные пластины состоят из чистого металлического свинца, поверхность которого сделана мелкопористой для увеличения действующей площади электродов (губчатый свинец). Положительные пластины имеют более сложное строение, показанное на рис. 132. При их изготовлении сначала отливают (или штампуют) раму из свинца, снабженную многими ячейками наподобие пчелиных сот, и в них впрессовывают специальную массу, состоящую из окислов свинца и связующих веществ.

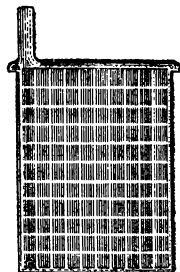


Рис. 132. Положительная пластина свинцового аккумулятора.

В незаряженном состоянии оба электрода покрыты слоем сернокислого свинца $PbSO_4$. При зарядке ионы SO_4^{--} перемещаются к одному электроду и превращают его в перекись свинца (по уравнению: $PbSO_4 + SO_4 + 2H_2O = PbO_2 + 2H_2SO_4$), а ионы H^+ восстанавливают второй электрод в металлический свинец (по уравнению: $PbSO_4 + 2H = Pb + H_2SO_4$). Соединение PbO_2 становится анодом, а Pb — катодом заряженного аккумулятора. При разрядке ток по внешней цепи идет от PbO_2 к Pb , а внутри аккумулятора ионы SO_4^{--} и H^+ движутся в направлениях, обратных их движению при зарядке, и реакции на электродах протекают в обратном направлении. Во вполне разряженном аккумуляторе оба электрода опять состояли бы из $PbSO_4$. В рабочих условиях не доводят аккумулятор до полной разрядки и вновь заряжают его, когда напряжение на электродах падает примерно до 1,8 в. Свежезаряженный свинцовый аккумулятор имеет напряжение около 2,7 в. Но при разрядке это напряжение быстро падает до 2 в и затем долго остается весьма постоянным. После длительной разрядки напряжение аккумулятора вновь начинает падать; разрядку его следует прекратить, когда напряжение упадет до 1,85 в.

¹⁾ Вследствие малости внутреннего сопротивления аккумулятора короткое замыкание его (§ 63) вызывает очень большой ток, крайне вредный для аккумулятора.

Помимо свинцовых аккумуляторов существуют и другие их типы. В настоящее время широко употребляются железоникелевые аккумуляторы («щелочные» аккумуляторы). У них электродами являются железо и никель, а электролитом — 20%-ный раствор едкой щелочи (KOH или NaOH). В заряженном состоянии никелевые пластины покрываются слоем окиси никеля Ni_2O_3 и служат положительным полюсом, а металлическое железо — отрицательным; э. д. с. этих аккумуляторов равна 1,4 — 1,1 в. Железоникелевые аккумуляторы характеризуются большой устойчивостью: механические сотрясения и небрежность в уходе, могущая вызывать вредные химические реакции, для этих элементов гораздо менее опасны, чем для свинцовых.

Различные аккумуляторы характеризуются максимальным количеством электричества, которое можно получить от них без новой зарядки. Это количество электричества принято выражать в амперчасах ($a \cdot час$) и называть емкостью аккумулятора. Так, например, переносные аккумуляторы, применяющиеся для автомобилей, имеют обычно емкость 40 $a \cdot час$. Это значит, что они могут давать ток в 1 а в течение 40 час, или ток в 2 а в течение 20 час, и т. д. При этом, конечно, разрядный ток не должен превышать некоторой максимальной величины (для свинцового аккумулятора приблизительно 1 а на каждый квадратный дециметр поверхности положительных пластин), так как в противном случае пластины быстро разрушаются. Чем больше площадь пластин аккумулятора, тем большее количество продуктов электролиза может быть удержано на пластинах, а значит, и тем больший заряд можно получить от аккумулятора при разрядке, т. е. тем больше его емкость.

У п р а ж н е н и е 79.1. Батарея аккумуляторов с емкостью 20 $a \cdot час$ питает лампочку, потребляющую ток в 0,25 а. Сколько часов может гореть лампочка без новой зарядки аккумуляторов?

Аккумуляторы играют в современной электротехнике важную роль. Так, например, на электрических станциях с неравномерной нагрузкой часто устанавливают, кроме динамомашин, еще и батареи аккумуляторов (буферные аккумуляторы). При малой нагрузке станции часть энергии, вырабатываемой динамомашинами, расходуется на зарядку аккумуляторов, а в периоды большой нагрузки эти аккумуляторы питают сеть параллельно с машинами. Электростанции, использующие энергию ветра, всегда бывают снабжены аккумуляторами, которые заряжаются в те периоды, когда имеется ветер, а затем уже расходуют запасенную энергию по мере надобности и независимо от метеорологических условий.

Аккумуляторы широко применяют на всех подводных судах. При надводном плавании аккумуляторы заряжаются от динамомашины, а при погружении под воду все механизмы приводятся в движение исключительно от аккумуляторов. Аккумуляторы с успехом применяются при устройстве электрических грузовых тележек, так называемых электрокаров, которые должны работать короткие промежутки времени и делать частые остановки, и на которых поэтому невыгодна установка двигателей внутреннего сгорания, непрерывно поглощающих топливо; в автомобилях (зажигание в моторах, освещение); для питания рудничных ламп и еще во многих важных промышленных машинах и приборах. Очень широко распространены аккумуляторы в лабораторной практике, где они являются хорошими источниками постоянного тока, а также в радиотехнике.

Несмотря на большие преимущества аккумуляторов, которые во многих случаях вытеснили гальванические элементы, последние все еще имеют ряд важных применений: в качестве эталонов напряжения (нормальные элементы, § 75), для питания радиоприемников в местностях, где нет электрического тока, для карманных фонарей и т. п.

§ 80. Закон Ома для замкнутой цепи. В § 46 мы познакомились с законом Ома для участка цепи, позволяющим вычислить ток, если известно сопротивление участка и напряжение на его концах. Очень часто, однако, приходится решать задачи, в которых напряжение на концах участка цепи не задано, но зато известны **с о п р о т и в л е н и я** всех частей цепи и **э л е к т р о д в и ж у щ а я** с и л а источника, питающего цепь. Как найти в этом случае величину тока?

Рассмотрим всю замкнутую электрическую цепь, включая и источник тока, и выясним на опыте, от чего зависит ток в ней.

Замкнем источник тока, например элемент Даниеля (§ 75), на внешнюю цепь, содержащую амперметр и реостат (рис. 133), и будем перемещать движок реостата, меняя этим сопротивление внешней цепи. Мы обнаружим, что с у м е н ь ш е н и е м сопротивления внешней цепи ток будет у в е л и ч и в а т ь с я.

Установим теперь реостат так, чтобы сопротивление внешней цепи было незначительным, и будем изменять г л у б и н у п о г р у ж е н и я цинковой пластины

элемента. Ток будет увеличиваться по мере погружения пластины.

Для понимания этого результата вспомним, что напряжение на разомкнутом элементе, т. е. его электродвижущая сила, совершенно не зависит от геометрических размеров и формы элемента (§ 76). Следовательно, при изменении глубины погружения пластины электродвижущая сила источника не м е н я е т с я. В чем же причина изменения тока? В § 76 мы видели, что ток идет как по внешней цепи, так и внутри источника. Но сам источник представляет тоже определенное сопротивление току. Это сопротивление носит

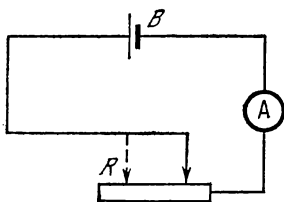


Рис. 133. Измерение тока в цепи при изменении внутреннего сопротивления элемента. B — гальванический элемент; A — амперметр; R — реостат.

название внутреннего сопротивления источника. В гальванических элементах оно складывается из сопротивления его электродов и главным образом из сопротивления столба электролита между ними. Погружая цинковую пластину на различную глубину, мы изменяем сечение этого столба и вместе с ним внутреннее сопротивление элемента. Мы видим, что величина тока зависит также от внутреннего сопротивления источника тока. *Полную цепь можно рас-*

сматривать как последовательное соединение внешнего сопротивления проводов и внутреннего сопротивления элемента. Полное сопротивление цепи представляет собой сумму внутреннего сопротивления источника и сопротивления внешней цепи. Заменим элемент каким-либо другим, имеющим такое же внутреннее сопротивление, но другую электродвижущую силу. Мы обнаружим, что ток при этом изменится.

Таким образом ток в цепи зависит от электродвижущей силы источника и от полного сопротивления цепи.

Количественный закон, связывающий эти величины, представляет закон Ома для замкнутой цепи: *ток в какой-либо цепи, содержащей источник тока, прямо пропорционален электродвижущей силе источника и обратно пропорционален полному сопротивлению цепи.*

Если обозначить электродвижущую силу источника, выраженную в вольтах, через E , его внутреннее сопротивление

ние (в омах) — через r , сопротивление внешней цепи (тоже в омах) — через R , а ток (в амперах) — через I , то закон Ома представится следующей формулой:

$$I = \frac{E}{r + R}. \quad (6,1)$$

Мы видим, что ток, который способен дать источник, зависит не только от э. д. с. и сопротивления внешней цепи, но еще и от внутреннего сопротивления. Сказанное относится, конечно, не только к гальваническим элементам, но и к любым источникам тока, например к аккумуляторам или динамомашинам.

§ 81. Напряжение на зажимах источника и э. д. с. Измерения показывают, что разность потенциалов на зажимах источника, замкнутого на внешнюю цепь, зависит от величины отбираемого тока (от «нагрузки») и меняется с изменением последнего. Пользуясь законом Ома, мы можем сейчас разобрать этот вопрос точнее.

Из формулы (6,1) мы имеем:

$$E = I \cdot R + I \cdot r, \quad (6,2)$$

где R — сопротивление внешней цепи, а r — внутреннее сопротивление источника. Но к внешней цепи мы вправе применить закон Ома для участка цепи:

$$I \cdot R = U. \quad (6,3)$$

Здесь U — напряжение во внешней цепи, т. е. разность потенциалов на зажимах источника. Оно может быть выражено на основании (6,2) и (6,3) также следующей формулой:

$$U = E - I \cdot r. \quad (6,4)$$

Мы видим, что *при замкнутой цепи напряжение на зажимах U всегда меньше э. д. с. E . Напряжение U зависит от тока I и только в предельном случае разомкнутой цепи, когда величина тока $I=0$, напряжение на зажимах равно э. д. с.*

Уменьшение напряжения на зажимах при наличии тока I легко наблюдать на опыте. Для этого нужно замкнуть какой-либо гальванический элемент на реостат с переменным сопротивлением и приключить к зажимам элемента вольтметр (рис. 134, а и б). Перемещая движок реостата, можно видеть, что чем меньше сопротивление внешней цепи, т. е. чем больше ток, тем меньше напряжение на зажимах источ-

ника. Если сопротивление внешней цепи сделать очень малым по сравнению с внутренним сопротивлением источника (вывести вовсе реостат), т. е. сделать «короткое замыкание», то напряжение на зажимах делается равным нулю.

Что же касается тока, то он при коротком замыкании достигает своего максимального значения $I_{\text{макс}}$. Величина этого «тока короткого замыкания» получается из закона

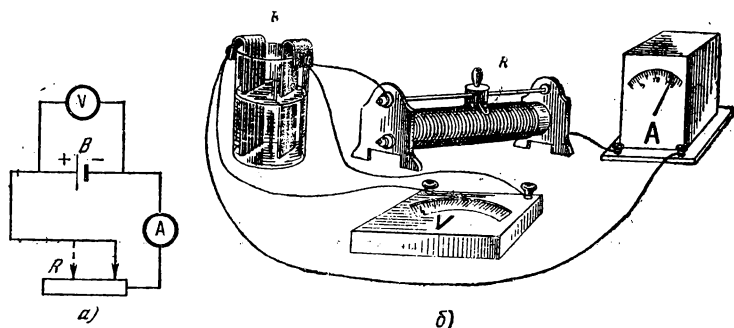


Рис. 134. С уменьшением сопротивления внешней цепи напряжение на зажимах источника тока уменьшается. В—источник тока (гальванический элемент); R—реостат; А—амперметр; V—вольтметр. а) Схема опыта; б) изображение опыта.

Ома (6,1), если в нем положить $R=0$ (т. е. пренебречь величиной R по сравнению с r):

$$I_{\text{макс}} = \frac{E}{r}. \quad (6,5)$$

Отсюда видно, что ток короткого замыкания зависит не только от э. д. с., но также и от внутреннего сопротивления источника. Поэтому короткое замыкание представляет совсем различную опасность для разных источников тока. Короткие замыкания гальванического элемента сравнительно безвредны, так как при небольшой э. д. с. элементов их внутреннее сопротивление имеет заметную величину, и поэтому токи короткого замыкания малы. Такие токи не могут вызвать серьезных разрушений, и поэтому к изоляции проводов в цепях, питаемых элементами (звонки, телефоны и т. п.), не предъявляют особо высоких требований. Иное имеет место в силовых или осветительных цепях, питаемых большими динамомашинами. При значительной э. д. с. (100 и более вольт) внутреннее сопро-

тивление этих источников ничтожно мало, и поэтому ток короткого замыкания может достигнуть огромной величины. В этом случае короткое замыкание может привести к расплавлению проводов, вызвать пожар зданий и т. д. Поэтому к устройству и изоляции таких цепей предъявляют строгие технические требования, которые ни в коем случае нельзя нарушать без риска вызвать опасные последствия. Такие цепи всегда снабжаются предохранителями (§ 63) и притом нередко в различных местах: общий предохранитель (при главном вводе), групповые и штепсельные предохранители.

У п р а ж н е н и я. 81.1. Внутреннее сопротивление некоторого элемента Даниеля (э. д. с. $1,1 \text{ в}$) равно $0,5 \text{ ом}$. Вычислите ток короткого замыкания этого элемента.

81.2. Элемент Грене (э. д. с. $1,8 \text{ в}$) с внутренним сопротивлением 1 ом замкнут на сопротивление $0,8 \text{ ом}$. Чему равно напряжение на зажимах элемента?

81.3. Электродвижущая сила динамомашинны равна 120 в , а внутреннее сопротивление $0,01 \text{ ом}$. Какой ток возникает при коротком замыкании?

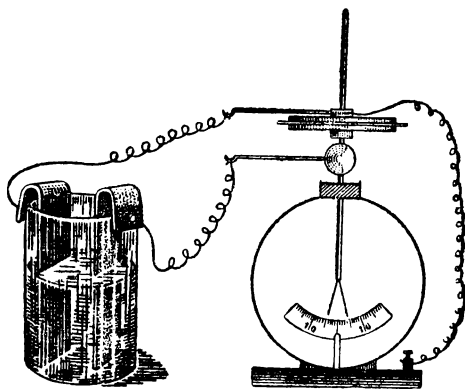


Рис. 135. К упражнению 81.6.

81.4. При измерении э. д. с. источников при помощи вольтметра мы всегда делаем некоторую ошибку, так как через вольтметр течет некоторый, хотя и очень малый, ток, и поэтому источник, строго говоря, не разомкнут, а замкнут на вольтметр. Пусть внутреннее сопротивление элемента Грене равно 1 ом , его э. д. с. $1,8 \text{ в}$, а сопротивление вольтметра 179 ом . Какую ошибку мы при этом совершаем?

81.5. Можно ли точно измерить э. д. с. при помощи электрометра? Как нужно присоединить электрометр к элементу для этого?

81.6. Изменяются ли показания электрометра, соединенного с гальваническим элементом, если параллельно с ним включить конденсатор, как показано на рис. 135? Будет ли иметь значение емкость конденсатора?

81.7. При измерении напряжения некоторого элемента при помощи электрометра с конденсатором (рис. 136, а) найдено, что электрометр, отъединенный от элемента, после снятия диска показывает 500 в (рис. 136, б). При этом известно, что емкость конденсатора при удалении диска уменьшается в 250 раз. Чему равно напряжение элемента?

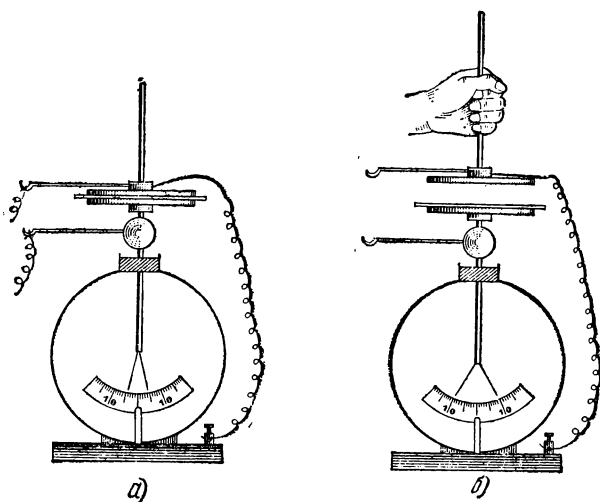


Рис. 136. К упражнению 81.7.

§ 82. Соединение источников тока. Очень часто источники соединяют между собой для совместного питания цепи.

Составим цепь гальванических элементов так, чтобы положительный полюс каждого предыдущего соединялся с отрицательным полюсом последующего (рис. 137). Если цепь составлена, например, из элементов Вольта, то медный электрод каждого элемента имеет потенциал на 1,1 вольты выше, чем цинковый электрод того же элемента. Медный и цинковый электроды двух соседних элементов соединены проводником и, следовательно, имеют одинаковый потенциал. Поэтому разность потенциалов между медью второго элемента и цинком первого будет уже $1,1 + 1,1 = 2,2$ в и т. д. Если всего имеется n элементов, то напряжение между крайними электродами будет в n раз больше, чем у одного элемента. Соединение элементов, при котором положительный полюс каждого предыдущего элемента соединяется с отрицательным полюсом последующего, называется п о с л е-

д о в а т е л ь н ы м, а группа соединенных элементов — б а т а р е е й элементов.

Таким образом, при *последовательном соединении э. д. с. батареи равна сумме э. д. с. отдельных источников, составляющих батарею*. Это верно, конечно, и в том случае, когда отдельные источники имеют различные э. д. с.

Вследствие этого свойства гальванические элементы весьма удобны для воспроизведения различных напряжений. Так, например, для получения напряжения в 1,1 в нам достаточно погрузить в раствор серной кислоты медную и цинковую пластины. Для получения больших напряжений мы

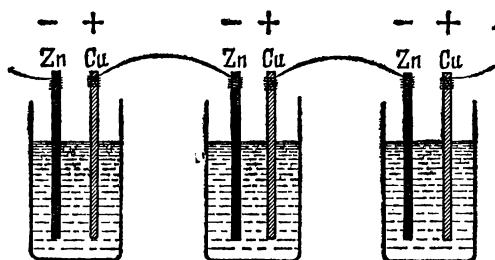


Рис. 137. Последовательное соединение гальванических элементов.

можем соединить элементы последовательно. Этим обстоятельством пользуются на практике для градуировки электрометров: присоединяя к электрометру различное количество последовательно соединенных элементов, мы можем непосредственно определить, какому напряжению в вольтах соответствуют различные отклонения его листочка.

При последовательном соединении проводников их сопротивления складываются (§ 50). Поэтому и *внутреннее сопротивление батареи из последовательно соединенных источников равняется сумме внутренних сопротивлений отдельных источников*.

Наоборот, соединяя о д н о и м е н н ы е полюсы двух элементов одинакового типа (включение «навстречу друг другу», рис. 138, а), мы не получаем между крайними полюсами никакого напряжения. Если же мы включим «навстречу друг другу» источники с различными э. д. с., то напряжение между крайними полюсами будет равно р а з н о с т и э. д. с. обоих источников, причем положительным полюсом

такой батареи будет положительный полюс источника с большей э. д. с. Это остается справедливым и в том случае, если размеры обоих элементов как угодно различны, так как напряжение гальванических элементов совершенно не зависит от их размеров; оно определяется только материалом пластин и примененной жидкостью (§ 76).

Если мы соединим проводником два свободных одноименных электрода элементов, соединенных «навстречу друг другу» (рис. 138, б), то в образовавшейся замкнутой цепи тока не будет, если э. д. с. обоих элементов равны, так как в этом

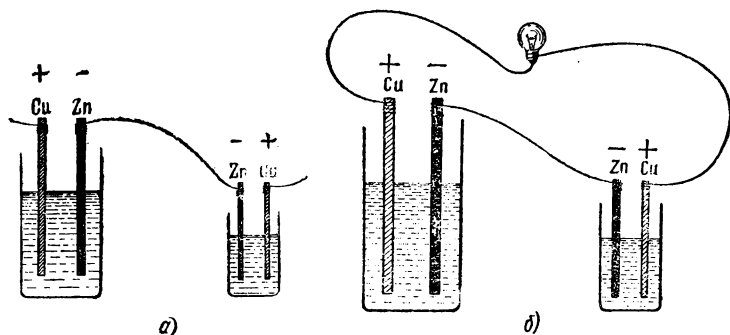


Рис. 138. Два гальванических элемента соединены «навстречу друг другу»: а) цепь разомкнута; б) цепь замкнута на лампочку.

случае результирующая э. д. с., равная разности обеих э. д. с. отдельных элементов, равна нулю. Если же э. д. с. этих элементов различны, то результирующая э. д. с. не равна нулю, и в цепи будет идти ток. Источником этого тока будет элемент с большей э. д. с., а элемент с меньшей э. д. с. будет представлять собой для него просто нагрузку (электролитическую ванну).

Соединим теперь между собой все положительные и все отрицательные электроды двух или нескольких элементов или иных источников тока и присоединим внешнюю цепь (нагрузку) к общим зажимам составленной таким образом батареи элементов (рис. 139). Такое соединение источников тока для совместного питания одной и той же цепи называют **параллельным**.

Если все параллельно соединенные элементы имеют одинаковую э. д. с., то такова же будет и э. д. с. всей батареи. Если же эти элементы имеют различные э. д. с., то э. д. с.

батареи равна на и б о л ь ш е й из э. д. с. параллельно соединенных элементов.

Между этими двумя случаями есть, однако, существенное различие в следующем отношении. Если э. д. с. всех элементов одинаковы, то при разомкнутой внешней цепи ток через цепь, состоящую только из элементов, идти не будет, и ни один из этих элементов не будет расходоваться.

Если же э. д. с. их различны, то и при разомкнутой внешней цепи более сильные элементы будут посылать ток через более слабые и изнашиваться. При работе такой батареи на внешнюю сеть также часть тока от более сильных элементов будет отвлекаться и идти

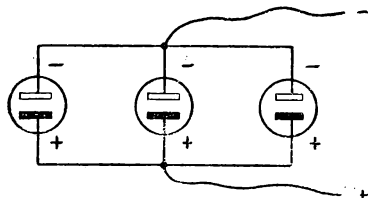


Рис. 139. Параллельное соединение источников тока.

через более слабые. Это невыгодно, и потому на практике всегда соединяют параллельно только элементы содинаковой э. д. с.

Сопротивление параллельно соединяемых элементов может быть одинаковым или различным. Общее сопротивление батареи, которое мы можем вычислить по формуле для определения параллельно соединенных сопротивлений (3,10), всегда меньше, чем сопротивление каждого из элементов в отдельности. В частности, внутреннее сопротивление батареи из n элементов с одинаковым внутренним сопротивлением в n раз меньше, чем сопротивление отдельного элемента.

У п р а ж н е н и я. 82.1. Чему равно напряжение на крайних полюсах батареи из десяти последовательно соединенных элементов Грене?

82.2. «Вольтов столб», построенный Вольта в числе других многочисленных приборов, собирают так: на медный кружок накладывают смоченный в растворе серной кислоты суконный кружок, на суконный кружок помещают цинковый кружок, затем опять медный, суконный, цинковый и т. д. Чему равно напряжение между крайними кружками вольтова столба, содержащего 50 медных и 50 цинковых пластинок?

82.3. Элемент Вольта и элемент Грене соединены навстречу друг другу (например, отрицательный полюс одного элемента соединен с отрицательным же полюсом другого). Чему равно напряжение между крайними полюсами этой батареи?

82.4. Два совершенно одинаковых гальванических элемента замкнуты друг на друга, как показано на рис. 140. Есть ли в этой цепи ток?

Чему равно напряжение на зажимах каждого из элементов? Как изменится ответ, если элементы имеют одинаковые э. д. с., но разное внутреннее сопротивление?

У к а з а н и е. Для решения пользоваться формулой (6,4); сопротивлением соединительных проводов пренебречь.

П р и м е ч а н и е. Проверьте этот результат на опыте.

82.5. Два элемента с одинаковой э. д. с. соединены одноименными полюсами (навстречу друг другу), а их свободные полюсы (тоже одноименные) замкнуты на внешнюю цепь (рис. 141). Есть ли в этой цепи ток? Чему равно напряжение на зажимах каждого из элементов?

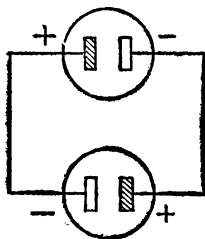


Рис. 140. К упражнению 82.4.

82.6. Элемент Грене с внутренним сопротивлением $0,4\text{ ом}$ замыкают на внешнюю цепь, имеющую сопротивление $0,5\text{ ом}$. Вычислите величину тока в цепи.

82.7. Динамомашина, развивающая напряжение 120 в на разомкнутых зажимах, питает 100 параллельно соединенных одинаковых лампочек накаливания сопротивлением 60 ом каждая. Внутреннее сопротивление динамомашины $0,05\text{ ом}$, а сопротивление подводящих проводов $0,1\text{ ом}$. Вычислите величину тока в проводах.

82.8. Напряжение, измеренное на зажимах разомкнутого элемента, равно $1,8\text{ в}$, а при замыкании этого элемента на сопротивление 1 ом в цепи возникает ток в 1 а . Чему равно внутреннее сопротивление элемента?

82.9. Некоторый элемент, будучи замкнут на $4,5\text{ ом}$, дает в цепи ток в $0,2\text{ а}$, а будучи замкнут на 10 ом — в $0,1\text{ а}$. Вычислите э. д. с. элемента и его внутреннее сопротивление.

82.10. Напряжение между полюсами разомкнутой электрической машины равно $10\,000\text{ в}$. Однако при замыкании машины на гальванометр последний показывает ток всего в $0,1\text{ ма}$. Чему равно внутреннее сопротивление машины? Сопротивлением гальванометра можно пренебречь, так как оно значительно меньше внутреннего сопротивления машины.

82.11. Два элемента Даниеля, с э. д. с. $1,1\text{ в}$ у каждого, соединены параллельно. Чему равна э. д. с. такой батареи?

82.12. Пять элементов, с внутренним сопротивлением 1 ом у каждого, соединены последовательно. Чему равно внутреннее сопротивление батареи?

82.13. Три элемента, с внутренним сопротивлением $1,5\text{ ом}$ у каждого, соединены параллельно. Найдите внутреннее сопротивление батареи.

82.14. Два элемента, каждый из которых обладает э. д. с. $1,1\text{ в}$ и внутренним сопротивлением 1 ом , соединены последовательно и замкнуты на внешнюю цепь с сопротивлением $2,4\text{ ом}$. Какова величина тока в цепи?

82.15. Три элемента, с э. д. с. $1,1\text{ в}$ и внутренним сопротивлением $0,5\text{ ом}$ у каждого, соединены параллельно и питают лампочку, сопротивление которой $0,6\text{ ом}$. Какой ток проходит через лампочку?

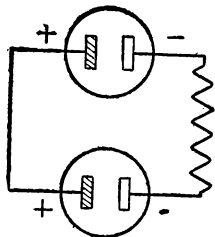


Рис. 141. К упражнению 82.5.

82.16. Сухая батарейка для карманных фонарей содержит три маленьких элемента Лекланше, соединенных последовательно. Лампочка карманного фонаря требует напряжения 3,5 в и берет ток в 0,2 а. Вычислите внутреннее сопротивление батарейки, зная, что при замыкании ее на лампочку последняя горит с нормальным накалом.

82.17. Два одинаковых аккумулятора соединяются параллельно. Как изменяется э. д. с., внутреннее сопротивление и емкость?

82.18. Два одинаковых аккумулятора соединяются последовательно. Как изменяется э. д. с., внутреннее сопротивление и емкость?

82.19. На рис. 142 изображено так называемое смешанное соединение шести источников тока (гальванических элементов). Полная батарея представляет собой три параллельно соединенные батареи I, II, III, каждая из которых содержит два элемента, соединенных последовательно. Каковы э. д. с. и сопротивление этой батареи, если для каждого элемента в отдельности э. д. с. равна 1,1 в, а сопротивление 1,5 ом?

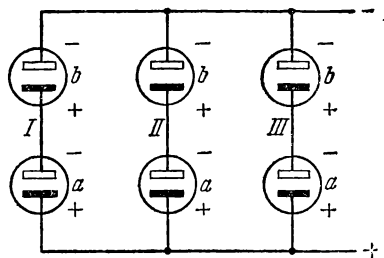


Рис. 142. К упражнению 82.19. Смешанное соединение источников тока.

§ 83. Термоэлементы. Вернемся снова к рассмотрению цепи, составленной из одних только проводников 1-го класса. Мы видели в § 75, что электрический ток в такой цепи не возникает, т. е. сумма всех э. д. с., возникающих на границах соприкосновения различных проводников, равна нулю (правило Вольта). Это верно, однако, только в том случае, если все спаи (места соединения проводников) находятся при одной и той же температуре. Положение станет совершенно иным, если мы нагреем какое-нибудь из мест соединения, например *a*, поднесем к нему горелку (рис. 143). В этом случае гальванометр показывает наличие в цепи электрического тока, протекающего все время, пока существует разность температур между спаями *a* и *b*. Если переместить горелку так, чтобы нагревалось место соединения *b*, а *a* оставалось холодным, то будет, как и прежде, наблюдаться ток, но противоположного направления. Эти опыты показывают, что величина э. д. с., возникающей на границе соприкосновения двух металлов, сама зависит от температуры. В горячем месте соединения она больше, чем в холодном. Поэтому, если места соединения находятся при разных температурах, то сумма всех действующих в них э. д. с. уже не

равна нулю, и в цепи возникает некоторая результирующая э. д. с., поддерживающая в ней длительный электрический ток.

Таким образом, в цепи, составленной из различных металлов, места спаев которых находятся при неодинаковых температурах, действует э. д. с., называемая термоэлектродвижущей силой (термо-э. д. с.). Описанное явление было открыто в 1821 г. Зеебеком и получило название термоэлектричества, а всякую комбинацию разнородных проводников первого класса, образующих замкнутую цепь, называют термоэлементом.

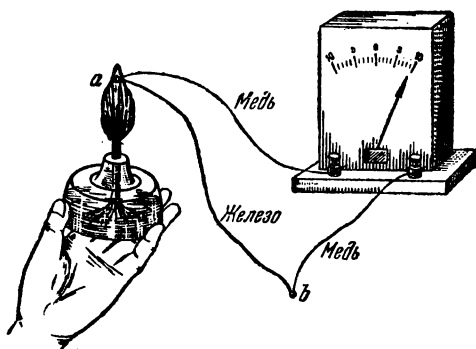


Рис. 143. Цепь, состоящая из железного и двух медных проводов и гальванометра: *a* и *b* — спай.

Располагая более чувствительным гальванометром, мы можем обнаружить заметный ток при меньшей разности температур спаев *a* и *b*. Достаточно поместить один из спаев, *a*, в горячую воду или даже просто зажать его в пальцах, оставив второй при комнатной температуре, чтобы возник ток в цепи. Если оба спая поместить в воду одной и той же температуры, то температура спаев сравняется, и ток прекратится. Если теперь, оставляя спай *b* в горячей воде, вынуть спай *a* и охладить его, то в цепи опять появится ток, идущий в обратном направлении. Точно так же термоэлектрический ток возникает в том случае, если один из спаев находится при комнатной температуре, а другой при более низкой, например, в твердой углекислоте («сухой лед»). Таким образом, непосредственная причина возникновения термо-э. д. с. есть разность температур обоих спаев.

При этом температура тех участков цепи, которые состоят из однородного по составу материала, не играет практически никакой роли. Если температура обоих спаев одинакова, то и полная э. д. с. в цепи равна нулю, независимо от того, находятся ли оба спая при очень высокой температуре или при очень низкой.

Опыт показывает, что электродвижущая сила термоэлементов, вообще говоря, невелика и приблизительно пропорциональна разности температур спаев. В приведенной ниже таблице 6 даны термоэлектродвижущие силы в вольтах для некоторых пар металлов, при разности температур спаев в 100°C . Знак + обозначает, что ток идет через горячий спай от первого металла ко второму.

Т а б л и ц а 6
Термоэлектродвижущие силы некоторых пар
(в вольтах на 100°C)

Сурьма-висмут	—0,011
Медь-железо	+0,0010
Медь-константан	—0,0047
Серебро-константан	—0,0041
Серебро-никель	—0,0024
Платина-платинородий (сплав 90% платины и 10% родия)	—0,0010

Существование э. д. с. и тока в цепи проводников 1-го класса при наличии разности температур в двух точках цепи не стоит, конечно, в противоречии с законом сохранения энергии.

Для поддержания разности температур в цепи, по которой идет ток, необходимо к ней подводить тепло, и за счет этого тепла и совершается работа в термоэлектрической цепи.

Таким образом, термоэлемент представляет собой тепловую машину, преобразующую тепловую энергию в энергию электрического тока. Горячий спай играет роль, аналогичную котлу или нагревателю паровой машины, а холодный спай играет роль охладителя (т. е. «Теплота»). Если к горячему спаю, находящемуся при абсолютной температуре T_1 , мы подводим количество теплоты Q_1 , то часть этого запаса тепла Q_2 перейдет к холодному спаю, находящемуся при абсолютной температуре T_2 , а разность $Q_1 - Q_2$ преобразуется в энергию тока. Коэффициент полезного действия термоэлемента, т. е. доля подведенного тепла, преобразуемая в электрическую форму энергии, есть

$$k = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (6.6)$$

Мы знаем (т. I, «Теплота»), что для тепловой машины в самом лучшем случае (если бы не было никаких потерь тепла), к. п. д. мог бы иметь значение

$$\eta_{\text{макс}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (6,7)$$

Вообще же $\eta < \eta_{\text{макс}}$. Это верно и для термоэлементов.

§ 84. Термоэлементы в качестве генераторов. Мы видели в предыдущем параграфе, что термоэлемент представляет собой тепловой генератор электрического тока, т. е. прибор, в котором часть тепловой энергии, нагревающей горячий спай, превращается в электрическую энергию; остальная часть тепла отдается холодным спаем в окружающую среду. Однако вследствие большой теплопроводности металлов поток тепла, переходящего путем теплопроводности от горячего спаю к холодному, значительно больше, чем доля тепла, превращаемая в электрическую энергию. К тому же из электрической энергии, создаваемой термоэлементом, некоторая доля превращается в самом термоэлементе в тепло и не может быть использована. Обусловленные этими причинами бесполезные затраты тепла настолько велики, что коэффициент полезного действия термоэлементов из металлических проволок не превышает 0,5%, тогда как для идеальной тепловой машины мы должны были бы по формуле (6,7) ожидать при разности температур в 300 градусов к. п. д. около 50%. Поэтому металлические термоэлементы совершенно непригодны в качестве технических генераторов тока. Однако термоэлектродвижущие силы могут возникать также в цепях, содержащих места соприкосновения металлов с некоторыми специально изготовленными полупроводниками. При наличии разности температур между такими спаями возникают электродвижущие силы, которые в десятки раз превышают э. д. с. чисто металлических термоэлементов и достигают 0,1 в на 100° разности температур. Вместе с тем вследствие малой теплопроводности полупроводников соотношение между теплотой, превращаемой в электрическую энергию, и теплотой, теряемой путем теплопроводности и выделяемой током, становится гораздо более благоприятным. Коэффициент полезного действия полупроводниковых термоэлементов уже в настоящее время достигает 7% и может быть еще повышен. Полупроводниковые термоэлементы позволяют уже реально поставить вопрос о со-

здании достаточно экономичных технических тепловых генераторов тока, в которых тепловая энергия непосредственно превращается в электрическую.

Для сравнения можно указать, что в паровозах топливо используется с к. п. д. от 4% до 8%, а в паровых машинах малой мощности к. п. д. равен 10%. Впрочем, в лучших паровых электростанциях к. п. д. достигает 30%, а в двигателях внутреннего сгорания, работающих на высококачественном жидком топливе, он доходит до 40—50%.

Тщательное изучение свойств полупроводников показало, что существуют полупроводники двух различных типов. В одних ток в горячем спае идет от металла к полупроводнику, в других — от полупроводника к металлу. Поэтому выгодно строить полупроводниковые термоэлементы так, как показано на рис. 144. При этом э. д. с., создаваемые на контактах каждого из полупроводников с металлом, складываются. Соединяя последовательно нужное количество таких термоэлементов, мы получаем батарею с достаточно высокой э. д. с.

На рис. 145 изображен термоэлектрогенератор, построенный в лаборатории полупроводников Академии наук СССР в Ленинграде. Источником тепла здесь служат горячие газы, выходящие из стекла керосиновой лампы; они проходят внутри вертикальной трубки, помещенной над стеклом, и подогревают внутренние спаи термоэлементов, расположенных по радиусам трубки. Наружные спаи охлаждаются комнатным воздухом, для усиления охлаждения они соединены с металлическими пластинами радиатора. В этом устройстве температура внутренних спаев достигает 300—350 градусов, а температура наружных не превышает 60 градусов. Этот генератор дает электрическую энергию, достаточную для питания радиоприемника.

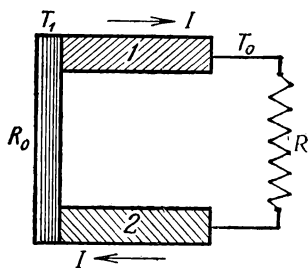


Рис. 144. Схема устройства полупроводникового термоэлемента. 1 и 2 — полупроводниковые стержни разных типов; R_0 — соединительный металлический мостик, подогреваемый внешним источником тепла; R — внешняя цепь, в которой используется электрическая энергия. Внешняя цепь присоединяется к холодным концам стержней 1 и 2, охлаждаемым воздухом или проточной водой. Ток идет в направлении стрелок I .

В настоящее время уже построены и более мощные генераторы, в которых подогрев горячих спаев производится горелкой типа примуса или керогаза. Они дают энергию, достаточную для питания приемно-передающей радиостанции «Урожай». Нет оснований сомневаться в том, что в ближайшие годы будут созданы и еще более мощные и экономичные термоэлектрогенераторы, которые будут давать энергию для освещения, работы моторов и других технических целей.

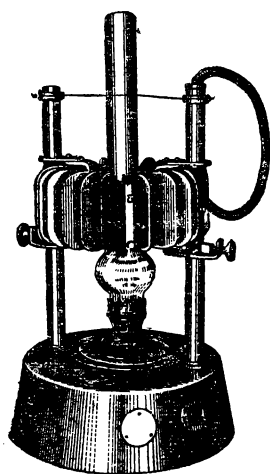


Рис. 145. Термоэлектрогенератор ТГК-3.

§ 85. Измерение температуры с помощью термоэлементов. Самым важным применением металлических термоэлементов является их использование для измерения температуры. Если один из спаев термоэлемента поддерживать при неизменной температуре, например, при комнатной или, в случае более точных измерений, при температуре

тающего льда, то э. д. с. элемента будет зависеть исключительно от температуры второго спая. Если такой термоэлемент проградуйровать, т. е. определить точную зависимость э. д. с. от разности температур спаев, то,

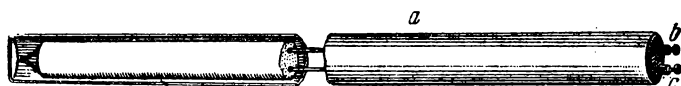


Рис. 146. Техническая термопара, употребляемая для измерения температуры топочных газов. Она состоит из платиновой проволоки и проволоки из платинородия (сплава 90% платины и 10% родия). Спай обеих проволок, помещаемый в зону высокой температуры («горячий спай»), для предотвращения химического действия горячих газов на термопару защищен форфоровой трубкой *a*. Свободные концы проволок подведены к зажимам *b* и *c*, которые присоединяются к гальванометру, проградуированному непосредственно на градусы Цельсия.

измеряя э. д. с., развивающуюся в элементе, можно точно определить температуру тела, которого касается второй спай. На рис. 146 показано устройство технического термоэлемента («термопары»).

Термопары для измерения температуры обладают перед обычными термометрами большими преимуществами. При помощи термопар можно измерить весьма высокие температуры (до 2000°C и даже выше), при которых применение жидкостных термометров совершенно невозможно. Точно так же термопары можно с успехом применять и для очень низких температур, при которых все известные термометрические жидкости замерзают. С термопарами можно получить весьма высокую точность измерения температур, определяемую точностью измерения э. д. с. и на много превышающую точность жидкостных термометров. Очень существенно, что термопары гораздо быстрее указывают изменения температуры. Громадное значение в технических установках имеет и то обстоятельство, что термометры дают возможность измерения температур на значительных расстояниях. Гальванометр может быть установлен даже на расстоянии нескольких километров от термоэлемента. Поэтому термопары весьма часто применяются в технических контрольно-измерительных приборах и автоматах (самопишущих термометрах, пожарных сигнализаторах и т. п.), а также и при научных исследованиях. Особый научный интерес представляет применение термопар при измерении очень малых разностей температур. Применяя чувствительные устройства для измерения малой разности потенциалов, мы можем с помощью термопар измерить разности температур вплоть до миллионных долей градуса.

Благодаря этой высокой чувствительности такие устройства могут быть использованы для измерения и невидимости различных видов видимого или невидимого излучения по производимому им тепловому действию (нагреванию). Направляя лучистый поток на один из спаев термопары, мы вызовем его нагревание, тем большее, чем интенсивнее лучистый поток. Измеряя возникающую разность температур, мы можем сделать заключение об интенсивности излучения.

Как мы уже указывали (табл. 6), величина термо-э. д. с., развивающаяся в отдельном термоэлементе, очень мала. Поэтому для получения более значительных э. д. с. отдельные термоэлементы часто соединяют в термобатареи. Схема устройства термобатареи изображена на рис. 147. Стержни или проволоки из двух различных металлов заштрихованы различно. Все спаи a поддерживаются при

одной температуре, а все спаи b — при другой. Отдельные термоэлементы оказываются соединенными последовательно, и поэтому э. д. с. батареи из n элементов в n раз больше, чем у одного термоэлемента.

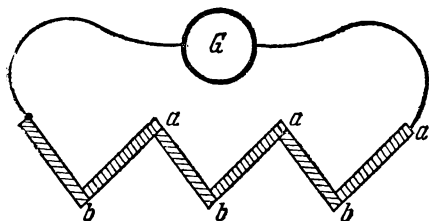


Рис. 147. Схема термобатареи; G —гальванометр.

Такие термобатареи применяются главным образом для измерения интенсивности какого-нибудь видимого или невидимого излучения по производимому им нагреванию. Употребляющиеся для этого термоэлектрические

радиометры или термостолбики содержат маленькую термобатарею, часть спаев которой, например все четные спаи, обращена в сторону излучения,

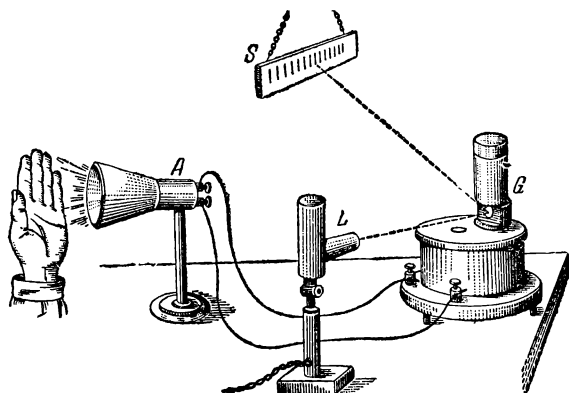


Рис. 148. Термoeлектрический радиометр. Тепловое излучение (от руки экспериментатора) падает на термобатарею, содержащуюся в A ; возникающий термоток отклоняет зеркальце чувствительного гальванометра G , и зайчик от лампы L , отраженный от зеркальца на шкалу S , изменяет свое положение.

а все нечетные находятся с задней стороны прибора и не подвергаются действию излучения. Падающее на открытые спаи излучение нагревает их, и температура защищенных и незащищенных спаев оказывается различной, отчего в галь-

ванометре, присоединенном к термостолбику, возникает термоток. Чувствительность таких приборов может быть сделана весьма высокой, например, можно без труда обнаружить тепловое излучение человеческого тела (рис. 148).

Таким образом, чувствительные термопары могут служить для обнаружения даже не очень сильно нагретых тел, находящихся на некотором — иногда довольно значительном — расстоянии от наблюдателя. Такие приборы имеют не только очень важные чисто научные применения, но и лежат в основе применяющихся на практике методов так называемой *термопеленгации*, т. е. обнаружения на расстоянии (например, с самолетов) городов, заводов, парходов и т. п. по их тепловому излучению.

У п р а ж н е н и я. 85.1. Один из спаев котельной термопары (платина — платинородий) помещен в печь, а другой спай находится при температуре 0°C . Гальванометр, соединенный с термопарой, показывает ток $1,2 \cdot 10^{-7} \text{ а}$. Какова температура печи, если сопротивление термопары 10 ом , а сопротивление гальванометра, включая соединительные провода, 90 ом ? Использовать таблицу 6.

85.2. При помощи современных чувствительных вольтметров можно легко измерить э. д. с. в 10^{-7} в . С какой точностью (в долях градуса) можно измерить температуру термоэлементом медь — константан, соединенным с таким вольтметром?

85.3. Для измерения температур порядка 1000°C и выше обычно пользуются термопарой из платины — платинородия. Для измерения более низких температур часто берут термопары из меди — константана. Почему? Если воспользоваться поочередно этими двумя термопарами при одном и том же гальванометре и при одинаковом сопротивлении обеих термопар, как будут разниться показания гальванометра в обоих случаях?

ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ЧЕРЕЗ МЕТАЛЛЫ

§ 86. Электронная проводимость металлов. Прохождение тока через металлы (проводники 1-го класса) не сопровождается химическим изменением их (§ 40). Это обстоятельство заставляет предполагать, что атомы металла при прохождении тока не перемещаются от одного участка проводника к другому. Это предположение было подтверждено тщательными опытами Рике. Рике составил цепь, в которую входили три тесно прижатых друг к другу цилиндра, из которых два крайних были медные, а средний алюминиевый. Через эти цилиндры пропускался электрический ток в течение весьма длительного времени (больше года), так что общее количество протекшего электричества достигло огромной величины (свыше 3 000 000 к). Производя затем тщательный анализ места соприкосновения меди и алюминия, Рике не мог обнаружить следов проникновения одного металла в другой. Таким образом, при прохождении тока через металлы атомы металла не перемещаются вместе с током. Каким же образом происходит перенос зарядов при прохождении тока через металл?

Согласно представлениям электронной теории и, которыми мы неоднократно пользовались, отрицательные и положительные заряды, входящие в состав каждого атома, существенно отличаются друг от друга. Положительный заряд связан с самим атомом и в обычных условиях неотделим от основной части атома (его ядра). Отрицательные же заряды — электроны, обладающие определенным зарядом и массой, почти в 2000 раз меньшей, чем масса самого легкого атома — водорода, сравнительно легко могут быть отделены от атома; атом, потерявший электрон,

образует положительно заряженный ион. В металлах всегда есть значительное количество «свободных», отделившихся от атомов электронов, которые блуждают по металлу, переходя от одного иона к другому. Эти электроны под действием электрического поля легко перемещаются по металлу. Атомы же (или ионы) составляют остов металла, образуя его кристаллическую решетку (т. I, «Теплота»).

Одним из наиболее убедительных явлений, обнаруживающих различие между положительным и отрицательным электрическими зарядами в металле, является упомянутый в § 9 ф о т о э л е к т р и ч е с к и й э ф ф е к т, показывающий, что электроны сравнительно легко могут быть вырваны из металла, тогда как положительные заряды крепко связаны с веществом металла. Так как при прохождении тока атомы, а следовательно, и связанные с ними положительные заряды не перемещаются по проводнику, то переносчиками электричества в металле следует считать свободные электроны. Непосредственным подтверждением этих представлений явились важные опыты, выполненные впервые в 1912 г. Л. И. Мандельштамом¹⁾ и Н. Д. Папалекси²⁾, но не опубликованные ими. Четыре года спустя (1916 г.) Толмен и Стюарт опубликовали результаты своих опытов, оказавшихся аналогичными опытам Мандельштама и Папалекси.

При постановке этих опытов исходили из следующей мысли. Если в металле есть свободные заряды, обладающие массой, то они должны подчиняться закону инерции (т. I, «Механика»). Быстро движущийся, например, слева направо, проводник представляет собой совокупность движущихся в этом направлении атомов металла, которые увлекают вместе с собой и свободные заряды. Когда такой проводник внезапно останавливается, то останавливаются входящие в его состав атомы; свободные же заряды по инерции должны продолжать движение слева направо, пока различные помехи (столкновения с остановившимися атомами) не остановят их. Происходящее явление подобно наблюдаемому при внезапной остановке трамвая, когда «свободные», не прикрепленные к вагону, предметы и люди по инерции некоторое время продолжают двигаться вперед. Таким

¹⁾ Леонид Исакович Мандельштам (1879—1944) — советский академик.

²⁾ Николай Дмитриевич Папалекси (1880—1947) — советский академик.

образом, краткое время после остановки проводника свободные заряды в нем должны двигаться в одну сторону. Но движение зарядов в определенную сторону есть электрический ток. Следовательно, если наши рассуждения справедливы, то после внезапной остановки проводника надо ожидать появления в нем кратковременного тока. Направление этого тока позволит судить о знаке тех зарядов, которые двигались по инерции; если слева направо будут двигаться положительные заряды, то обнаружится ток, направленный слева направо; если же в этом направлении будут двигаться отрицательные заряды, то должен наблюдаться ток, имеющий направление справа налево. Возникающий ток зависит от величины зарядов и их способности более или менее долго сохранять по инерции свое движение, несмотря на помехи, т. е. от их массы. Таким образом, этот опыт не только позволяет проверить предположение о существовании в металле свободных зарядов, но и определить их знак, величину заряда и массу (точнее, отношение заряда к массе e/m).

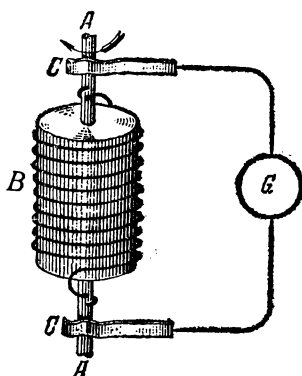


Рис. 149. Опыт для исследования природы электрического тока в металлах (очень грубая схема).

В практическом осуществлении опыта оказалось более удобным использовать не поступательное, а вращательное движение проводника. Схема такого опыта приведена на рис. 149. На катушке, в которую вделаны две изолированные друг от друга полуоси AA , укреплена проволоочная спираль B . Концы спирали припаяны к обеим половинам оси и при помощи скользящих контактов C («щеток») присоединены к чувствительному гальванометру G . Катушка приводилась в быстрое вращение и затем внезапно тормозилась. Опыт действительно обнаружил, что при этом в гальванометре возникает электрический ток¹⁾. Направление

¹⁾ Трудности этого опыта лежат в необходимости устранить посторонние причины, которые могут вызвать токи совсем другого происхождения и настолько сильные, что они способны замаскировать ожидаемый эффект.

этого тока показало, что по инерции движутся отрицательные заряды. Измерив величину заряда, переносимого этим кратковременным током, можно было найти отношение величины свободных зарядов к их массе. Отношение это оказалось равным $e/m = 1,8 \cdot 10^8$ к на 1 г, что вполне хорошо совпадает со значением такого отношения для электронов, определяемым различными другими способами.

Итак, опыты показывают, что в металлах имеются свободные электроны. Эти опыты являются одним из наиболее важных подтверждений электронной теории металлов. *Электрический ток в металлах представляет собой упорядоченное движение свободных электронов* (в отличие от беспорядочного теплового движения, всегда имеющегося в проводнике).

Упражнения. 86.1. Металлический незаряженный диск приводится в быстрое вращение, и таким образом, становится «центрифугой для электронов». Между центром и периферией диска возникает разность потенциалов. Каков будет знак этой разности (рис. 150)?

86.2. Через серебряную проволоку сечением в 1 мм^2 проходит ток силой в 1 а. Вычислите среднюю скорость упорядоченного движения электронов в этой проволоке, полагая, что каждый атом серебра дает один свободный электрон. Удельный вес серебра равен $10,5 \text{ г/см}^3$, его атомный вес 108; число атомов в одном грамм-атоме (число Авогадро) $N = 6,02 \cdot 10^{23}$.

86.3. Какое количество электронов должно проходить через поперечное сечение провода каждую секунду, чтобы в проводе шел ток в 2 а? Заряд 1 электрона равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ к.

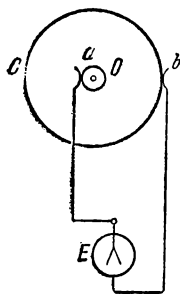


Рис. 150. К упражнению 86.1. O — ось вращения диска C ; a и b — контакты; E — электрметр.

§ 87. Строение металлов. Как свободные электроны, входящие в состав металла, так и его атомы и ионы находятся в непрерывном беспорядочном движении (т. I, «Теплота»). Энергия этого движения и представляет собою тепловую энергию тела. Движение атомов и ионов, образующих кристаллическую решетку, состоит лишь в колебаниях около своих положений равновесия. Свободные же электроны могут двигаться по всему объему металла.

Если внутри металла нет электрического поля, то движение электронов совершенно хаотично; в каждый момент скорости различных электронов имеют различную величину

и всевозможные направления (рис. 151, а). Электроны в этом смысле подобны обычному газу, и поэтому их часто и называют «электронным газом». Такое тепловое движение не вызовет, очевидно, никакого тока, так как, вследствие полной хаотичности, в каждом направлении будет двигаться столько же электронов, сколько и в противоположном, и поэтому суммарный заряд, перемещающийся через любую площадку внутри металла, будет равен нулю.

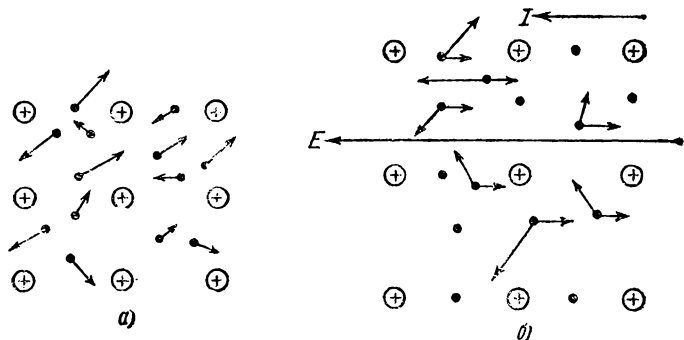


Рис. 151. а) В отсутствие электрического поля скорости электронов в металле направлены совершенно хаотически. Точки — электроны, кружки — положительные ионы, стрелки — векторы скорости электронов. б) При наличии электрического поля E в металле скорости всех электронов получают изменение, указанное векторами, которые направлены противоположно полю E ; возникает электрический ток.

Дело, однако, изменится, если мы приложим к концам проводника разность потенциалов, т. е. создадим внутри металла электрическое поле. Пусть напряженность поля равна E . Тогда на каждый из электронов действует сила eE (e — заряд электрона), направленная вследствие отрицательного заряда электронов противоположно полю. Благодаря этому электроны получают дополнительные скорости, направленные все в одну сторону (рис. 151, б). Теперь уже движение электронов не будет вполне хаотичным: наряду с беспорядочным тепловым движением электронный газ будет перемещаться как целое, и поэтому возникнет электрический ток. Выражаясь образно, можно сказать, что ток в металлах представляет собой «электронный ветер», вызванный внешним полем.

§ 88. Причина электрического сопротивления. Теперь мы можем понять, как об этом уже говорилось в § 46, почему все металлы оказывают с о п р о т и в л е н и е электрическому току, т. е. почему для поддержания длительного тока на концах металлической проволоки нужно все время поддерживать разность потенциалов. Если бы электроны не испытывали никаких помех в своем движении, то, будучи приведены в упорядоченное движение, они двигались бы по инерции, без действия электрического поля, неограниченно долго. Однако в действительности электроны испытывают столкновения с атомами и ионами. При этом электроны, обладавшие перед соударением некоторой скоростью упорядоченного движения, после соударения будут отскакивать в произвольных, случайных направлениях, и упорядоченное движение электронов (электрический ток) будет превращаться в беспорядочное (тепловое) движение: после устранения электрического поля ток очень скоро исчезнет. Для того чтобы получить длительный ток, нужно после каждого соударения все время вновь и вновь гнать электроны в определенном направлении, а для этого нужно, чтобы на электроны все время действовала сила, т. е. чтобы внутри металла было электрическое поле.

Чем большая разность потенциалов поддерживается на концах металлической проволоки, тем сильнее внутри нее электрическое поле, тем больше ток в проволоке. Количественный расчет, на котором мы не останавливаемся, показывает, что разность потенциалов и величина тока должны быть строго пропорциональны друг другу (закон Ома).

Двигаясь под действием электрического поля, электроны приобретают некоторую кинетическую энергию. При соударениях эта энергия частично передается ионам и атомам решетки, отчего они приходят в более интенсивное тепловое движение. Таким образом, при наличии тока все время происходит переход энергии упорядоченного движения электронов (тока) в энергию хаотического движения атомов, ионов и электронов, которая и представляет собой внутреннюю энергию тела; а это значит, что внутренняя энергия металла увеличивается. Этим объясняется выделение Джоулева тепла.

Резюмируя изложенное, можно сказать, что *причина электрического сопротивления заключается в том, что электроны при своем движении испытывают соударения*

с атомами и ионами металла. Эти соударения производят такой же результат, как и действие некоторой постоянной силы трения, стремящейся тормозить движение электронов.

Различие в электропроводности разных металлов обусловлено некоторыми различиями в числе свободных электронов в 1 см^3 металла и в условиях движения электронов, что сводится к различию в средней длине свободного пути, т. е. пути, проходимого в среднем электроном между двумя соударениями с атомами металла. Однако эти различия не очень значительны, вследствие чего электропроводность различных металлов отличается, как показывает таблица 2, всего лишь в несколько десятков раз; в то же время электропроводность даже худших из металлических проводников в сотни тысяч раз больше электропроводности хороших электролитов и в миллиарды раз превосходит электропроводность полупроводников.

Явление *с в е р х п р о в о д и м о с т и* (§ 49) означает, что в металле созданы условия, при которых электроны не испытывают сопротивления своему движению. Как уже упоминалось, мы еще не умеем объяснить, почему в некоторых металлах при низкой температуре возникают эти условия. Но из изложенного ясно, что для поддержания *д л и т е л ь н о г о* тока в сверхпроводнике *н е н у ж н о* наличия постоянной разности потенциалов. Достаточно каким-либо толчком привести электроны в движение, и тогда ток в сверхпроводнике будет существовать и после устранения разности потенциалов. Об этом опыте мы уже говорили в § 49.

§ 89. Поверхностная разность потенциалов. В § 87 мы говорили о том, что свободные электроны находятся внутри металла в непрерывном тепловом движении. Однако, не смотря на это, они *н е р а з л е т а ю т с я* из металла. Это свидетельствует о том, что есть какие-то силы, препятствующие их вылету, т. е. что на электроны, стремящиеся выйти за поверхность металла, в поверхностном слое действует электрическое поле, направленное от металла наружу (электроны отрицательны). Это значит, что *п р и п р о д в и ж е н и и* электрона *с к в о з ь* *п о в е р х н о с т н ы й* *с л о й* *м е т а л л а* *с о в е р ш а е т с я* *о п р е д е л е н н а я* *р а б о т а*, а следовательно, между внутренними точками металла и наружными точками существует некоторая разность потенциалов. Она называется

поверхностной разностью потенциалов. Величина ее зависит от природы металла.

Обозначив поверхностную разность потенциалов через φ , найдем, что для продвижения электрона, заряд которого равен e , сквозь поверхность необходимо совершить работу $e \cdot \varphi$ (работа выхода). Если кинетическая энергия электрона меньше этой величины, то он не сможет прорваться сквозь поверхность и останется внутри металла. Таким образом, условие, при котором электрон может вылететь из металла, имеет вид:

$$\frac{1}{2} m \cdot v_n^2 \geq e \cdot \varphi. \quad (7,1)$$

Здесь m — масса электронов, v_n — проекция тепловой скорости на направление удерживающей силы, т. е. на нормаль к поверхности. При комнатных температурах энергия теплового движения электронов в несколько десятков раз меньше работы выхода, и поэтому практически все электроны удерживаются поверхностным полем внутри металла.

Работу выхода часто измеряют не в эргах, а в «электрон-вольтах» (эв). Один электронвольт, т. е. энергия, приобретенная одним электроном под действием разности потенциалов в 1 в, равен $1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг.

У п р а ж н е н и е 89.1. Работа выхода вольфрама (металла, часто применяемого для нити электронной лампы) равна 4,53 эв. а) Найдите наименьшую скорость (направленную перпендикулярно к поверхности металла), при которой возможен вылет электрона из нити наружу. Масса электрона равна $9,1 \cdot 10^{-28}$ г, заряд его равен $4,80 \cdot 10^{-10}$ абс. ед. б) Объясните, почему 1 эв равен $1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг?

§ 90. Испускание электронов накаливаемыми телами. Тепловое движение электронов в металле имеет беспорядочный характер, так что скорости отдельных электронов могут значительно отличаться друг от друга, подобно тому, как это имеет место для молекул газа (т. I, «Теплота»). Это значит, что внутри металла всегда найдется некоторое количество быстрых электронов, способных прорваться сквозь поверхность. Иными словами, если принятая нами картина строения металла верна, то должно происходить «испарение» электронов, подобное испарению жидкостей.

Однако при комнатных температурах условие (7,1) выполняется только для очень н и ч т о ж н о й д о л и всех

электронов металла, и испарение электронов настолько слабо, что его обнаружить невозможно. Дело изменится, если нагреть металл до очень высокой температуры (1500—2000° С). В этом случае тепловые скорости увеличиваются, количество вылетающих электронов возрастает, и испарение их можно легко наблюдать на опыте. Для подобного опыта может служить лампа L (рис. 152, а и б), содержащая, кроме накаливающейся нити K (например, вольфрамовой), еще дополнительный электрод A . Воздух из лампы тщательно

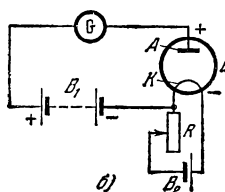
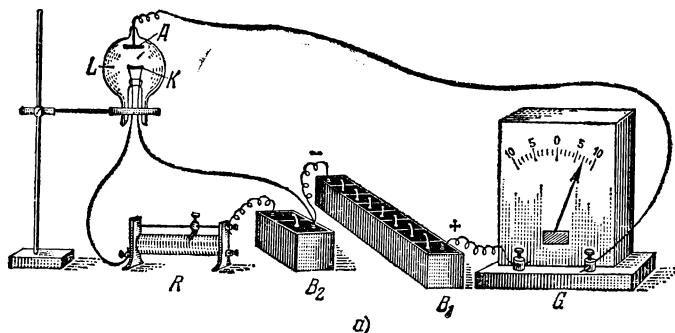


Рис. 152. Опыт для наблюдения выхода электронов из металлов.

L — лампа; K — вольфрамовая нить; A — дополнительный электрод; B_1 — аккумуляторная батарея для создания напряжения между электродами A и K ; B_2 — батарея для накаливания вольфрамовой нити; G — гальванометр; R — сопротивление для регулирования накала нити. а) Изображение опыта; б) схема опыта.

выкачан, чтобы не осложнять явления участием ионов воздуха. Лампа соединена с батареей B_1 и гальванометром G так, что отрицательный полюс батареи соединен с нитью накала. При холодной нити гальванометр не показывает тока, так как между K и A нет ни ионов, ни электронов, которые могли бы переносить заряды. Если, однако, накаливать нить при помощи вспомогательной батареи B_2 и постепенно увеличивать ток накала, то при белом калении нити в цепи появляется ток. Этот ток образуется испаряющимися из нити электронами, которые под действием приложенного электрического поля движутся от нити к электроду. Количество электронов, испускаемых с единицы поверхности раскаленного катода, очень сильно зависит от его температуры и от материала катода (работа выхода). Поэто-

му наблюдаемый ток очень быстро возрастает с повышением температуры нити.

Если присоединить полюсы батареи B_1 так, чтобы нить оказалась соединенной с положительным полюсом, то тока в цепи не будет, как бы сильно мы никалили нить. Это происходит потому, что электрическое поле теперь стремится двигать электроны от A к K и поэтому возвращает испарившиеся электроны обратно в нить накала. Этот опыт доказывает также, что из металлов испаряются только отрицательные электроны, но не положительные ионы, которые прочно связаны в кристаллической решетке металла (ср. § 9 о фотоэлектрическом эффекте).

Описанное явление, носящее название **термоэлектронного испускания**, или **термоэлектронной эмиссии**, нашло себе разнообразные и важные применения.

Упражнения. 90.1. Если между накаленной нитью и анодом электронной лампы приложить большое напряжение (несколько тысяч вольт) и притом так, чтобы нить была отрицательна, то анод сильно раскаливается и может даже расплавиться. Объясните, почему это происходит?

90.2. Будет ли указывать гальванометр G ток в цепи, содержащей две электронные лампы, включенные навстречу друг другу, как показано на рис. 153? Начертите схему включения ламп, при которой гальванометр G обнаружит ток.

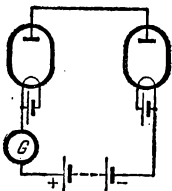


Рис. 153. К упражнению 90.2.

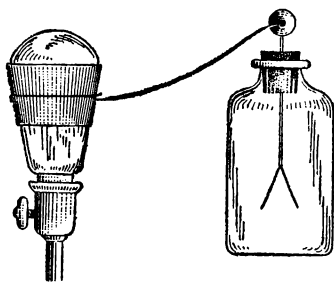


Рис. 154. К упражнению 90.4.

90.3. С какой скоростью достигнут анода в электронной лампе электроны, «испарившиеся» с накаленного катода и движущиеся к аноду под действием приложенного между анодом и катодом напряжения в 200 в? Данные об электроне возьмите из задачи 89.1.

90.4. Наклейте на обычную осветительную лампу полоску оловянной бумаги и присоедините ее к электроскопу (рис. 154). Зарядите электроскоп положительно и включите ток в лампе. Повторите опыт, зарядив электроскоп отрицательно. Чем объяснить, что в первом случае при включении тока листочек электроскопа спадает, а во втором нет?

ГЛАВА VIII

ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ЧЕРЕЗ ГАЗЫ

§ 91. **Самостоятельная и несамостоятельная проводимость газов.** В естественном состоянии газы не проводят электрического тока, т. е. являются изоляторами. В этом легко убедиться с помощью простого опыта, изображенного на рис. 155, который показывает, что даже чувствительный

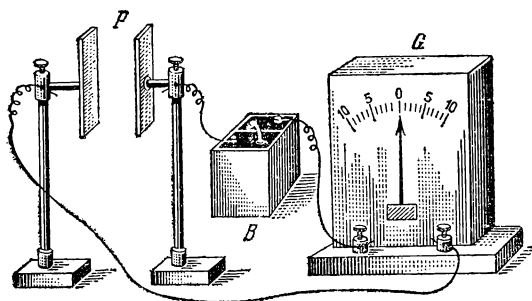


Рис. 155. Газы в естественном состоянии не являются проводниками: *G* — гальванометр; *B* — аккумуляторная батарея; *P* — газовый промежуток.

гальванометр не обнаруживает тока, если цепь прервана воздушным промежутком. Мы пользуемся этим всякий раз, когда желаем прервать идущий ток: выключая рубильник или поворачивая выключатель, мы тем самым создаем воздушный промежуток между двумя точками цепи. Изолирующие свойства газа объясняются тем, что атомы и молекулы газов в естественном состоянии являются нейтральными, незаряженными, частицами. Поэтому в обыч-

ных условиях в газе почти нет свободных носителей заряда, движение которых могло бы создать электрический ток.

Отсюда ясно, что для того, чтобы сделать газ проводящим, нужно тем или иным способом внести в него или создать в нем свободные носители заряда — заряженные частицы. При этом возможны два случая: либо эти заряженные частицы создаются действием какого-нибудь внешнего фактора или вводятся в газ извне, либо они создаются в газе действием самого электрического поля, существующего между электродами. В первом случае электропроводность газа называется *несамостоятельной*, во втором — *самостоятельной*.

§ 92. Несамостоятельная проводимость газа. Простейший опыт, иллюстрирующий возникновение *несамостоятельной* проводимости газов, может быть осуществлен с помощью установки, изображенной на рис. 156, которая показывает, что в обычных условиях газы не проводят тока: несмотря на приложенное напряжение, гальванометр G в цепи показывает отсутствие тока.

Нагреем теперь газ в промежутке P до очень высокой температуры, внося в него зажженную горелку (рис. 156, а). Гальванометр тотчас же укажет появление тока. Следовательно, при высокой температуре молекулы газа уже не являются незаряженными, а по крайней мере некоторая их доля распадается на положительные и отрицательные части, т. е. в газе появляются *ионы*.

Процесс образования ионов в каком-либо газе называют *ионизацией* этого газа. В описанном опыте ионизация является следствием нагревания газа.

Если направить в газовый промежуток струю воздуха от маленькой воздушной горелки и на пути струи, в не промежутка, поместить ионизирующее пламя (рис. 156, б), то гальванометр показывает некоторый ток. Это значит, что ионы, возникшие в пламени, не исчезают мгновенно, а перемещаются вместе с газом. Однако при увеличении расстояния между пламенем и газовым промежутком ток постепенно ослабевает и при расположении пламени в нескольких сантиметрах практически исчезает вовсе. Это показывает, что после устранения причины, вызывающей ионизацию, количество ионов в газе *быстро уменьшается* и через короткое время газ опять превращается в непроводник электричества.

Исчезновение ионов в газе объясняется тем, что разноименно заряженные ионы стремятся сблизиться под влиянием силы электрического притяжения и при встрече вновь воссоединяются в нейтральную молекулу. Такой процесс носит название **рекомбинации ионов**. Вследствие рекомбинации однажды созданная проводимость газа

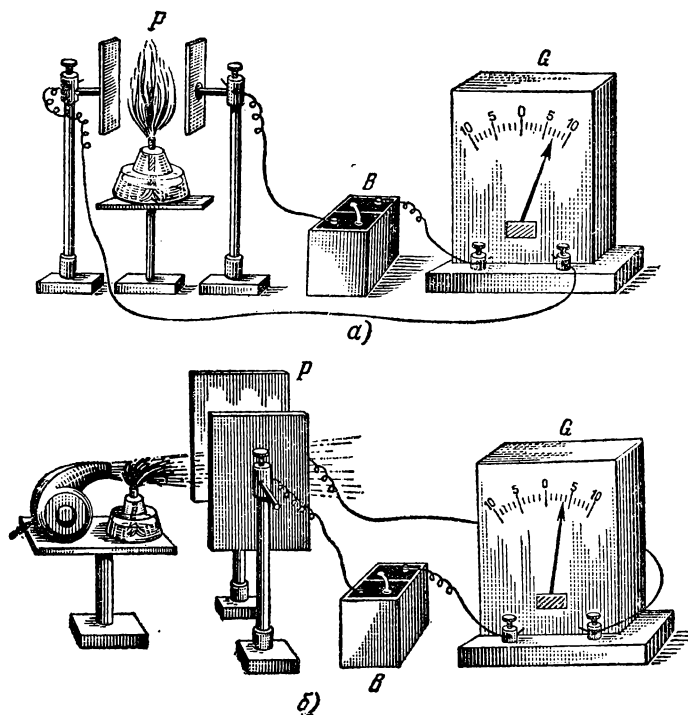


Рис. 156. а) Газ, ионизованный пламенем, проводит электричество. б) Если воздух, ионизованный пламенем, проходит до пластин небольшое расстояние, гальванометр показывает наличие тока; если расстояние велико, тока нет.

не сохраняется, и для получения длительного тока необходимо, чтобы в газе непрерывно происходила ионизация.

Нагревание газа до высокой температуры не является единственным способом ионизации молекул или атомов газа. Нейтральные атомы или молекулы газа могут ионизоваться, т. е. приобретать электрический заряд, также и

под воздействием ряда других факторов, важнейшими из которых являются рентгеновские лучи и излучение радиоактивных веществ.

Обычно явление ионизации состоит в отрыве от молекулы электрона, благодаря чему она становится положительным ионом. Освободившийся электрон сам становится отрицательным свободным носителем заряда. Однако во многих случаях электрон «прилипает» к какой-нибудь нейтральной молекуле, которая таким образом становится отрицательно заряженным ионом. Нередко и положительные и отрицательные ионы представляют собой не единичные ионизованные молекулы, а группы молекул, прилипших к отрицательному или положительному иону. Благодаря этому, хотя заряд каждого иона равен одному, двум, редко большему количеству элементарных зарядов, но массы их могут значительно отличаться от масс отдельных атомов или молекул; этим газовые ионы существенно отличаются от ионов электролитов, представляющих всегда, как мы видели, определенные атомы или определенные группы атомов. В силу этого различия при ионной проводимости газов не имеют места законы Фарадея, столь характерные для проводимости электролитов.

Второе, также очень важное, отличие ионной проводимости газов от ионной проводимости электролитов состоит в том, что для газов не соблюдается закон Ома. Измеряя величину тока I через газовый промежуток и напряжение U на его границах (электродах), мы найдем, что зависимость I от U (так называемая вольтамперная характеристика) имеет довольно сложный характер. В то время как для проводников, подчиняющихся закону Ома (в том числе и для электролитов), вольтамперная характеристика имеет вид наклонной прямой, показывающей пропорциональность между величинами I и U , — для газов, в зависимости от характера разряда, она имеет разнообразную форму. В частности, в случае несамостоятельной электропроводности, изображенном на рис. 156, получается график, показанный на рис. 157. Только при небольших значениях U график имеет вид прямой, т. е. закон Ома приблизительно сохраняет силу; с ростом U кривая загибается и, начиная с некоторого напряжения — обычно нескольких десятков вольт, — переходит в горизон-

т а л ь н у ю прямую. Это означает, что, начиная с некоторого напряжения, ток сохраняет постоянное значение, несмотря на увеличение напряжения. Это постоянное, не зависящее от напряжения значение величины тока называют током насыщения.

Нетрудно понять смысл полученных результатов. В начале с ростом напряжения увеличивается число ионов, проходящих за единицу времени через сечение разряда, т. е. увеличивается ток I , ибо ионы в более сильном поле движутся с большей скоростью. Однако, как бы быстро

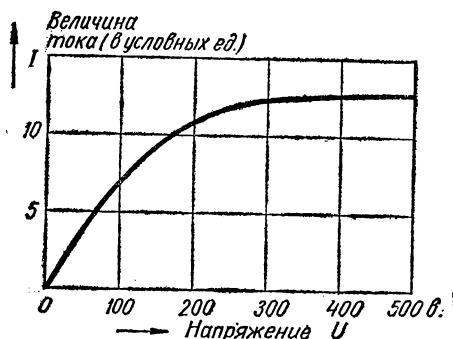


Рис. 157. Ток насыщения при несамостоятельной проводимости газа.

ни двигались ионы, число их, проходящее через это сечение за единицу времени, не может быть больше, чем общее число ионов, создаваемых в разряде в единицу времени внешним ионизующим фактором. Если, например, наша горелка создает за 1 сек миллион пар ионов, каждый из которых имеет заряд $1,6 \cdot 10^{-19}$ к, то максимальный заряд, проходящий через газ за 1 сек, т. е. м а к с и м а л ь н ы й ток, равен $2 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 3,2 \cdot 10^{-13}$ к/сек $= 3,2 \cdot 10^{-13}$ а. Это и есть значение тока насыщения в данном случае. Если бы ионизующий фактор был сильнее, т. е. создавал бы в 1 сек больше ионов, то и значение тока насыщения было бы больше. Однако и в этом случае окончательная величина тока определялась бы действием ионизующего фактора, а не напряжением, т. е. имело бы место насыщение. Только в том случае, когда ионизующий фактор настолько силен, что даже при больших напряжениях электрическое поле не успе-

в а е т у в о д и т ь в с е о б р а з у ю щ и е с я и о н ы, м ы н е б у д е м и м е т ь н а с ы щ е н и я. Э т о и и м е е т м е с т о в э л е к т р о л и т е, г д е в с л е д с т в и е э л е к т р о л и т и ч е с к о й д и с с о ц и а ц и и (§ 71) с к о р о с т ь о б р а з о в а н и я и о н о в ч р е з ы ч а й н о в е л и к а. П о э т о м у д л я э л е к т р о л и т о в м ы в с e г д а и м е е м л и ш ь н а ч а л ь н у ю ч а с т ь к р и в о й р и с. 157, т. е. д л я н и х с о б л ю д а е т с я з а к о н О м а ¹⁾).

Опыты показывают, однако, что если после достижения тока насыщения в газе продолжать значительно п о в ы ш а т ь н а п р я ж е н и е, т о х о д в о л ь т а м п е р н о й х а р а к т е р и с т и к и, п р е д с т а в л е н н ы й н а р и с. 157, в н е з а п н о н а р у ш а е т с я.

При достаточно большом напряжении ток вдруг, скачком, резко возрастает (рис. 158). Скачок тока показывает, что число ионов сразу резко возросло. Причиной этого является само электрическое поле: оно сообщает некоторым ионам столь большие скорости, т. е. столь большую энергию, что при столкновениях таких ионов с нейтральными молекулами последние разбиваются на ионы. Об-

щее число ионов теперь определяется не ионизующим фактором, а действием самого поля, которое может само поддерживать необходимую ионизацию: проводимость из несамостоятельной становится самостоятельной. Описанное явление внезапного возникновения самостоятельной проводимости, имеющее характер п р о б о я г а з о в о г о п р о м е ж у т к а — н е е д и н с т в е н н а я, х о т я и в е с ь м а в а ж н а я, ф о р м а в о з н и к н о в е н и я с а м о с т о я т е л ь н о й п р o в o д и м o с т и. К о п и с а н и ю р а з л и ч н ы х с л у ч а е в с а м о с т о я т е л ь н о й п р o v o d и m o c t и г а з о в м ы с e й ч а с и п е р e й д е м.

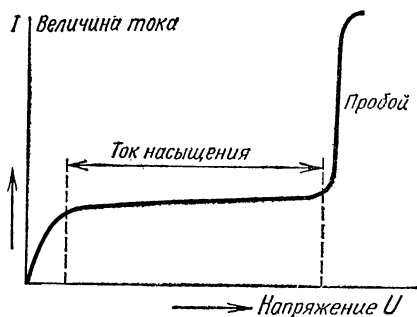


Рис. 158. Вольтамперная характеристика при переходе от несамостоятельного разряда к самостоятельному (пробою).

§ 93. Искровой разряд. Присоединим шаровые электроды к батарее конденсаторов C (рис. 159) и начнем

¹⁾ При очень больших напряжениях в электролитах удалось наблюдать небольшие отступления от закона Ома.

заряжать конденсаторы при помощи электрической машины. По мере заряжения конденсаторов будет увеличиваться разность потенциалов между электродами, а следовательно, будет увеличиваться и напряженность поля в газе. Пока напряженность поля невелика, в газе нельзя заметить никаких изменений. Однако при достаточной напряженности поля (около $30\,000\text{ в/см}$) между электродами появляется электрическая искра, имеющая вид ярко светящегося извилистого канала, соединяющего оба электрода.

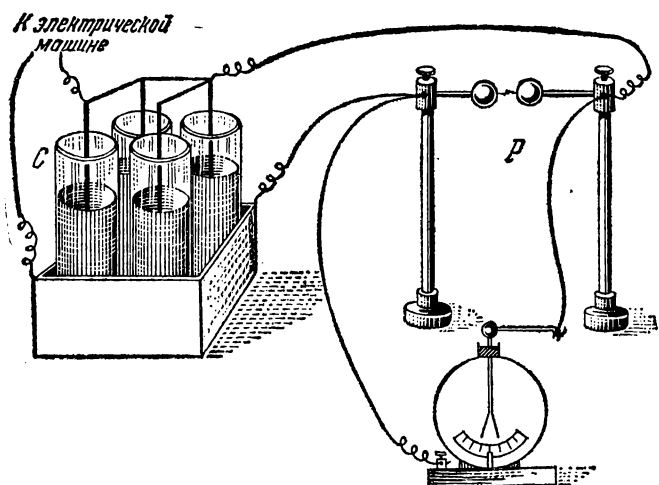


Рис. 159. Если напряженность поля в воздухе (в искровом промежутке P) достигает (в круглых цифрах) $30\,000\text{ в/см}$, то наступает электрический пробой газа и возникает электрическая искра.

Газ вблизи искры нагревается до высокой температуры и внезапно расширяется, отчего возникают звуковые волны, и мы слышим характерный треск. Конденсаторы в этой установке добавлены для того, чтобы сделать искру более мощной и, следовательно, более эффектной.

Описанная форма газового разряда носит название и с к р о в о г о р а з р я д а, или искрового газового пробоя газа. При наступлении искрового разряда газ внезапно, скачком, утрачивает свои изолирующие свойства и становится хорошим проводником. Напряженность поля, при которой наступает искровой пробой газа, имеет различное значение

у разных газов и зависит от их состояния (давления, температуры).

При заданном напряжении между электродами напряженность поля тем меньше, чем дальше электроды друг от друга. Поэтому, чем больше расстояние между электродами, тем большее напряжение между ними необходимо для наступления искрового пробоя газа. Это напряжение называется **н а п р я ж е н и е м п р о б о я**.

Зная, как зависит напряжение пробоя от расстояния для электродов какой-либо определенной формы, можно измерить неизвестное напряжение по максимальной длине искры. На этом основано устройство **и с к р о в о г о в о л ь т м е т р а** (рис. 160), удобного для грубой оценки больших напряжений (например, в рентгеновских установках). Он состоит из двух металлических изолированных шаров, один из которых может плавно перемещаться. Шары присоединяют к источнику, напряжение которого желают измерить, и сближают их до тех пор, пока не возникнет искра. Измеряя расстояние между шарами и соответствующее напряжение, при котором происходит пробой, составляют специальные таблицы, при помощи которых затем измеряют напряжение по длине искры. В качестве примера укажем, что при расстоянии в 0,5 см между шарами диаметром в 5 см напряжение пробоя равно 17,5 кВ, а при расстоянии в 5 см — около 100 кВ.

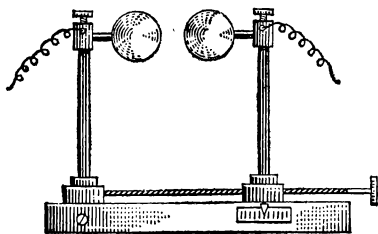


Рис. 160. Искровой вольтметр.

Возникновение пробоя объясняется следующим образом. В газе всегда есть некоторое количество ионов и электронов, возникающих от случайных причин. Обычно, однако, число их настолько мало, что газ практически не проводит электричества. При сравнительно небольших значениях напряженности поля, с какими мы встречаемся при изучении несамостоятельной проводимости газов, соударения ионов, движущихся в электрическом поле, с нейтральными молекулами газа происходят так же, как соударения упругих шаров. При каждом соударении движущаяся частица передает покоящейся часть своей кинетической энергии, и обе частицы после удара разлетаются, но никаких внутренних изменений в них не происходит. Однако при достаточной напряженности поля кинетическая энергия, накопленная ионом в промежутке между двумя столкновениями, может

сделаться достаточной, чтобы ионизовать нейтральную молекулу при столкновении. В результате образуется новый отрицательный электрон и положительно заряженный остаток — ион. Такой процесс ионизации называют ударной ионизацией, а ту работу, которую нужно затратить, чтобы произвести отрывание электрона от атома, — работой ионизации. Величина работы ионизации зависит от строения атома и поэтому различна для разных газов.

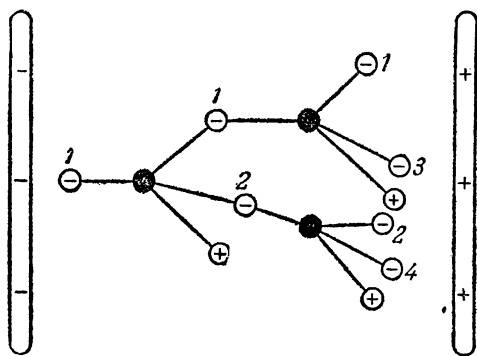


Рис. 161. Схема образования лавины.

Свободный электрон 1, столкнувшись с нейтральной молекулой (зачерненный кружок), расщепляет его на электрон 2 и свободный положительный ион. Электроны 1 и 2 при дальнейшем соударении с нейтральными молекулами снова расщепляются на электроны 3 и 4 и свободные положительные ионы и т. д.

Образовавшиеся под влиянием ударной ионизации электроны и ионы увеличивают число зарядов в газе, причем в свою очередь они приходят в движение под действием электрического поля и могут произвести ударную ионизацию новых атомов. Таким образом, этот процесс «усиливает сам себя», и ионизация в газе быстро достигает очень большой величины. Все явление вполне аналогично снежной лавине в горах, для зарождения которой бывает достаточно ничтожного комка снега. Поэтому и описанный процесс был назван *ионной лавиной* (рис. 161, 162). Образование ионной лавины и есть процесс искрового пробоя, а то минимальное напряжение, при котором возникает ионная лавина, есть *напряжение пробоя*. Мы видим, что *при искровом пробое причина ионизации газа заключается*

в разрушении атомов и молекул при соударениях с ионами (ударная ионизация).

У п р а ж н е н и е. 93.1. Известно, что чем меньше давление газа (при неизменной температуре), тем меньшее число атомов содержится в каждом см^3 газа и тем больший путь свободно пролетают атомы между двумя последовательными столкновениями. Учтявая это, сообразите, как будет изменяться (увеличиваться или уменьшаться) напряжение пробоя газового промежутка при уменьшении давления газа.

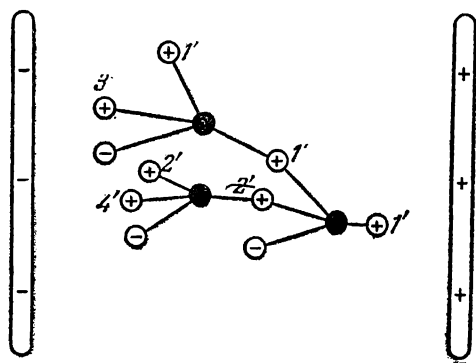


Рис. 162. Такое же лавинообразное размножение положительных ионов и электронов происходит при соударении положительных ионов с нейтральными молекулами.

§ 94. Молния. Красивое и небезопасное явление природы — молния — представляет собой искровой разряд в атмосфере.

Уже в середине XVIII в. обратили внимание на внешнее сходство молнии с электрической искрой. Высказывалось предположение, что грозовые облака несут в себе большие электрические заряды и что молния есть гигантская искра, ничем, кроме размеров, не отличающаяся от искры между шарами электрической машины. На это указывал, например, М. В. Ломоносов¹⁾, наряду с другими научными вопросами занимавшийся атмосферным электричеством.

Это было доказано на опыте (в 1752—1753 гг.) М. В. Ломоносовым и Франклином²⁾, работавшими одновременно и независимо друг от друга.

Ломоносов построил «громовую машину» — конденсатор, находившийся в его лаборатории и заряжавшийся атмосферным электричеством посредством провода, конец которого был выведен из помещения

¹⁾ Михаил Васильевич Ломоносов (1711—1765) — основоположник русской науки, великий русский физик и химик, член Российской Академии наук и основатель первого в России Московского университета.

²⁾ Вениамин Франклин (1706—1790) — американский исследователь и государственный деятель.

и поднят на высоком шесте. Во время грозы из конденсатора можно было рукой извлекать искры.

Франклин во время грозы пустил на бечевке змея, который был снабжен железным острием; к нижнему концу бечевки был привязан дверной ключ. Когда бечевка намокла и сделалась проводником электрического тока, Франклин смог извлечь из ключа электрические искры, зарядить лейденские банки и проделать другие опыты, производимые с электрической машиной ¹⁾.

Таким образом, было показано, что грозовые облака действительно сильно заряжены электричеством.

Разные части грозового облака несут заряды различных знаков. Чаще всего нижняя часть облака (обращенная к Земле) бывает заряжена отрицательно, а верхняя — положительно. Поэтому, если два облака сближаются разномысленно заряженными частями, то между ними проскакивает молния. Однако грозовой разряд может произойти и иначе. Проходя над Землей, грозовое облако создает на ее поверхности большие и н д у к ц и о н н ы е заряды (§ 8), и поэтому облако и поверхность Земли образуют две обкладки большого конденсатора. Разность потенциалов между облаком и Землей достигает огромных значений, измеряемых сотнями миллионов вольт, и в воздухе возникает сильное электрическое поле. Если напряженность этого поля делается достаточно большой, то может произойти п р о б о й, т. е. молния, ударяющая в Землю. При этом молния иногда поражает людей и вызывает пожары зданий.

Согласно многочисленным исследованиям, произведенным над молнией, искровой разряд в молнии характеризуется следующими измеренными числами:

Напряжение между облаком и землей . . .	100 000 000 в
Сила тока в молнии	100 000 а
Продолжительность молнии	10^{-6} сек.
Диаметр светящегося канала	10—20 см

Гром, возникающий после молнии, имеет такое же происхождение, как и треск при проскакивании лабораторной искры. Именно, воздух внутри канала молнии сильно разогревается и расширяется, отчего и возникают звуковые волны. Эти волны, отражаясь от облаков, гор и т. п., часто создают длительное эхо — громовые раскаты.

§ 95. Коронный разряд. Возникновение ионной лавины не всегда приводит к искре, а может вызвать и разряд другого типа — к о р о н н ы й р а з р ы д.

Натянем на двух высоких изолирующих подставках металлическую проволоку АВ диаметром в несколько десятых миллиметра и соединим ее с отрицательным полюсом генератора, дающего напряжение в несколько тысяч вольт, на-

¹⁾ Следует отметить, что такие опыты чрезвычайно опасны, так как молния может ударить в змея, и при этом большие заряды пройдут через тело экспериментатора в землю. В истории физики были такие печальные случаи. Так погиб, например, в 1753 г. в Петербурге профессор Рихман, работавший совместно с Ломоносовым.

пример, хорошей электрической машины (рис. 163). Вторым полюсом генератора отведем к Земле. Мы получим своеобразный конденсатор, обкладками которого являются наша проволока и стены комнаты, которые, конечно, сообщаются с Землей. Поле в этом конденсаторе весьма неоднородно, и напряженность его очень велика вблизи тонкой проволоки (§ 30). Повышая постепенно напряжение и наблюдая за проволокой в темноте, можно заметить, что при известном

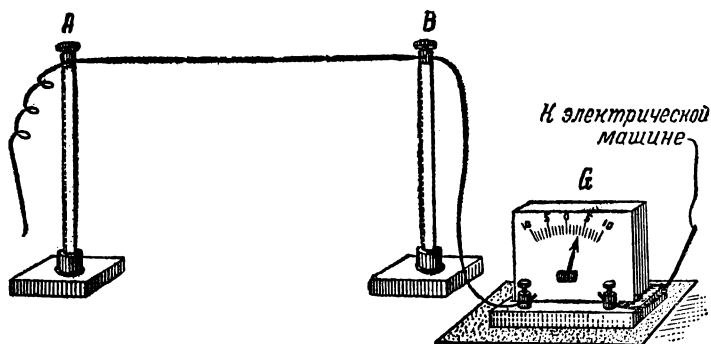


Рис. 163. Получение коронного разряда: *АВ* — проволока, около которой возникает свечение; *Г* — чувствительный гальванометр.

напряжении возле проволоки появляется слабое свечение («к о р о н а»), охватывающее со всех сторон проволоку; оно сопровождается шипящим звуком и легким потрескиванием. Если между проволокой и источником включен чувствительный гальванометр, то с появлением свечения гальванометр показывает заметный ток, идущий от генератора по проводам к проволоке и от нее по воздуху комнаты к стенам, соединенным с другим полюсом генератора. Ток в воздухе между проволокой *АВ* и стенами переносится ионами, образовавшимися в воздухе благодаря ударной ионизации. Таким образом, свечение воздуха и появление тока указывают на сильную ионизацию воздуха под действием электрического поля.

Коронный разряд может возникнуть не только у проволоки, но и у острия и вообще у всех электродов, возле которых образуется очень сильное неоднородное поле (§ 30).

У п р а ж н е н и я. 95.1. Опыт показывает, что нельзя заряжать бесконечно какое-либо тело и что после того, как заряд на теле достигает некоторой максимальной величины, зависящей от размера и формы тела и свойств окружающей среды, дальнейшего увеличения заряда добиться невозможно. Объясните это.

95.2. Почему у электрических машин и электроскопов проводящие части не имеют острых углов, а всегда заканчиваются металлическими шариками?

95.3. Для снятия зарядов с диска электрической машины возле него помещают металлическую гребенку с острыми (рис.17). Заряженные участки диска, проходя мимо гребенки, отдают ей свой заряд, хотя острия и диск не соприкасаются. Почему это происходит?

§ 96. Применения коронного разряда. 1) Э л е к т р и ч е с к а я о ч и с т к а г а з о в (э л е к т р о ф и л ь т р ы). Сосуд, наполненный дымом, внезапно делается совершенно прозрачным, если внести в него

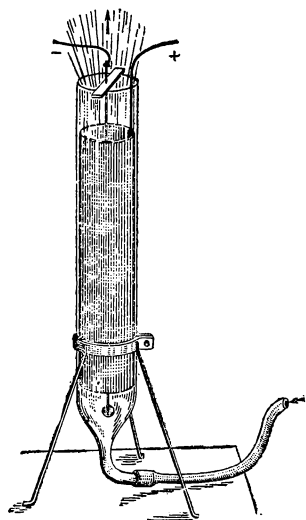


Рис. 164. Простейший вид электрофилтра.

острые металлические электроды, соединенные с электрической машиной. На рис. 164 показано видоизменение этого эффектного опыта. Внутри стеклянной трубки содержатся два электрода: металлический цилиндр и висящая по его оси тонкая металлическая проволока (грузик в виде шарика натягивает проволоку). Электроды присоединены к электрической машине. Если продувать через трубку струю дыма (или пыли) и привести в действие машину, то, как только напряжение делается достаточным для образования короны, выходящая струя воздуха станет совершенно чистой и прозрачной, и все твердые и жидкие частицы, содержащиеся в газе, будут осаждаться на электродах.

Объяснение опыта заключается в следующем. Как только у проволоочки зажигается корона, воздух внутри трубки сильно ионизируется. Газовые ионы, соударяясь с частицами пыли, «прилипают» к последним и заряжают их. Так как внутри трубки действует сильное электрическое поле, то заряженные частицы движутся под действием поля к электродам, где и оседают. Описанное явление находит себе в настоящее время техническое применение для очистки промышленных газов в больших объемах от твердых и жидких примесей (рис. 165).

2) С ч е т ч и к и э л е м е н т а р н ы х ч а с т и ц. Коронный разряд лежит в основе действия чрезвычайно важных физических приборов: так называемых счетчиков элементарных частиц (электронов, а также других элементарных частиц, которые образуются при радиоактивных превращениях). Один из типов счетчика (счетчик Гейгера — Мюллера) показан на рис. 166. Он состоит из небольшого металлического цилиндра А, снабженного окошком, и тонкой металлической проволоки,

натянутой по оси цилиндра и изолированной от него. Счетчик включают в цепь, содержащую источник напряжения B в несколько тысяч вольт. Напряжение выбирают таким, чтобы оно было только немного меньше

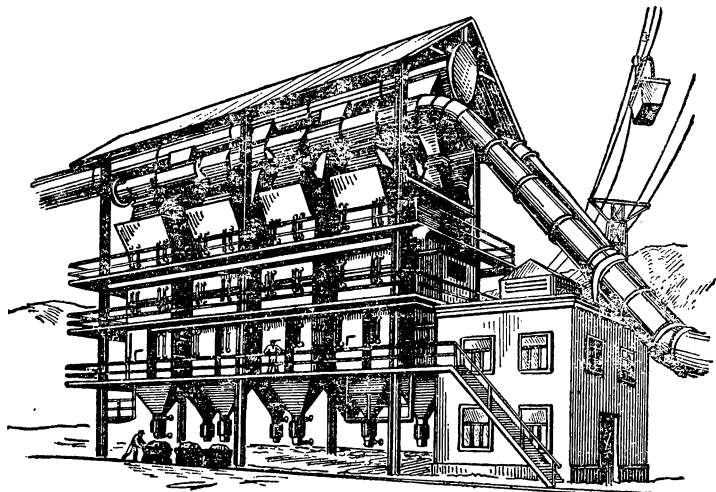


Рис. 165. Изображение промышленного электрофилтра, который может очистить в час сотни тысяч кубометров промышленных газов от дыма и вредных туманов и извлечь из газов тонны ценных продуктов в производстве серной кислоты, в литейных для цветных металлов и др.

«критического», т. е. необходимого для зажигания коронного разряда внутри счетчика. При попадании в счетчик быстро движущегося электрона последний ионизует молекулы газа внутри счетчика, отчего напряжение, необходимое для зажигания короны, несколько понижается. В счетчике возникает разряд, а в цепи появляется слабый кратковременный ток.

Возникающий в счетчике ток настолько слаб, что обычным гальванометром его обнаружить трудно. Однако его можно сделать вполне заметным, если в цепь ввести очень большое сопротивление R и параллельно ему присоединить чувствительный электрометр E (рис. 166). При возникновении в цепи тока I на концах сопротивления создается напряжение U , равное по закону Ома $U=I \cdot R$. Если выбрать величину сопротивления R очень большой (много миллионов ом), однако значительно меньшей, чем

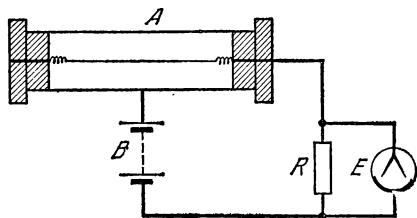


Рис. 166. Схема устройства счетчика Гейгера — Мюллера для элементарных частиц: электронов или α -частиц.

сопротивление самого электрометра, то даже очень слабый ток вызовет заметное напряжение. Поэтому при каждом попадании быстрого электрона внутрь счетчика листочек электрометра будет давать отброс.

Подобные счетчики позволяют регистрировать не только быстрые электроны, но и вообще любые заряженные, быстро движущиеся частички, способные производить ионизацию газа путем соударений. Современные счетчики легко обнаруживают попадание в них даже одних и тех же частиц и позволяют поэтому с полной достоверностью и очень большой наглядностью убедиться, что в природе действительно существуют элементарные заряженные частички.

§ 97. Грозоотвод. Подсчитано, что в атмосфере всего земного шара происходит одновременно около 1800 гроз, которые дают в среднем около 100 молний за каждую секунду. И хотя вероятность поражения молнией какого-либо отдельного человека ничтожно мала, тем не менее молнии причиняют немало вреда. Достаточно указать, что и в настоящее время около половины всех аварий в крупных линиях электропередачи вызываются молниями. Поэтому защита от молнии представляет собой важную задачу.

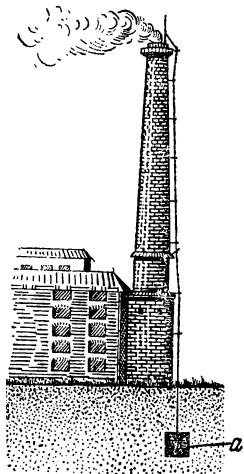


Рис. 167. Грозоотвод:
а — заземление.

И Ломоносов и Франклин (§ 94) не только объяснили электрическую природу молнии, но и указали, как можно построить «грозоотвод», защищающий здания от удара молнии. Грозоотвод представляет собой длинную вертикальную проволоку, верхний конец которой заостряется и укрепляется в вышестоящей самой высокой точке защищаемого здания (рис. 167). Нижний конец проволоки хорошо заземляют, для чего обычно его припаивают к металлическому листу, а лист закапывают в землю на уровне подпочвенных вод. Во время грозы на земле появляются большие индуцированные заряды и у поверхности земли возникает сильное электрическое поле. Напряженность поля особенно велика у острых проводников, и поэтому на конце грозоотвода зажигается коронный разряд. Вследствие этого индуцированные заряды не могут накапливаться на здании и молнии не происходит. В тех же случаях, когда молния все же возникает (а такие случаи очень редки), она ударяет в грозоотвод и заряды уходят в землю, не причиняя разрушений.

В некоторых случаях коронный разряд с грозоотвода бывает настолько сильным, что у острия возникает ясно видимое свечение. Такое свечение иногда появляется и возле других заостренных предметов, например на концах корабельных мачт, острых вершинах деревьев и т. п. Это явление было замечено еще несколько веков тому назад («огни святого Эльма») и вызывало суеверный ужас мореплавателей, не понимавших истинной его сущности.

Следует отметить, что грозоотвод только тогда выполняет свое назначение, если он хорошо заземлен, так как только в этом случае индуцированные заряды с поверхности земли и зданий могут стекать в воздух.

У п р а ж н е н и е. 97.1. Почему во время грозы необходимо соединять с землей антенну радиоприемника?

§ 98. Электрическая дуга. В 1802 г. В. В. Петров ¹⁾ установил, что если присоединить к полюсам большой электрической батареи два кусочка древесного угля и, приведя угли в соприкосновение, слегка их раздвинуть, то между концами углей образуется яркое пламя, а сами концы углей

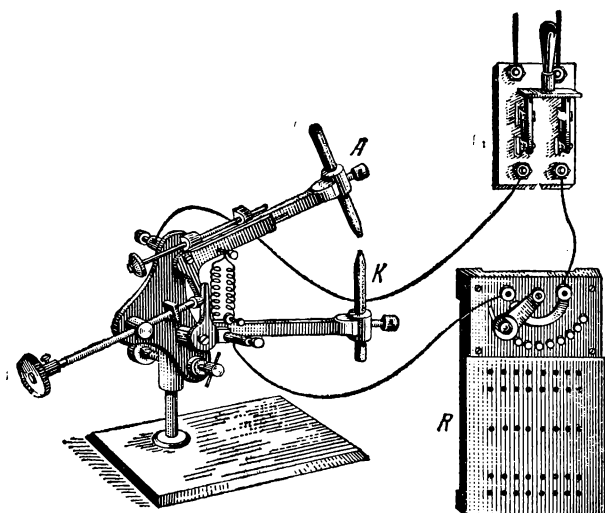


Рис. 168. Установка для получения электрической дуги: *A* и *K* — угольные электроды; *R* — реостат.

раскаляются добела, испуская ослепительный свет (э л е к т р и ч е с к а я д у г а). Это явление семь лет спустя независимо наблюдал английский химик Дэви, который предложил в честь Вольты назвать эту дугу «вольтовой».

На рис. 168 изображен простейший способ получения электрической дуги. В регулирующем штативе закреплены два угля, в качестве которых лучше брать не обычный древесный уголь, а специально изготавливаемые стержни, получаемые прессованием смеси графита, сажи и связующих веществ (д у г о в ы е у г л и). Источником тока может

¹⁾ Василий Владимирович Петров (1761—1834) — русский физик, член Российской Академии наук.

служить осветительная сеть. Чтобы в момент соединения углей не получилось короткого замыкания, последовательно с дугой следует включить реостат.

Обычно осветительная сеть питается током переменного направления. Дуга, однако, горит устойчивее, если через нее пропускают ток постоянного направления, так что один из ее электродов является все время положительным (анод), а другой отрицательным (катод). Фотография накалившихся электродов такой дуги приведена на рис. 169. Между элект-



Рис. 169. Фотография электродов электрической дуги.

родами находится столб раскаленного газа, хорошо проводящего электричество. В обычных дугах этот столб испускает значительно меньше света, нежели раскаленные угли, и поэтому на фотографии не виден. Положительный уголь, имея более высокую температуру, сгорает быстрее отрицательного. Вследствие сильной возгонки угля на нем образуется углубление — положительный кратер, являющийся самой горячей частью электродов. Температура кратера в воздухе при атмосферном давлении доходит до 4000°C .

У п р а ж н е н и е. 98.1. В дуговых лампах употребляют специальные регуляторы — часовые механизмы, сближающие с одинаковой скоростью оба угля по мере их сгорания. Однако толщина положительного угля всегда бывает больше, чем отрицательного. Почему так делают?

Дуга может гореть и между металлическими электродами (железо, медь и т. д.). При этом электроды плавятся и быстро испаряются, на что расходуется много тепла. Поэтому температура кратера металлического электрода обычно ниже, чем угольного ($2000\text{—}2500^{\circ}\text{C}$).

Заставляя гореть дугу между угольными электродами в сжатом газе (около 20 атм), удалось довести температуру положительного кратера до 5900°C , т. е. до температуры поверхности Солнца. При этом условии наблюдалось плавление угля.

Еще более высокой температурой обладает столб газов и паров, через который идет электрический разряд. Энергичная бомбардировка этих газов и паров элект-

ронами и ионами, подгоняемыми электрическим полем дуги, доводит температуру газов в столбе до $6000\text{--}7000^\circ$. Поэтому в столбе дуги почти все известные вещества плавятся и обрастаются в пар, и делаются возможными многие химические реакции, которые не идут при более низких температурах. Нетрудно, например, расплавить в пламени дуги тугоплавкие фарфоровые палочки.

Для поддержания дугового разряда нужно небольшое напряжение: дуга хорошо горит при напряжении на ее электродах $40\text{--}45$ в. Ток в дуге довольно значителен. Так, например, даже в небольшой дуге, в опыте, изображенном на рис. 168, идет ток около 5 а, а в больших дугах, употребляющихся в промышленности, ток достигает сотен ампер. Это показывает, что сопротивление дуги невелико; следовательно, и светящийся газовый столб хорошо проводит электрический ток.

У п р а ж н е н и е 98.2. Дуговая лампа, употребляющаяся в кино, требует ток в 300 а при напряжении на углях 60 в. Сколько тепла выделяется в такой дуге за 1 мин? Чему равно сопротивление такой дуги?

Такая сильная ионизация газа возможна только благодаря тому, что катод дуги испускает очень много электронов, которые своими ударами ионизуют газ в разрядном пространстве. Сильная электронная эмиссия с катода обеспечивается тем, что катод дуги сам накалился до очень высокой температуры (от 2200° до 3500°C в зависимости от материала). Когда для зажигания дуги мы вначале приводим уголь в соприкосновение, то в месте контакта, обладающем очень большим сопротивлением, выделяется почти все джоулево тепло проходящего через уголь тока (§ 59). Поэтому концы углей сильно разогреваются, и этого достаточно для того, чтобы при их раздвижении между ними вспыхнула дуга. В дальнейшем катод дуги поддерживается в накалившем состоянии самим током, проходящим через дугу. Главную роль в этом играет бомбардировка катода падающими на него положительными ионами.

Вольтамперная характеристика дуги, т. е. зависимость между величиной тока через дугу I и напряжением между ее электродами U , носит совершенно своеобразный характер. До сих пор мы встречались с двумя формами такой зависимости: в металлах и электролитах ток возрастает пропорционально напряжению (закон Ома), при несамостоятельной проводимости газов ток сначала возрастает

с увеличением напряжения, а затем достигает насыщения и от напряжения не зависит. В дуговом разряде при увеличении тока напряжение на зажимах дуги уменьшается. Говорят, что дуга имеет падающую вольтамперную характеристику.

Таким образом, в случае дугового разряда увеличение тока приводит к уменьшению сопротивления дугового промежутка и уменьшению падения напряжения на нем. Именно поэтому для того, чтобы дуга горела устойчиво, необходимо включать последовательно с ней реостат или другое так называемое балластное сопротивление (R на рис. 168).

§ 99. Применение дугового разряда. Вследствие высокой температуры электроды дуги испускают ослепительный свет¹⁾, и поэтому электрическая дуга является одним из лучших источников света. Она потребляет всего около 0,3 ватта на каждую свечу и является значительно более экономичной, нежели наилучшие лампы накаливания. Электрическая дуга впервые была использована для освещения П. Н. Яблочковым²⁾ в 1875 г. и получила название «русского света», или «северного света».

Хотя в широкой практике дуговые лампы в настоящее время почти полностью вытеснены лампами накаливания (§ 62), тем не менее в ряде случаев, где требуются очень мощные и яркие источники света, например в прожекторах, при кино съемке и т. п., дуговые лампы применяются очень часто.

Электрическая дуга применяется для сварки металлических деталей (дуговая электросварка). Возможность такого применения дуги была также указана В. В. Петровым и впервые разработана русскими изобретателями Н. И. Бенардосом (1885 г.) и Н. Г. Славяновым (1890 г.). Свариваемые детали служат положительным полюсом; касаясь их углем, соединенным с отрицательным полюсом, получают между телами и углем дугу, плавящую металл. При этом лицо сварщика, а в особенности глаза, должны быть закрыты толстым стеклом, так как в против-

¹⁾ Свечение столба дуги слабее вследствие слабой излучающей способности газа.

²⁾ Павел Николаевич Яблочков (1847—1894) — русский инженер-изобретатель.

ном случае невидимые, так называемые ультрафиолетовые лучи, обильно испускаемые дугой, быстро вызывают тяжелое заболевание глаз и кожи. Стекло же задерживает ультрафиолетовые лучи.

В настоящее время электрическую дугу широко применяют также в промышленных электропечах. В мировой промышленности около 90% инструментальной стали и почти все специальные стали выплавляются в электрических печах. Многие из таких печей построены по типу дуговых (рис. 170).

Большой интерес представляет ртутная дуга, горящая в кварцевой трубке, так называемая кварцевая лампа. В этой лампе дуговой разряд происходит не в воздухе, а в атмосфере ртутного пара, для чего в лампу вводят небольшое количество ртути, а воздух выкачивают. Свет ртутной дуги чрезвычайно богат невидимыми ультрафиолетовыми лучами, обладающими сильным химическим и физиологическим действием. Чтобы можно было использовать это излучение, лампу делают не из стекла, которое сильно поглощает ультрафиолетовые лучи, а из плавленного кварца. Ртутные лампы широко применяют при лечении разнообразных болезней («искусственное горное солнце»), а также при научных исследованиях как сильный источник ультрафиолетовых лучей. Свет ртутной лампы также чрезвычайно вреден для глаз.

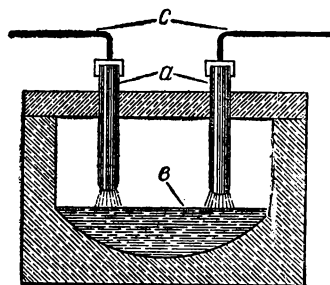


Рис. 170. Дуговая плавильная печь: *а* — электроды; *б* — расплавленный металл; *с* — подводка тока.

§ 100. Тлеющий разряд. Кроме искры, короны и дуги, существует еще одна форма самостоятельного разряда в газах — так называемый тлеющий разряд. Для получения этого типа разряда удобно использовать стеклянную трубку длиной около полуметра, содержащую два металлических электрода (рис. 171). Присоединим электроды к источнику постоянного тока с напряжением в несколько тысяч вольт (годится электрическая машина) и будем

постепенно откачивать из трубки воздух. При атмосферном давлении газ внутри трубки остается темным, так как приложенное напряжение в несколько тысяч вольт недостаточно для того, чтобы пробить длинный газовый промежуток. Однако когда давление газа достаточно понизится, в трубке вспыхивает светящийся разряд. Он имеет вид тонкого шнура (в воздухе — малинового цвета, в других газах — других цветов), соединяющего оба электрода. В этом состоянии газовый столб хорошо проводит электричество.

При дальнейшей откачке светящийся шнур размывается и расширяется, и свечение заполняет почти всю трубку. При давлении газа в несколько десятых миллиметра ртутного столба разряд имеет типичный вид, схематически

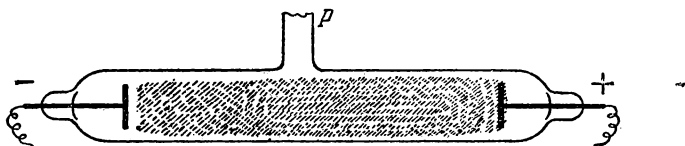


Рис. 171. Тлеющий разряд: P — трубка для откачки воздуха.

изображенный на рис. 171. Различают следующие две главные ¹⁾ части разряда: 1) несветящуюся часть, прилегающую к катоду, получившую название темного катодного пространства; 2) светящийся столб газа, заполняющий всю остальную часть трубки, вплоть до самого анода. Эта часть разряда носит название положительного столба. При подходящем давлении положительный столб может распадаться на отдельные слои, разделенные темными промежутками, так называемые страты.

Описанная форма разряда называется тлеющим разрядом. Почти все количество света, испускаемого при разряде, исходит от его положительного столба. При этом цвет свечения зависит от рода газа.

В настоящее время трубки с тлеющим разрядом находят практическое применение как источники света — газосветные лампы. Для целей освещения с успехом применяются газосветные лампы, в которых разряд происходит в парах ртути, причем вредное для глаз ультрафиолетовое

¹⁾ Мы не упоминаем о ряде деталей в строении разряда, имеющих второстепенное значение.

излучение поглощается слоем фосфоресцирующего вещества, покрывающего изнутри стенки лампы. Фосфоресцирующее вещество начинает светиться видимым светом, который добавляется к собственному свечению паров ртути, давая в результате свет, близкий по характеру к дневному свету (газосветные лампы дневного света). Такие лампы не только дают очень приятное «естественное» освещение, но и значительно (в 3—4 раза) экономичнее лампочек накаливания.

Газосветные лампы применяются также для декоративных целей. В этих случаях им придают очертания букв, различных фигур и т. д. и наполняют газом с красивым цветом свечения (неоном, дающим яркое оранжево-красное свечение, или аргоном с синевато-зеленым свечением).

§ 101. Что происходит при тлеющем разряде? При тлеющем разряде газ хорошо проводит электричество, а значит, в газе все время поддерживается сильная ионизация. При этом в отличие от дугового разряда катод все время остается х о л д н ы м. Почему же в этом случае происходит обильное образование ионов?

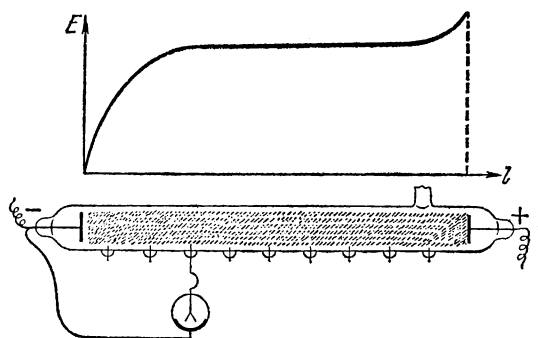


Рис. 172. Распределение потенциала в тлеющем разряде: E — напряжение; l — расстояние от катода вдоль трубки.

Падение потенциала или напряжение на каждом сантиметре длины газового столба в тлеющем разряде очень различно в разных частях разряда. Если впасть по длине трубки ряд платиновых проволочек, то, присоединяя электрометр к различным проволочкам (рис. 172), можно измерять напряжение E между различными точками разряда, в частности между любой точкой столба и катодом. Откладывая на графике по оси ординат это напряжение, а по оси абсцисс — расстояние l рассматриваемой точки от катода, мы получим кривую, изображенную на рис. 172 сверху. Мы видим, что почти все падение потенциала приходится на

темное пространство. Разность потенциалов, существующую между катодом и ближайшей к нему границей темного пространства, называют к а т о д н ы м п а д е н и е м потенциала. Оно измеряется сотнями, а в некоторых случаях и тысячами вольт. Опыт показывает, что наличие катодного падения является самым важным признаком тлеющего разряда; без катодного падения тлеющий разряд не может существовать.

Значение катодного падения заключается в том, что положительные ионы, пробегая эту большую разность потенциалов, приобретают большую скорость. Так как катодное падение сосредоточено в тонком слое

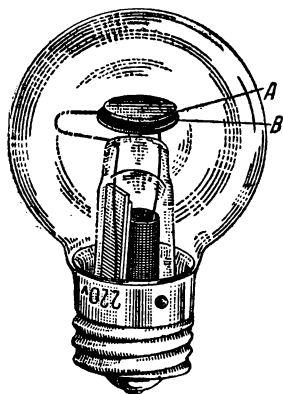


Рис. 173. Неоновая лампа:
А и В — электроды.

газа, то здесь почти не происходит соударений ионов с газовыми атомами, и поэтому, проходя через область катодного падения, ионы приобретают очень большую кинетическую энергию. Вследствие этого при соударении с катодом они выбивают из него некоторое количество электронов, которые начинают двигаться к аноду. Проходя через темное пространство, электроны в свою очередь ускоряются катодным падением потенциала и при соударениях с газовыми атомами в более удаленной части разряда (в положительном столбе) производят ионизацию ударом. Возникающие при этом положительные ионы опять ускоряются катодным падением и выбивают из катода новые электроны и т. д. Таким образом, происходит образование все новых и новых ионов, и разряд продолжается неограниченно долго, до тех пор, пока на электродах поддерживается необходимое напряжение.

Мы видим, что причинами ионизации газа в тлеющем разряде являются ударная ионизация и выбивание электронов с катода положительными ионами.

Из сказанного следует, что чем прочнее связаны электроны в металле катода, тем большую энергию должны приобрести положительные ионы для их выбивания, а значит, и тем большую величину должно иметь катодное падение в разряде. Поэтому катодное падение потенциала зависит от материала катода. Опыт показывает, что оно зависит еще и от рода газа. Подбирая соответствующим образом материал катода и газ в разрядной трубке, можно сделать катодное падение очень малым. На рис. 173 показана неоновая лампа тлеющего света. Электроды служат листочки железа А и В, покрытые слоем бария, из которого электроны выбиваются особенно легко. В этом случае катодное падение равно только 68 в, и поэтому лампа зажигается уже при включении в городскую осветительную сеть. Если ток сети — переменный, то роль катода выполняют попеременно листочки А и В.

§ 102. Катодные лучи. С уменьшением количества газа в трубке катодное темное пространство увеличивается, а положительный столб делается короче и бледнее.

При дальнейшем понижении давления свечение газа еще более уменьшается и появляется слабое свечение стекла вблизи катода. Когда давление падает примерно до 0,001 мм ртутного столба, свечение газа практически прекращается, а почти вся поверхность стекла светится ярким (обычно зеленым) светом.

При дальнейшей откачке воздуха ослабевает и зеленое свечение стекла, и, начиная с давлений в 10^{-4} — 10^{-5} мм

рт. ст., всякое свечение исчезает, и разряд прекращается.

Отчего же появляется зеленое свечение стекла?

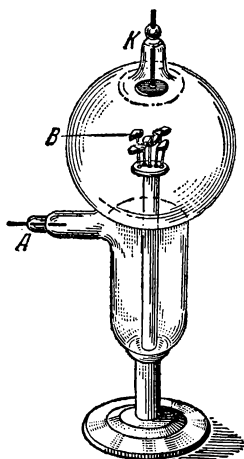


Рис. 175. Прибор для наблюдения свечения под действием катодных лучей: А — анод; К — катод; В — ча-
стицы минералов.

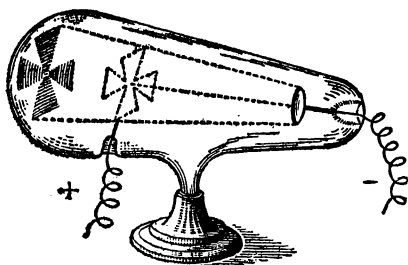


Рис. 174. Катодные лучи задерживаются металлической пластинкой, броса-
я «тень» на стенку трубки.

Если сделать анод у разрядной трубки в виде какой-либо фигуры (рис. 174), то на стенках трубки получается теневое изображение этой фигуры, совершенно такое же, как если бы на месте катода был небольшой источник света. Это показывает, что свечение стекла вызывается особыми лучами, исходящими из катода; они задерживаются металлической пластинкой анода и поэтому появляется теневое изображение последнего. Эти лучи получили название катодных лучей.

Катодные лучи вызывают свечение не только стекла, но и других веществ. При этом разные вещества светятся различным цветом. Так, например, мел испускает свечение красноватого цвета, сернистый цинк — светло-зеленого и т. д. Это свечение можно наблюдать, например, помещая между катодом и анодом разрядной трубки кусочки различных минералов (рис. 175). Поэтому, хотя сами катодные лучи и невидимы, их присутствие можно легко

обнаружить по свечению тел, бомбардируемых катодными лучами. Покрывая поверхность каких-либо предметов веществами, светящимися под действием катодных лучей, мы получаем люминесцирующие экраны (от латинского «люмен» — свет), весьма удобные для наблюдения над катодными лучами. Расположив такой экран вдоль трубки, под небольшим углом к ее оси, мы можем легко проследить направление катодных лучей внутри трубки.

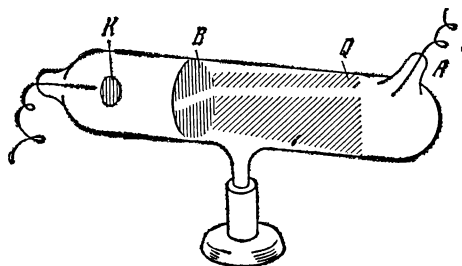


Рис. 176. Прямолинейный след пучка катодных лучей, вырезанных щелью B , на люминесцирующем экране Q ; A и K — анод и катод.

Для удобства наблюдения перед люминесцирующим экраном помещается ширма с длинной щелью, с помощью которой из катодного пучка вырезается часть, оставляющая на люминесцирующем экране узкий яркий след (рис. 176).

§ 103. Природа катодных лучей. Ответ на вопрос о природе катодных лучей дают опыты по исследованию их свойств. Важнейшие результаты этих опытов следующие:

1) Катодные лучи несут отрицательный заряд. Наиболее непосредственным доказательством этого положения явился опыт, изображенный схематически на рис. 177. На пути катодных лучей помещен полый электрод (фарадеев цилиндр, § 31), соединенный с чувствительным электроскопом. Попадая внутрь цилиндра, катодные лучи передают весь свой заряд электроскопу. Исследовав знак этого заряда (§ 7), установили, что катодные лучи несут отрицательный заряд.

2) Катодные лучи вылетают в направлении, перпендикулярном к поверхности катода, и распространяют-

ся прямолинейно (рис. 178, а и б). Поэтому если катод имеет вид участка сферы, то катодные лучи, летя по радиусам этой сферы, собираются («фокусируются») в

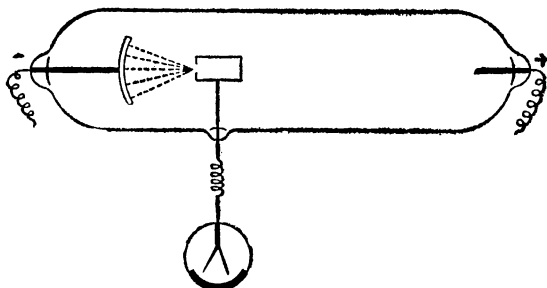


Рис. 177. Катодные лучи переносят отрицательный заряд.

центре этой сферы (рис. 178, б). Помещая в эти места люминесцирующий экран, можно видеть на нем появление яркого пятнышка. Положение этого пятнышка совершенно не зависит от формы и положения анода в трубке.

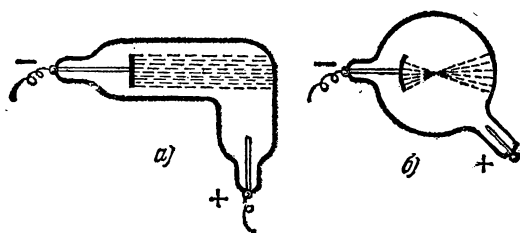


Рис. 178. Катодные лучи распространяются вдоль прямых линий, перпендикулярных к поверхности катода. Их направление вовсе не зависит от положения анода. а) Плоский катод дает пучок параллельных лучей. б) Вогнутый сферический катод «фокусирует» катодные лучи.

Описываемое свойство катодных лучей объясняется характером электрического поля в разрядной трубке. Наличие катодного падения потенциала (§ 101) указывает, что в непосредственной близости к катоду электрическое поле очень сильно, а в остальной части трубки гораздо слабее. Поэтому на катодные лучи, которые являются заряженными частицами, действуют вблизи катода очень большие силы, направленные по силовым линиям. Но силовые линии электрического поля вблизи катода перпендикулярны к поверхности катода (как и всякого

проводника, § 18), независимо от того, какую форму имеет анод и где он расположен. Итак, вблизи катода катодные лучи начинают двигаться по направлению, перпендикулярному к катоду, и приобретают почти всю свою огромную скорость в непосредственной близости к катоду. Дальнейшее движение происходит практически прямолинейно, по инерции, так как силы, действующие на катодные лучи, вдали от катода незначительны; вдали от катода электрическое поле слабо.

Из описанных наблюдений следует, что катодные лучи движутся, подчиняясь законам механики; следовательно, они обладают определенной массой.

У п р а ж н е н и е . 103.1. Катодные лучи распространяются прямолинейно, перпендикулярно к катоду. Как распространялись бы катодные лучи, если бы масса электронов равнялась нулю?

3) Наличие массы у катодных частиц непосредственно обнаруживается в следующем эффектном опыте. На пути катодных лучей укрепляется на оси легкое крылышко (мельница), так что катодные лучи ударяют в его лопасти (рис. 179). Мельница приходит во вращение, показывая, что катодные частицы передают ей свой импульс (количество движения mv , где m — масса, а v — скорость частицы).

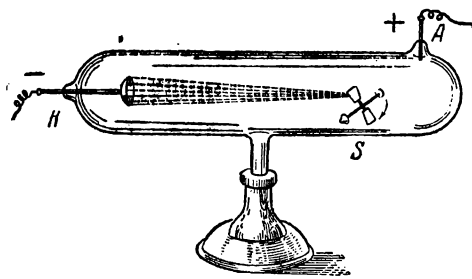


Рис. 179. Мельница S вращается вследствие передачи крылышку импульса бомбардирующих его катодных частиц. A и K — анод и катод.

4) Бомбардируя тела и поглощаясь ими, катодные лучи вызывают нагревание этих тел. Если внутри разрядной трубки в центре сферического катода (рис. 180) поместить тонкую платиновую фольгу, то она сильно накаливается и может даже расплавиться.

Из подобных опытов следует, что катодные лучи обладают определенным запасом кинетической энергии,

которую они передают бомбардируемыми ими телам. Это нетрудно было предвидеть, ибо катодные частицы имеют массу m и летят со значительной скоростью v . Следовательно, каждая катодная частичка должна обладать кинетической энергией $mv^2/2$; ее она при остановке отдает телу, в которое ударяет. За счет этой энергии катодные лучи вызывают и свечение люминесцирующего экрана; они могут также действовать и на фотографическую пластинку и вызывать некоторые химические реакции.

Упражнения. 103.2. При получении катодных лучей к электродам разрядной трубки приложено напряжение 30 000 в. Вычислите максимальную скорость электронов в катодном пучке. Заряд электрона равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ к, а его масса $9,1 \cdot 10^{-28}$ г.

103.3. К разрядной трубке с горячим катодом приложено напряжение 50 кВ, а ток через трубку равен 10 мА. Какое количество тепла выделяется каждую секунду на аноде?

5) Катодные лучи отклоняются электрическим полем. Такое действие электрического поля на катодные лучи нетрудно предвидеть, ибо нам известно, что катодные лучи несут электрический заряд. Соответствующие опыты удобно производить с прибором, изображенным на рис. 181. Анод в виде пластинки A с маленьким отверстием расположен против катода K . На другой конец трубки наносится люминесцирующий экран. Между A и K создается большое напряжение. Из потока катодных лучей отверстие в аноде вырезает узкий пучок, след которого дает на люминесцирующем экране яркое пятнышко P . На своем пути катодные лучи проходят между пластинами C и C' . Если между C и C' создать электрическое поле, направленное от C к C' , то катодные лучи отклонятся под действием этого поля, и светлое пятнышко сместится в точку P' . Направление смещения указывает, что катодные частицы отклоняются против направленного поля, и это подтверждает, что они несут отрицательный заряд.

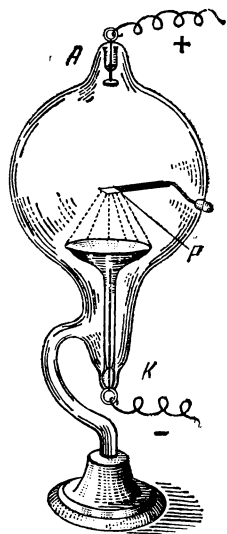


Рис. 180. Нагревание под действием катодных лучей. Платиновая фольга P накалилась до свечения; A — анод; K — катод.

6) Катодные лучи отклоняются магнитом. Для изучения этого явления можно воспользоваться также трубкой, изображенной на рис. 182 (рис. 182, а и б). Поднося к узкому пучку катодных лучей магнит,

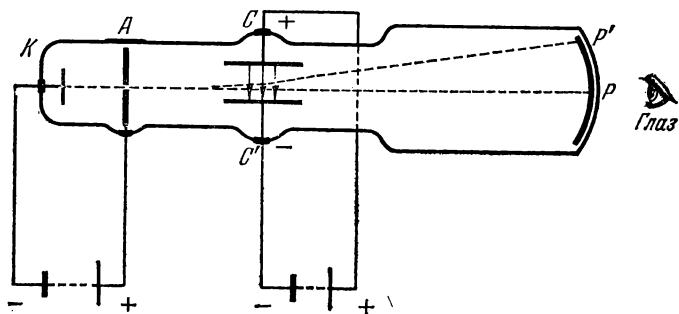


Рис. 181. Отклонение катодных лучей в электрическом поле.

можно обнаружить смещение следа катодных лучей на экране. При этом, если северный полюс магнита поднесен сверху (или снизу), то катодные лучи отклоняются влево (или вправо), если смотреть навстречу лучу (рис. 182, а). При поднесении северного полюса магнита справа (или слева) отклонение происходит вверх (или вниз) (рис. 182, б). Если приближать южный полюс магнита, то направление отклонения меняется на обратное. И эти опыты вполне объясняются тем, что катодные лучи представляют собой поток отрицательных зарядов, летящих вдоль трубки.

Такой поток зарядов представляет собой электрический ток, а ток и магнит, как известно, действуют друг на друга (§ 40). Подробнее об этом будет сказано в главе X.

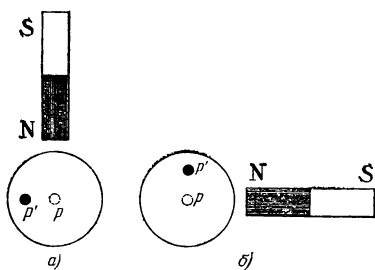


Рис. 182. След P катодного луча смещается под действием магнитного поля и переходит в положение P' . Северный полюс поднесен к лучу, направленному из-за плоскости чертежа навстречу наблюдателю, сверху — луч отклоняется влево (а), справа — луч отклоняется вверх (б).

Рис. 182. След P катодного луча смещается под действием магнитного поля и переходит в положение P' . Северный полюс поднесен к лучу, направленному из-за плоскости чертежа навстречу наблюдателю, сверху — луч отклоняется влево (а), справа — луч отклоняется вверх (б).

Для демонстрации отклонения катодных лучей магнитом удобно использовать прибор, изображенный на рис. 176. При поднесении магнита след катодного пучка на продольном экране сильно изгибается (рис. 183).

Все описанные опыты и им подобные, в частности точные опыты Дж. Дж. Томсона¹⁾, показали, что «*катодные лучи*» — это поток быстро летящих от катода к аноду электронов.

Теперь нетрудно понять, почему возникают катодные лучи в разрядной трубке. В § 101 мы говорили, что в тлеющем разряде положительные ионы газа устремляются к катоду и выбивают из него электроны. Так как газ в трубке разрежен, то эти электроны успевают пролететь некоторый путь, прежде чем столкнутся с молекулами газа. Этим объясняется существование катодного темного пространства. Если в трубке много газа, то катодные лучи на некотором расстоянии от катода успевают испытать столкновение: в газе возникает свечение (положительный столб). Понижая давление, мы увеличиваем длину свободного пробега электронов, отчего катодное темное пространство увеличивается, а положительное свечение сокращается. При давлениях около 0,001 мм рт. ст. значительная часть электронов оказывается в состоянии пройти весь путь до стенок без соударений; темное пространство заполняет всю длину трубки и одновременно с ним мы замечаем различные проявления катодных лучей: люминесценцию стекла, его нагревание и т. д. Таким образом, причина возникновения катодных лучей заключается в сильной бомбардировке катода положительными ионами, которые выбивают из металла катода часть его электронов.

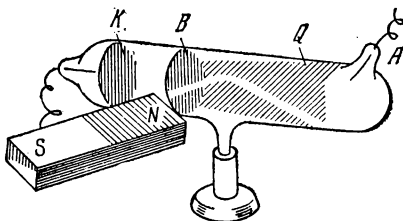


Рис. 183. Отклонение катодных лучей в магнитном поле. Катодный луч, прошедший сквозь щель В анода, отклоняется поднесенным к нему магнитом. Виден искривленный след луча на светящемся экране, установленном внутри трубки.

Из сказанного следует, что для получения катодных лучей в трубке должно содержаться некоторое, хотя и

¹⁾ Джозеф Джон Томсон (1856—1940) — английский физик.

малое, количество газа. Поэтому если слишком сильно откачать разрядную трубку, то не будут возникать ни положительные ионы, ни катодные лучи, и **с и л ь н о р а з р е ж е н н ы й** газ будет хорошим **и з о л я т о р о м**.

Двигаясь между катодом и анодом, электроны сильно ускоряются электрическим полем и приобретают огромные скорости. Эти скорости при очень сильных полях могут достигать $100\,000\text{ км/сек}$ и больше, приближаясь в специально построенных ускорителях к скорости света ($300\,000\text{ км/сек}$).

§ 104. Каналовые лучи. В § 101 мы указали, что в тлеющем разряде катод подвергается непрерывной сильной бомбардировке положительными ионами. Это можно доказать на опыте, если сделать в катode разрядной трубки отверстия (рис. 184).

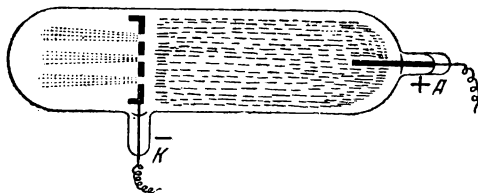


Рис. 184. Получение каналовых лучей. Между анодом A и катодом K — легкое свечение газа. В закатодной части наблюдаются отдельные пучки положительных ионов.

Часть положительных ионов будет пролетать через отверстия, и мы увидим в темноте слабо светящееся излучение, исходящее из этих отверстий и распространяющееся в закатодной части трубки. Это излучение, состоящее из положительных ионов газа, получило название **к а н а л о в ы х**, или **п о л о ж и т е л ь н ы х**, **л у ч е й**. Исследование свойств этих лучей (отклонения в электрическом и магнитном полях, заряда лучей и т. д.) подтверждает, что это действительно **п о л о ж и т е л ь н ы е** **и о н ы** **в е щ е с т в**, содержащихся в трубке.

У п р а ж н е н и е. 104.1. Пучок катодных лучей и пучок каналовых лучей пропускаются каждый между обкладками плоского заряженного конденсатора. Одинаково ли будут вести себя оба пучка, если скорости их одинаковы и конденсаторы также одинаковы и по устройству, и по заряду на них?

§ 105. Электронная проводимость в высоком вакууме.

Когда газ в трубке разрежен в достаточной степени, проводимость может, как мы видели (§ 102), поддерживаться за счет электронов, выделяющихся из катода (катодные лучи). Правда, в условиях, описанных в предыдущем параграфе, в трубке должны также присутствовать в некотором количестве и ионы, в частности, положительные, ибо электроны освобождаются из катода благодаря бомбардировке катода положительными ионами. Мы можем, однако, как мы знаем, обеспечить достаточное испускание электронов, применив сильно нагретый катод (§ 90). В таком случае необходимость в присутствии положительных ионов отпадает, и мы можем осуществить прохождение электрического тока через сосуд с таким высоким вакуумом, при котором роль ионов практически сводится к нулю и весь ток переносится электронами, испускаемыми нагретым катодом. Поскольку в этих условиях положительные ионы практически отсутствуют, катод не испытывает бомбардировки ионами, и для поддержания его в нагретом состоянии, необходимом для испускания электронов, катод должен непрерывно подогреваться, например с помощью тока, пропускаемого через него от вспомогательного источника (батарея накала). Следовательно, проводимость в описываемых приборах носит характер несамостоятельной. В соответствии с этим вольтамперная характеристика в этих случаях имеет вид кривой, подобной изображенной на рис. 157. Величина тока насыщения определяется числом электронов, испускаемых катодом за 1 сек, т. е. зависит (§ 90) от температуры катода, его площади и материала (работы выхода).

Если же напряжение не достигло значения насыщения, то не все электроны, испущенные катодом за одну секунду, успевают достигнуть за это время анода и составить ток. Часть электронов остается в пространстве между катодом и анодом, образуя пространственный отрицательный заряд, который в виде отрицательно заряженного облака скапливается перед катодом и ослабляет своим присутствием электрическое поле анода. Электроны, непрерывно испускаемые катодом, частично отбрасываются этим облаком обратно к катоду и не доходят до анода: устанавливается ток более слабый, чем ток насыщения. Итак, каждому значению напряжения между катодом и анодом соответствует своя плотность

электронного облака и свое значение тока. Таким образом, получаются все точки вольтамперной характеристики (см. рис. 157), начиная от $I=0$ до тока насыщения. Лишь при достаточно большом напряжении все электроны, вышедшие из катода, достигают анода, электронное облако полностью рассеивается, и ток приобретает свое максимальное значение — значение тока насыщения.

§ 106. Электронные лампы (радиолампы). Явление термоэлектронной эмиссии и обусловленный им электронный ток через вакуум лежат в основе устройства очень большого числа разнообразных электронных приборов, нашедших себе чрезвычайно важные применения в технике и в быту. Мы остановимся только на двух наиболее важных типах этих приборов: электронной лампе (радиолампе) и электроннолучевой трубке.



Рис. 185. Двухэлектродная лампа (диод): K — катод (накаленная нить); A — анод (цилиндр); M — стеклянный баллон. а) Изображение. б) Схема.

Устройство простейшей электронной лампы показано на рис. 185. В ней имеется раскаленная вольфрамовая нить K , являющаяся источником электронов (катод), и металлический цилиндр A (анод), окружающий катод. Оба электрода помещены в стеклянный или металлический баллон M , воздух из которого тщательно откачан. Такая двухэлектродная лампа называется в а к у у м н ы м д и о д о м.

Если мы включим эту лампу в цепь батареи или другого источника тока так, чтобы анод ее был соединен с положительным полюсом источника, а катод — с отрицательным (рис. 186, а), и накалим катод при помощи вспомогательного источника (батареи B_n), то испаряющиеся из нити электроны будут лететь к аноду, и через нашу цепь пойдет ток. Если же мы переключим провода так, чтобы минус источника был соединен с анодом лампы, а плюс — с ее катодом (рис. 186, б), то испаряющиеся из катода электроны

будут отбрасываться полем обратно на катод, и тока в цепи не будет. Таким образом, наш диод обладает тем свойством, что он пропускает ток в одном направлении и не пропускает его в обратном направлении. Такого рода устройства, пропускающие ток только в одном направлении, называются электрическими вентилями. Они широко применяются для выпрямления переменного тока, т. е. превращения его в постоянный ток (см. дальше § 167). Вакуумные диоды, специально приспособленные для этой цели, называются в технике кенотронами.

Электронные лампы более сложного типа, нашедшие себе широчайшее применение в радиотехнике, автоматике и ряде других отраслей техники, содержат помимо накаливаемого катода, источника электронов, и собирающего эти электроны анода — еще третий дополнительный электрод в виде сетки, помещаемой между катодом и анодом. Обычно сетка бывает с очень крупными ячейками; например, ее делают в виде редкой спирали (рис. 187).

Основная идея, на которой основаны все применения таких ламп, заключается в следующем. Включим лампу в цепь

батареи B_a , как показано на рис. 188, и будем накаливать катод с помощью вспомогательной батареи B_k (батареи накала). Включенный в цепь измерительный прибор покажет, что в цепи идет определенной величины анодный ток I_a . Подключим теперь к катоду лампы и сетке еще одну батарею B_c , напряжение которой можно произвольно менять, и будем с ее помощью изменять разность потенциалов U_c между катодом и сеткой. Мы увидим, что при этом изменяется и величина анодного тока. Таким образом, мы получаем возможность управлять током в анодной цепи лампы, изменяя разность потенциалов между ее катодом и сеткой. В этом и заключается важнейшая особенность электронных ламп.

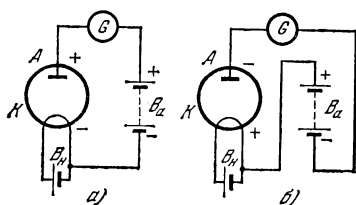


Рис. 186. а) Ток проходит через диод, когда его анод A соединен с положительным полюсом батареи B_a , а катод K — с отрицательным. б) Ток не проходит через диод, когда его анод A (цилиндр) соединен с отрицательным полюсом батареи, а катод K (накаливаемая нить) — с положительным; B_k — батарея накала нити, G — гальванометр. Диоды изображены схематически.

Кривая, изображающая зависимость анодного тока лампы I_a от ее сеточного напряжения U_c , носит название

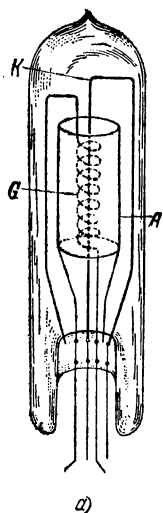
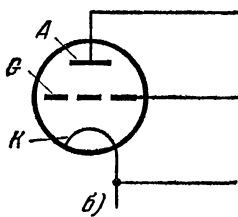


Рис. 187. Трехэлектродная лампа: K — катод (накаленная нить); A — анод (цилиндр); G — сетка (редкая спираль).
а) Изображение. б) Схема.



вольтамперной характеристики лампы. Типичная характеристика трехэлектродной лампы показана на рис. 189. Как видно из этого рисунка, когда сетка находится при положительном потенциале по отношению к катоду, т. е. соединена с полюсом батареи, то увеличение сеточного напряжения U_c приводит к увеличению анодного тока до тех пор, пока этот ток не достигнет насыщения. Напротив, если

мы сделаем сетку отрицательной по отношению к катоду, то при увеличении абсолютной величины сеточного напряжения анодный ток будет падать, пока при некотором отрицательном потенциале на сетке лампа не окажется запертой, т. е. ток в анодной цепи не обратится в нуль.

Нетрудно понять причину этих явлений. Когда сетка заряжена положительно относительно катода, она притягивает к себе электроны из облака объемного заряда вблизи катода; при этом значительная часть электронов пролетает между витками сетки и попадает на анод, усиливая анодный ток. Таким образом, способствуя рассасыванию объемного заряда, **положительный потенциал на сетке увеличивает анодный ток.** Наоборот, **отрицательно заряженная сетка уменьшает анодный ток,** потому что отбрасывает назад электроны,

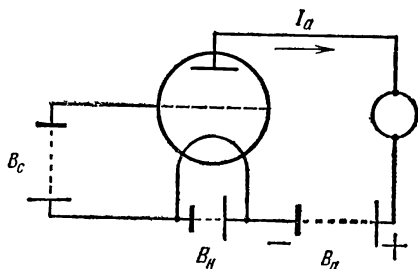


Рис. 188. Напряжение между катодом и сеткой изменяет величину анодного тока.

т. е. увеличивает объемный заряд вблизи катода. Так как сетка расположена гораздо ближе к катоду, чем анод, то уже малые изменения разности потенциалов между ней и катодом очень сильно отражаются на объемном заряде и сильно влияют на величину анодного тока. В обычных радиолампах изменение сеточного напряжения на 1 в меняет анодный ток на несколько миллиампер (на несколько процентов от первоначального тока). Для того чтобы достичь такого же изменения тока путем изменения анодного напряжения, это последнее нужно было бы изменить гораздо больше — на несколько десятков вольт.

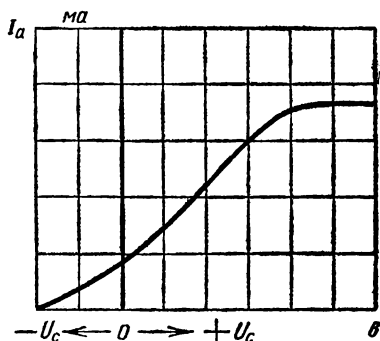


Рис. 189. Вольт-амперная характеристика трехэлектродной лампы. Кривая показывает зависимость анодного тока I_a от напряжения U_c между сеткой и катодом.

Одним из важнейших применений электронных ламп является применение их в качестве усилителей слабых токов и напряжений. Поясним на простом примере, как это осуществляется. Представим себе, что между сеткой и катодом лампы включено очень большое сопротивление R_c , скажем, один миллион (10^6) ом (рис. 190). Проходящий через

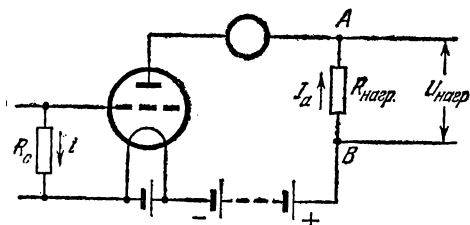


Рис. 190. Схема работы трехэлектродной лампы как усилителя тока и напряжения.

это сопротивление очень слабый ток i , скажем, в один микроампер (10^{-6} а), создаст на этом сопротивлении по закону Ома напряжение $U_c = i \cdot R$. В нашем примере это напряжение равно одному вольту. Но при таком изменении сеточного напряжения анодный ток меняется на 2—3 ма. Стало быть, изменение тока через сеточное сопротивление на 1 мка вызывает изменение анодного тока в несколько тысяч раз большее. Мы усиливает, таким образом, первоначальный очень слабый ток в

несколько тысяч раз, доставляя необходимую энергию за счет работы анодной батареи.

Если в анодную цепь мы включим некоторое «нагрузочное» сопротивление $R_{\text{нагр}}$, скажем, $10\,000\text{ ом}$, то изменение анодного тока на $2\text{—}3\text{ ма}$ вызовет и з м е н е н и е напряжения на этом сопротивлении на $20\text{—}30\text{ в}$. Иными словами, изменение сеточного напряжения на 1 в меняет напряжение между точками A и B «нагрузочного» сопротивления на $20\text{—}30\text{ в}$. Мы осуществили таким образом у с и л е н и е первоначального очень малого напряжения.

Лампы с тремя электродами — катодом, анодом и сеткой,— подобные изображенной на рис. 187, носят название т р и о д о в. В современной технике широко применяются и более сложные лампы с двумя, тремя и большим числом сеток. Промышленность выпускает в настоящее время для разных целей много десятков типов ламп самых разных размеров, начиная от так называемых «пальчиковых» ламп толщиной с мизинец и длиной в несколько сантиметров и кончая лампами выше человеческого роста. В малых лампах, употребляющихся, например, в радиоприемниках, анодный ток равен нескольким миллиамперам, в мощных лампах он достигает многих десятков ампер.

У п р а ж н е н и е. 106.1. Почему катод электронной лампы быстро разрушается, если лампа плохо откачана и в ней есть небольшие количества газа?

§ 107. Электроннолучевая трубка. Этот важный прибор, изображенный на рис. 191, по своему внешнему виду и устройству очень похож на ту трубку, с помощью которой

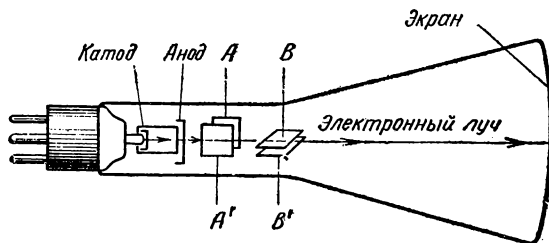


Рис. 191. Схема устройства электроннолучевой трубки.

мы изучали действие электрического и магнитного поля на катодные лучи (рис. 181). Существенное отличие заключается лишь в том, что раньше мы имели в трубке холодный катод, испускавший электроны в результате ионной бомбар-

дировки. Теперь же источником электронов является помещенная в узком конце трубки «электронная пушка», состоящая из накаливаемого катода, эмитирующего электроны, и анода, имеющего вид диска с небольшим отверстием в 1—3 мм. Между катодом и анодом создают разность потенциалов от нескольких сот до нескольких тысяч вольт, так что в пространстве между катодом и анодом существует сильное электрическое поле, разгоняющее вылетающие из катода электроны до очень большой скорости. Катод находится внутри металлического цилиндра, на который также подается положительное (относительно катода) напряжение, несколько меньшее, чем напряжение на аноде. Благодаря совместному действию этого цилиндра и анода почти все электроны собираются (фокусируются) на отверстии анода и выходят из него в виде тонкого пучка — электронного луча. В том месте, где этот пучок ударяется об экран — покрытое светящимся составом дно колбы, — возникает яркая светящаяся точка.

На своем пути к экрану электронный луч проходит между двумя парами металлических пластин AA' и BB' . Если подать некоторое напряжение на первую пару пластин, то поле конденсатора AA' будет отклонять пролетающие через него электроны в сторону положительно заряженной пластины, и светлое пятно на экране сместится по горизонтальной влево или вправо. Точно так же, если напряжение будет подано на вторую пару пластины BB' , то луч отклонится в сторону положительной пластины и светящаяся точка на экране сместится по вертикали вверх или вниз.

Таким образом, по смещению светлой точки на экране мы можем судить о величине напряжения, наложенного на соответствующие отклоняющие пластины. Наиболее важно при этом то, что вследствие ничтожно малой инерции электронов электронный луч чрезвычайно быстро реагирует на всякое изменение напряжения на пластинах. Поэтому с помощью электроннолучевой трубки можно следить за процессами, в которых происходят чрезвычайно быстрые изменения электрических напряжений и токов. Особенно часто такого рода задачи возникают в радиотехнике, где приходится иметь дело с токами и напряжениями, меняющими свое направление и величину много миллионов (и даже десятков миллионов) раз в секунду.

Электроннолучевая трубка, снабженная соответствующими приспособлениями для изучения таких быстропеременных токов и напряжений, образует прибор, который получил название **электроннолучевого** (или **катодного**) **осциллографа**. Этот прибор является одним из важнейших средств исследования не только в радиотехнике, но и в целом ряде других отраслей науки и техники. С каждым годом он все шире внедряется в практику работы исследовательских и заводских лабораторий.

Другой чрезвычайно важной областью применения электроннолучевых трубок является **телевидение**. Электроннолучевая трубка является необходимой и важнейшей частью всякого телевизора. Накладывая на пластины соответствующее напряжение, заставляют луч с большой скоростью заштриховывать весь экран рядом параллельных линий (строчек). Если бы при этом яркость светящейся точки, определяемая кинетической энергией электронов, оставалась все время постоянной, то мы увидели бы весь экран равномерно светящимся. Но приходящие к приемнику телевизора сигналы, посылаемые передающей телевизионной станцией, то увеличивают, то уменьшают ускоряющее электроны напряжение в соответствии с яркостью той или иной точки передаваемого изображения. Поэтому и светящиеся точки на экране получаются то более, то менее яркими, и их совокупность, воспринимаемая нашим глазом, воспроизводит передаваемое изображение.

Упражнения. 107.1. «Электронная пушка», применяемая в телевизионных трубках для получения катодных лучей, состоит из накаливаемого катода и расположенного вблизи него анода с центральным отверстием, через которое пролетает поток электронов. Как изменится скорость электронов, если напряжение между катодом и анодом изменится от 700 в до 1000 в? Чему будет равна эта скорость в обоих случаях? Заряд электрона $4,8 \cdot 10^{-10}$ абс. ед., масса электрона $9,1 \cdot 10^{-28}$ г.

107.2. В откачанной трубке летит поток электронов, вылетевших из электронной пушки, напряжение в которой между катодом и анодом равно 800 в. Непосредственно перед светящимся экраном, на который попадают электроны, расположен плоский конденсатор, вдоль оси которого, посредине между пластинами, пролетают электроны. Длина пластин конденсатора 8 см, расстояние между пластинами 2 см, напряжение на пластинах 50 в. Насколько сместится след электронов на экране и в какую сторону?

Если в трубке присутствуют ионы водорода (молекулярного), однократно заряженные, как положительные, так и отрицательные, как они будут вести себя в этих условиях? Насколько и в какую сторону сместятся их следы на экране?

Указания. Задачу решить сначала в общем виде.

ГЛАВА IX

ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ЧЕРЕЗ ПОЛУПРОВОДНИКИ

§ 108. Природа электрического тока в полупроводниках. В § 2 мы говорили уже о том, что подавляющее большинство веществ не принадлежит ни к числу высоко совершенных изоляторов вроде янтаря, кварца или фарфора, ни к числу таких хороших проводников тока, как металлы, а занимает промежуточное положение между теми и другими. Их называют полупроводниками. Проводимость различных тел может иметь очень сильно отличающиеся одно от другого значения. Хорошие изоляторы имеют ничтожную проводимость (от 10^{-10} до 10^{-20} $\text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$). Проводимость металлов, наоборот, очень велика (от 10^4 до 10^6 $\text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ (табл. 2 на стр. 129). Полупроводники по своей проводимости лежат в интервале между этими крайними пределами.

Особый научный и технический интерес представляют так называемые электронные полупроводники. Как и в металлах, прохождение электрического тока через такие полупроводники не вызывает никаких химических изменений в них, а следовательно, мы должны сделать вывод, что и в них свободными носителями заряда являются электроны, а не ионы. Иными словами, проводимость этих полупроводников, как и металлов, является электронной. Однако уже огромное количественное различие в величине удельной проводимости указывает на то, что существуют весьма глубокие качественные различия между условиями прохождения электрического тока через металлы и через полупроводники. Ряд других особенностей в электрических свойствах полупроводников также указывает на существенные различия между механизмом проводимости металлов и полупроводников.

Проводимость σ измеряется током, проходящим через 1 см^2 сечения под действием электрического поля с напряженностью в 1 в/см . Ток этот будет тем больше, чем больше скорость u , приобретаемая в этом поле носителями зарядов, и чем больше концентрация носителей N , т. е. число их в 1 см^3 . В жидких и твердых телах и неразреженных газах вследствие «трения», испытываемого движущимися зарядами, скорость их пропорциональна напряженности поля. В этих случаях скорость u , соответствующую напряженности поля в 1 в/см , называют подвижностью заряда.

Если заряды движутся вдоль поля со скоростью u , то за 1 секунду через 1 см^2 сечения пройдут все заряды, находящиеся на расстоянии u или меньшем от этого сечения (рис. 192). Заряды эти заполняют объем $u \text{ см}^3$, и число их равно $N \cdot u$. Переносимый ими ток равен $N \cdot u \cdot q$, если q есть заряд каждого носителя тока. Итак,

$$\sigma = N \cdot u \cdot q.$$

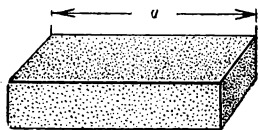


Рис. 192. К выводу соотношения $\sigma = N \cdot u \cdot q$.

Измерения, на описании которых мы не будем останавливаться, показали, что подвижность электронов в полупроводниках по порядку величины близка к подвижности их в металлах, а иногда даже больше. Поэтому указанное выше различие в проводимости металлов и полупроводников не может объясняться сравнительно небольшим различием в подвижности носителей заряда, а связано с огромным различием в их концентрации. Действительно, измерения показали, что в 1 см^3 металлов имеется 10^{22} — 10^{23} электронов, т. е. на каждый атом металла приходится примерно по одному свободному электрону. В полупроводниках же концентрация электронов проводимости во много тысяч и даже миллионов раз меньше.

Следующее важное различие в электрических свойствах металлов и полупроводников заключается в различном характере зависимости проводимости этих веществ от температуры. Мы знаем (§ 48), что при повышении температуры сопротивление металлов растет, т. е. проводимость их уменьшается; проводимость же полупроводников при повышении температуры растет, хотя подвижность электронов как в металлах, так

и в полупроводниках, с повышением температуры уменьшается.

Тот факт, что в полупроводниках, несмотря на уменьшение подвижности, проводимость при повышении температуры растет, свидетельствует о том, что *при повышении температуры в полупроводниках происходит очень быстрое возрастание числа свободных электронов*, и влияние этого фактора пересиливает влияние уменьшения подвижности. При очень низкой температуре, вблизи абсолютного нуля, в полупроводниках имеется ничтожно малое количество свободных электронов, и поэтому они являются почти совершенными изоляторами, проводимость их чрезвычайно низка. С возрастанием температуры число свободных электронов резко возрастает, и при достаточно высокой температуре полупроводники могут иметь проводимость, приближающуюся к проводимости металлов.

Эта сильная зависимость числа свободных электронов от температуры является самой характерной особенностью полупроводников, резко отличающей их от металлов, в которых число свободных электронов от температуры не зависит. Она указывает на то, что в полупроводниках для того, чтобы перевести электрон из «связанного» состояния, в котором он не может переходить от атома к атому, в «свободное» состояние, в котором он легко перемещается по телу, необходимо сообщить этому электрону некоторый запас энергии E . Эта величина E , называемая «энергией ионизации», для разных веществ различна, но в общем имеет значения от нескольких десятых электронвольта до нескольких электронвольт. При обычных температурах средняя энергия теплового движения много меньше этой величины, но, как мы знаем (т. I, «Теплота»), некоторые частицы (в частности, некоторые электроны) имеют скорости и энергии, значительно большие, чем среднее значение. Определенная, очень небольшая доля электронов имеет достаточный запас тепловой энергии, чтобы перейти из «связанного» состояния в «свободное». Эти электроны и обуславливают возможность прохождения электрического тока через полупроводник даже при комнатной температуре.

С повышением температуры число свободных электронов очень быстро возрастает. Так, например, если энергия E , необходимая для освобождения электрона, равна 1 эв , то при комнатной температуре примерно только 1 электрон на 10^{13} атомов будет иметь запас тепловой энергии, достаточный

для его освобождения. Концентрация свободных электронов будет очень мала (около 10^{10} на 1 см^3 вещества), но все же достаточна для создания измеримых электрических токов. Но если мы понизим температуру до -80°C , то число свободных электронов уменьшится приблизительно в 500 миллионов раз, и тело практически будет представлять собой изолятор. Напротив, при повышении температуры до 200°C число свободных электронов возрастет в 20 000 раз, а при повышении температуры до 800°C — в 500 миллионов раз. Проводимость тела при этом будет быстро возрастать, несмотря на противодействующее этому возрастанию уменьшение подвижности свободных электронов.

Таким образом, основное и принципиальное различие между полупроводниками и металлами заключается в том, что в полупроводниках для того, чтобы перевести электрон из связанного состояния в свободное, нужно извне сообщить ему некоторую добавочную энергию, а в металлах уже при самой низкой температуре имеется большое число свободных электронов. Силы молекулярного взаимодействия в металлах сами по себе оказываются достаточными для того, чтобы отщепить часть электронов.

Очень быстрое возрастание числа свободных электронов в полупроводниках при повышении их температуры приводит к тому, что изменение сопротивления полупроводников с температурой в 10—20 раз больше, чем у металлов. Сопротивление металлов изменяется в среднем на 0,3% на каждый градус изменения температуры; у полупроводников же повышение температуры на 1° изменяет электропроводность на 3—6%, повышение температуры на 10° — на 75,5%, а повышение температуры на 100° увеличивает проводимость в 50 раз.

Полупроводники, приспособленные для использования их очень большого температурного коэффициента сопротивления, получили в технике название термосопротивлений (иначе термисторов). Термосопротивления находят много очень важных и все расширяющихся применений в самых разнообразных областях техники: для автоматики и телемеханики, а также в качестве очень точных и чувствительных термометров.

Термометры сопротивления, или, как их называют, болометры, применялись в лабораторной практике уже давно, но раньше они изготовлялись из металлов, и это было связано с рядом трудностей, ограничивавших область их применения. Болометры приходилось делать из длинной тонкой проволоки, чтобы общее их сопротивление было достаточно велико по сравнению с сопротивлением подводящих проводов. Кроме того, изменение сопротивления металлов очень мало, и измерение температуры с помощью металлических болометров требовало чрезвычайно точного измерения сопротивлений. От этих недостатков свободны полупроводниковые болометры, или термосопротивления. Их удельное сопротивление настолько велико, что весь болометр может иметь размеры в несколько миллиметров или даже нескольких десятых долей милли-

метра. При таких малых размерах термосопротивление чрезвычайно быстро принимает температуру окружающей среды, что позволяет измерять температуру небольших предметов (например, листьев растений или отдельных участков человеческой кожи).

Чувствительность современных термосопротивлений настолько велика, что с их помощью можно обнаруживать и измерять изменения температуры на одну миллионную долю градуса. Это дало возможность применять их в современных приборах для измерения интенсивности очень слабого излучения вместо термостолбиков (§ 85).

В тех случаях, которые мы рассматривали выше, добавочная энергия, необходимая для освобождения электрона, сообщалась ему за счет *теплого* движения, т. е. за счет запасов внутренней энергии тела. Но эта энергия может передаваться электронам тела и при поглощении телом *световой* энергии. Сопротивление таких полупроводников при действии на них света значительно *уменьшается*. Это явление получило название *фотопроводимости* или *внутреннего фотоэлектрического эффекта*¹⁾. Приборы, основанные на этом явлении, в последнее время все шире и шире используются в технике для целей сигнализации и автоматики.

Мы видели, что в полупроводниках лишь очень небольшая доля всех электронов находится в *свободном* состоянии и участвует в проведении электрического тока. Но не следует думать, будто постоянно одни и те же электроны находятся в свободном состоянии, а все остальные — в *связанном*. Напротив, в полупроводнике все время идут два противоположных процесса. С одной стороны, идет процесс освобождения электронов за счет тепловой или световой энергии; с другой стороны, идет процесс *захвата* освобожденных электронов, т. е. воссоединения их с тем или иным из оставшихся в полупроводнике ионов — атомов, потерявших свой электрон. В среднем каждый освобожденный электрон остается свободным лишь очень короткое время — от 10^{-3} до 10^{-8} сек (от одной тысячной до одной стомиллионной секунды). Постоянно некоторая доля электронов оказывается свободной, но состав этих свободных электронов все время меняется: одни электроны переходят из связанного состояния в свободное, другие — из свободного в связанное.

¹⁾ Слово «внутренний» в этом названии подчеркивает тот факт, что освобождаемые светом электроны не вылетают за границы тела, как в явлении испускания электронов освещенным металлом, которое называют «внешним» фотоэлектрическим эффектом (§ 9), а остаются *внутри* тела и только изменяют его проводимость.

Равновесие между связанными и свободными электронами является подвижным, или динамическим.

§ 109. Движение электронов в полупроводниках. Полупроводники с электронной и «дырочной» проводимостью. В предыдущем параграфе мы видели, что в полупроводниках, как и в металлах, электрический ток осуществляется движением электронов. Однако условия и характер движения электронов в полупроводниках отличаются существенными особенностями, и это обуславливает своеобразные электрические свойства полупроводников.

В металлах концентрация свободных электронов очень велика, так что большая часть атомов оказывается ионизованной; практически вся электропроводность металлов объясняется поведением «свободных электронов», как об этом говорилось в гл. VII. В полупроводниках же, где концентрация свободных электронов значительно меньше, нужно учитывать, наряду с движением в электрическом поле этих свободных электронов, и другой процесс, который может играть не меньшую роль в их проводимости.

Сравнительно немногочисленные электроны, сделавшиеся свободными, оторвались, очевидно, от некоторых атомов полупроводника, которые, таким образом, превратились в ионы. Каждый из таких ионов окружен большим количеством нейтральных атомов. Нейтральные атомы, находящиеся в непосредственной близости к иону, могут легко отдавать ему свой электрон, делая его нейтральным, но сами превращаясь в ионы. Таким образом, этот обмен электронами приводит к тому, что место положительного иона в полупроводнике меняется, т. е. дело обстоит так, как будто переместился положительный заряд. Таким образом, наряду с перемещением свободных электронов в полупроводнике может происходить процесс, имеющий характер перемещения положительных зарядов.

Пока в полупроводнике не действует внешнее электрическое поле, оба эти процесса имеют хаотический характер, так что в среднем каждому электрону, смещенному в одном направлении, соответствует перемещение электрона в противоположном направлении; так же обстоит и с перемещением положительно заряженных мест. Но при наложении поля оба процесса получают преимущественное направление: свободные электроны движутся в некотором

избытке против поля, а положительные места — в некотором избытке по полю. Оба эти преимущественные перемещения дают ток одного направления (по полю), и результирующая электропроводность обуславливается обоими процессами.

Грубо схематический рис. 193 иллюстрирует описанный процесс. Если мы представим себе цепочку атомов полупроводника, в одном месте которой образовался

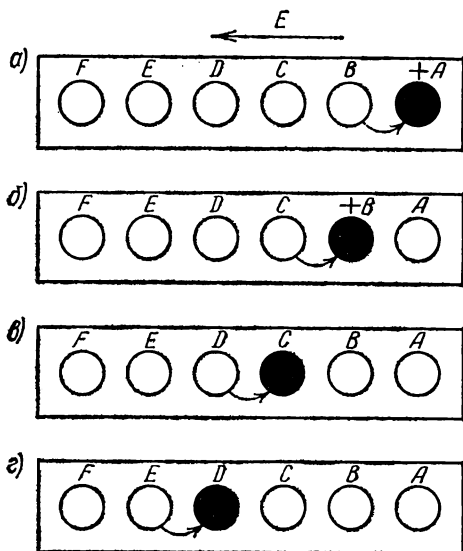


Рис. 193. Грубая модель «дырочной» проводимости в полупроводниках. Светлые кружки — нейтральные атомы, зачерненный кружок — положительный ион. Стрелками указано направление последовательных переходов электронов от нейтральных атомов к ионам. При этом место положительного заряда перемещается в обратном направлении — по полю.

положительный ион A, то под действием сил поля будет происходить перенос электрона от B к A, затем от C к B, от D к C и т. д., а результатом этого будет перемещение положительно заряженного места в обратном направлении.

Таким образом, в полупроводнике имеет место и движение свободных электронов против поля и перенос их от

нейтральных атомов к ионам, равносильный движению положительного заряда по направлению поля.

Очень часто, хотя и не совсем удачно, то место полупроводника, где вместо нейтрального атома имеется положительный ион, называют «дыркой» и говорят, что ток в проводнике осуществляется частично движением свободных электронов против поля и частично движением «дырок» по полю. Нужно только помнить при этом, что фактически всегда имеет место только движение электронов, но движение связанных электронов от атомов к ионам приводит к такому результату, как будто двигаются положительно заряженные «дырки».

В идеально чистом полупроводнике без всяких чужеродных примесей каждому освобожденному тепловым движением или светом электрону соответствовало бы образование одной дырки, т. е. число участвующих в создании тока электронов и дырок было бы одинаково.

Расчет и опыт показывают, что и подвижности электронов и дырок приблизительно одинаковы. Таким образом, участие электронов и дырок в переносе заряда, т. е. в создании электрического тока, в таком идеальном полупроводнике было бы почти одинаково. Приблизительно половина заряда переносилась бы движением свободных электронов против поля и половина — движением дырок по полю.

Однако такие идеально чистые полупроводники в природе не встречаются вовсе, а изготовить их искусственно необычайно трудно. Малейшие следы примесей, иногда даже не поддающиеся обнаружению с помощью самых тонких современных методов анализа, коренным образом меняют свойства полупроводников. В одних случаях влияние примесей проявляется в том, что «дырочный» механизм электропроводности становится практически невозможным, и ток в полупроводнике осуществляется только движением свободных электронов. Такие полупроводники называются «электронными полупроводниками» или «полупроводниками *n*-типа» (от слова «негативный» — отрицательный). В других случаях невозможным становится движение свободных электронов, и ток осуществляется только движением дырок. Эти полупроводники называются «дырочными полупроводниками», или «полупроводниками *p*-типа» (от слова «позитивный» — положительный).

Наряду с полупроводниками *p*- и *n*-типа, могут быть, разумеется, и полупроводники смешанного типа, в которых заметную роль играет и электронная и дырочная проводимость. В частности, смешанную проводимость мы имеем в рассмотренном выше беспримесном полупроводнике.

Чем объясняется это различие, мы поясним на примере важнейшего с точки зрения технических применений полупроводника — германия. Германий — химический элемент с порядковым номером 32 и атомным весом 72,6. В периодической системе элементов он находится в четвертом столбце и, как все элементы этой группы, является четырехвалентным, т. е. обладает четырьмя связями (валентными электронами), позволяющими ему соединяться с другими элементами. На рис. 194 схематически изображено строение кристалла германия.

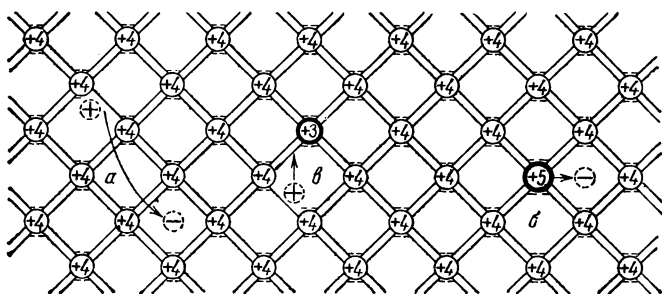


Рис. 194. Схема строения кристалла германия. Кружки с цифрой +4 обозначают атомы германия, кружки с цифрами +5 и +3 обозначают внедренные в германий атомы пятивалентного мышьяка и трехвалентного индия.

Кружочки с цифрами «+4» изображают отдельные атомы германия, каждый из которых связан с четырьмя своими соседями четырьмя парными связями (двойные линии на рис. 194). Эта связь создается взаимодействием одного из валентных электронов данного атома с одним из валентных электронов его соседа. Если под действием теплового движения или поглощенного света в каком-нибудь месте кристалла (место *а* на рис. 194) произойдет отрыв электрона, то там возникает незанятое место (дырка), а оторванный электрон становится свободным. Описанное выше перемещение электронов и дырок под действием сил поля обуславливает, как говорят, собственную проводимость германия. Число их относительно невелико: дырок и электронов при комнатной температуре имеется $2,5 \cdot 10^{13}$ на 1 см^3 , тогда как число атомов в 1 см^3 германия равно $4,2 \cdot 10^{22}$.

Представим себе теперь, что в германии имеется небольшая примесь какого-нибудь пятивалентного элемента, скажем, мышьяка, т. е. что небольшая доля атомов германия в кристалле замещена атомами мышьяка (место *б* на рис. 194). У мышьяка имеется пять валентных электронов, обеспечивающих его связи с другими атомами. Когда атом

мышьяка замещает атом германия, то четыре из этих электронов образуют прочные связи с четырьмя соседними атомами германия, а пятый оказывается связанным очень слабо и даже при комнатной температуре очень легко становится свободным за счет энергии теплового движения. Таким образом, почти каждый введенный в германий атом мышьяка создает один лишний свободный электрон. Число же «дырок» при этом не увеличивается, потому что оставшийся ион мышьяка прочно связан с четырьмя своими соседями двойными связями и переход электронов от соседних нейтральных атомов к иону мышьяка невозможен. Если даже количество введенного мышьяка было очень мало, например составляло только одну миллионную долю от числа атомов германия, то эта примесь даст около 10^{16} дополнительных электронов, т. е. примерно в 1000 раз больше, чем их имелось в чистом германии, но не увеличит числа дырок. В таком полупроводнике свободные электроны являются основными, т. е. представленными в большинстве носителями заряда, а дырки — не основными, т. е. представленными в меньшинстве. Иными словами, германий с примесью (даже очень малой) мышьяка становится электронным проводником *n*-типа.

Представим себе теперь, что мы ввели в германий примесь какого-нибудь трехвалентного элемента, например, индия (место *a* на рис. 194). Так как у индия имеется всего три валентных электрона, то он будет прочно связан только с тремя соседними атомами германия, а четвертая связь будет незаполнена.

При этих условиях какой-нибудь электрон соседнего атома может легко оторваться от своего атома и заполнить эту связь, а соответствующий атом превратится в ион («дырку»), связанный с соседними атомами только тремя связями. Атом индия при этом, конечно, окажется заряженным отрицательно. После этого электрон какого-нибудь соседнего атома может оторваться и заполнить недостающую связь у иона, а сам этот атом превратится в положительный ион и т. д. Таким образом, место, где находится положительный заряд, будет перемещаться по кристаллу. В поле это перемещение дырок носит направленный характер, т. е. происходит преимущественно по направлению поля, т. е. создает электрический ток. Мы видим, что введение в германий примеси индия увеличивает количество дырок, не увеличивая количества свободных электронов. Такой полупроводник является полупроводником дырочного типа (*p*-типа), т. е. в нем дырки являются основными носителями заряда, а электроны — неосновными.

Разобранный нами пример германия с примесями мышьяка и индия является относительно простым. На практике приходится встречаться и с более сложными случаями влияния примесей на электрические свойства полупроводников. Но во всяком случае этот пример показывает, каким образом даже ничтожные следы примесей могут коренным образом менять электрические свойства полупроводников и самый механизм прохождения через них тока. Это создает много трудностей в работе с полупроводниками, но это же обеспечивает и возможность получения полупроводников с разнообразными свойствами, дающими возможность применять их для решения очень важных и разнообразных технических задач. Уже в настоящее время можно насчитать более 20 производственных проблем, которые успешно решаются с помощью полупроводников, и число их с каждым годом растет.

Различие между электронной и дырочной проводимостью полупроводников позволило объяснить ряд фактов, которые раньше казались

загадочными и необъяснимыми. В § 84, например, говоря о полупроводниковых термоэлементах, мы указали, что в одних случаях ток в горячем спае течет от металла к полупроводнику, а в других случаях—от полупроводника к металлу. Теперь мы можем понять, в чем здесь дело. В электронном полупроводнике скорость электронов в горячем конце больше, чем в холодном. Поэтому электроны просачиваются, или, как говорят, диффундируют от горячего конца к холодному до тех пор, пока создающееся вследствие такого перераспределения зарядов электрическое поле не уравнивает этот поток диффундирующих электронов. Когда такое равновесие установится, то горячий конец, потерявший электроны, окажется заряженным положительно, а холодный конец, получивший избыток электронов, зарядится отрицательно. Иными словами, между горячим и холодным концами возникает некоторая положительная разность потенциалов.

В дырочном полупроводнике, наоборот, диффундируют от горячего конца к холодному дырки. Горячий конец заряжается отрицательно, а холодный — положительно. Знак разности потенциалов между горячим и холодным концами обратный.

§ 110. Полупроводниковые выпрямители. В местах контакта между двумя полупроводниками с разным механизмом проводимости — дырочным (*p*-тело) и электронным (*n*-тело) — наблюдается ряд замечательных явлений. Оказывается, что место контакта таких полупроводников обладает весьма различной электропроводностью в зависимости от того, будет ли электрическое поле направлено от *p*-тела к *n*-телу, или наоборот, от *n*-тела к *p*-телу. Если, например, привести в соприкосновение закись меди (Cu_2O), имеющую дырочную проводимость, и электронный полупроводник двуокись титана (TiO_2), то при одном и том же напряжении ток в направлении от закиси меди к двуокиси титана будет в 10 000 раз сильнее, чем в обратном направлении.

Чтобы понять причину этих явлений, нужно разобраться в процессах, происходящих на так называемых *p—n*-переходах, т. е. на границе соприкосновения дырочных и электронных полупроводников. В электронном проводнике основными носителями тока являются свободные электроны, число которых гораздо больше, чем число дырок. В дырочном проводнике, наоборот, число дырок гораздо больше, чем число свободных электронов. Когда мы приводим эти два вещества в соприкосновение, то электроны начинают диффундировать из *n*-тела, где их концентрация выше, в *p*-тело, где их имеется меньше, подобно тому, как атомы растворенного вещества диффундируют из крепкого раствора в слабый, если привести растворы в соприкосновение. Точно так же и по тем же причинам дырки будут диффундировать

из дырочного полупроводника в электронный. В результате этого пограничный слой обоих полупроводников обедняется основными носителями, т. е. на границе создается так называемый запорный слой, сопротивление которого значительно больше, чем сопротивление всей толщи обоих полупроводников. Фактически именно сопротивлением этого запорного слоя и определяется сопротивление всего тела.

Естественно возникает вопрос: до каких пор будет происходить уход дырок из p -тела в n -тело и уход электронов в обратном направлении? Ответить на этот вопрос нетрудно.

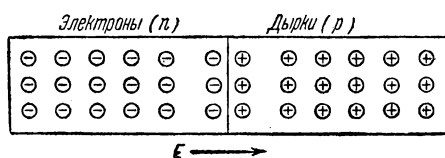


Рис. 195. Возникновение запорного слоя на границе n -полупроводника и p -полупроводника. E — поле, препятствующее диффузии электронов и дырок.

Так как из дырочного полупроводника уходят положительные заряды, а притекают в него электроны, то вблизи границы этот полупроводник заряжается отрицательно. Точно так же пограничный слой электронного полупроводника заряжается положительно, так как сюда притекают дырки, а отсюда уходят электроны. Таким образом, вблизи границы возникает двойной электрический слой, в котором поле направлено от электронного полупроводника к дырочному, т. е. противодействует диффузии электронов и дырок (поле E на рис. 195). Когда это поле достигнет такой напряженности, что его действие уравновесит стремление свободных электронов и дырок диффундировать в «чужие» области, — будет достигнуто равновесие, и дальнейшая диффузия прекратится.

Представим себе теперь, что мы присоединили нашу пластинку к батарее так, что электронный проводник соединен с минусом батареи, а дырочный с плюсом (рис. 196). Внешнее поле, которое сосредоточено преимущественно в запорном слое, имеющем наибольшее сопротивление, будет направ-

лено от дырочного полупроводника к электронному. Дырки и электроны будут двигаться к границе, н а в с т р е ч у друг другу (рис. 196, а); запиорный слой будет обогащаться электронами и дырками, и сопротивление его уменьшится. Ток в этом «пропускном» направлении будет силен. Напротив, если мы присоединим плюс батареи к электронному проводнику, а минус — к дырочному, то внешнее поле будет двигать электроны и дырки от границы в противоположные стороны (рис. 196, б), запиорный слой будет расширяться, и сопротивление тела резко возрастет.

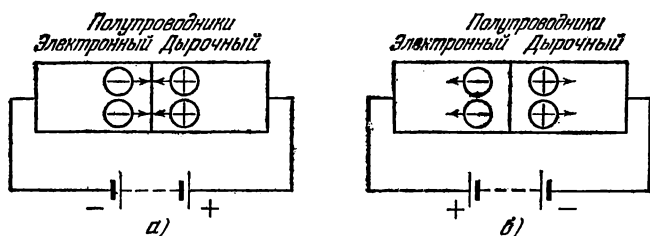


Рис. 196. Движение свободных электронов (кружки со знаком —) и дырок (кружки со знаком +) при прохождении тока через $p-n$ переход. а) Пропускное включение. б) Запорное включение.

В настоящее время выяснилось, что именно этим механизмом обусловлено сильное выпрямляющее действие так называемых меднозакисных (купроксных) и селеновых выпрямителей, разработанных более 30 лет тому назад чисто эмпирическим путем, без ясного понимания происходящих в них физических процессов.

Меднозакисный выпрямитель представляет собой медную пластинку, на которой при температуре свыше 1000°C наращивается слой закиси меди (Cu_2O); затем при температуре около 600°C этот слой насыщается кислородом и быстро охлаждается. После этого растворяют кислотой образовавшийся на поверхности закиси слой окиси меди (CuO) и наносят на закись слой металлической меди.

Если приготовленную таким образом пластинку включить в цепь батареи (рис. 197), то оказывается, что при таком

направлении тока, когда он идет от закиси меди к медной пластинке, ток очень силен, т. е. сопротивление пластинки очень мало. Если же переменить местами полюсы батареи, т. е. заставить ток идти от медной пластинки к закиси меди, то величина тока станет в тысячи раз меньше, т. е. в этом направлении пластинка имеет сопротивление в тысячи раз

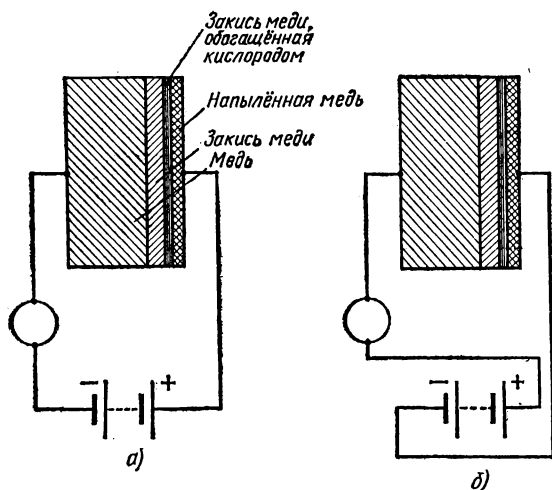


Рис. 197. Через меднозакисный выпрямитель проходит сильный ток при включении по схеме а) и очень слабый при включении по схеме б).

большее. Таким образом, наша пластинка представляет собой электрический вентиль, подобный двух-электродной лампе (§ 106): она пропускает ток в одном направлении и почти не пропускает его в обратном направлении. Причина явления заключается в том, что на основном медном электроде имеется слой закиси, образованный окислением меди и содержащий примеси меди и других металлов; этот слой является электронным полупроводником. Но внешний слой закиси, обогащенный кислородом, является дырочным полупроводником. Таким образом в толще закиси меди имеется $p-n$ -переход, т. е. граница между полупроводниками p - и n -типа. Здесь и возникает запорный слой, обуславливающий одностороннюю проводимость.

Таковыми же свойствами обладает селеновый выпрямитель. Он представляет собой нанесенный на никелированную железную пластинку слой селена, поверх которого наносится второй электрод из сплава кадмия, олова и висмута. После длительного прогрева и пропускания тока такая система тоже приобретает свойство односторонней проводимости, т. е. становится электрическим вентилем. В селеновых выпрямителях запорный слой образуется также на границе между селеном (дырочным полупроводником) и селенистым кадмием, который возникает в процессе обработки пластин и имеет электронный механизм проводимости.

За послевоенные годы широкое распространение в технике, особенно в радиотехнике, получили полупроводниковые выпрямители из германия и кремния. Мы видели в предыдущем параграфе, что характер проводимости германия можно изменять, вводя в него небольшое число примесных атомов того или другого рода. Если, например, на одной из поверхностей германия с электронной проводимостью расплавить небольшой кусок индия, то тонкий поверхностный слой, в который проникнут на некоторую глубину атомы индия, станет дырочным полупроводником и в толще германия создастся p - n -переход, который будет иметь выпрямляющее свойство (одностороннюю проводимость). На рис. 198 показано устройство одного из типов таких германиевых выпрямителей, а на рис. 199 его вольтамперная характеристика, т. е. кривая, изображающая зависимость величины тока через выпрямитель от приложенного к нему напряжения. Мы видим из этой кривой, что в пропускном направлении ток равен 1 а уже при напряжении в 0,75 в, т. е. сопротивление германия очень мало. В запорном же направлении ток очень мал (около 0,05 ма) и практически не зависит от напряжения вплоть до напряжения около 400 в, когда наступает пробой.

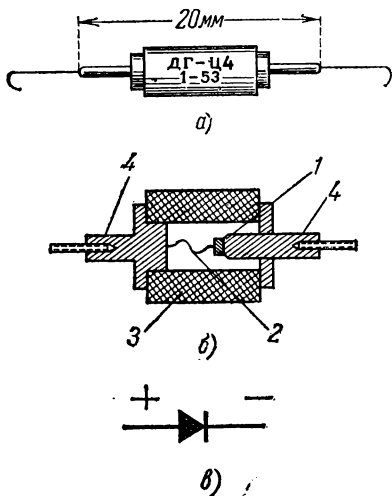


Рис. 198. Германиевый выпрямитель. а) Наружный вид. б) Разрез. в) Схематическое изображение. 1 — германиевая пластинка; 2 — вольфрамовая пружинка с острием; 3 — керамический цилиндр; 4 — латунные держатели.

Из германия с p — n -переходами в настоящее время изготавливают также и полупроводниковые усилители, которые заменяют трехэлектродную усилительную электронную лампу. Такие приборы во многих случаях имеют большие преимущества по сравнению

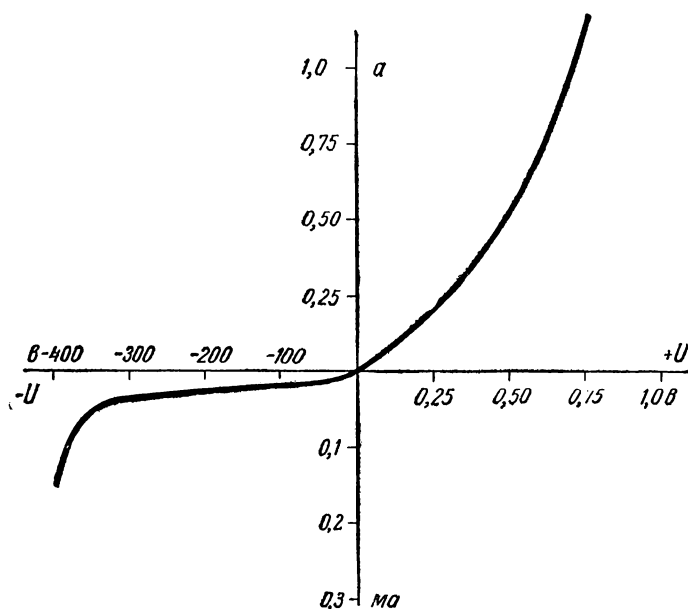


Рис. 199. Вольтамперная характеристика германиевого выпрямителя.

с вакуумными электронными лампами, так как они обладают гораздо меньшими размерами, имеют значительно больший срок службы и требуют меньшей мощности питания, чем электронные лампы.

§ 111. Полупроводниковые фотоэлементы. Если в каком-нибудь полупроводниковом выпрямителе, например медно-закисном или селеновом, сделать внешний электрод настолько тонким, чтобы он был прозрачен для света, то при освещении полупроводника в цепи, в которую он включен, возникает электрический ток (рис. 200). Таким образом, в этих случаях свет является источником электродвижущей силы, т. е. *пластинка полупроводника представляет собой генератор электрического тока, в котором световая энергия преобразуется в электрическую.*

При сильном освещении полупроводниковые фотоэлементы могут давать довольно значительную э. д. с. (до 1 в) и довольно большой ток, но их коэффициент полезного действия (доля поглощаемой ими световой энергии, превращающаяся в электрическую) невелик. Даже в лучших фотоэлементах до последнего времени он не превышал 1%. Сейчас

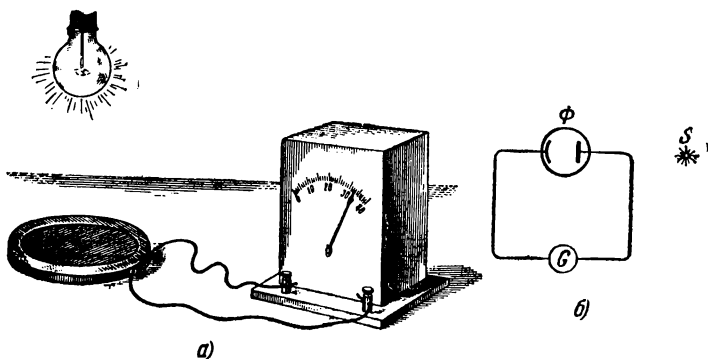


Рис. 200. При действии света на полупроводниковый фотоэлемент в цепи возникает ток. а) Изображение опыта. б) Схема его; S — источник света; Φ — фотоэлемент; G — гальванометр.

усиленно разрабатываются фотоэлементы на основе кремния и германия со значительно большим коэффициентом полезного действия, так что не исключена возможность их использования в будущем в качестве достаточно экономичных источников тока. Пока же полупроводниковые фотоэлементы применяются в основном для измерения интенсивности света, а также для целей автоматики, сигнализации и телеуправления. Делаются также попытки применения их в звуковом кино.

ОСНОВНЫЕ МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

§ 112. Естественные и искусственные магниты. Прежде чем углублять наши знания о магнитных явлениях, напомним некоторые известные факты.

1) В природе встречаются некоторые железные руды, обладающие способностью притягивать к себе находящиеся поблизости небольшие железные предметы, например железные опилки или гвозди (рис. 201, а). Если кусок такой руды подвесить на нитке, он установится по длине в направлении с севера на юг (рис. 201, б). Куски такой руды называются естественными магнитами.

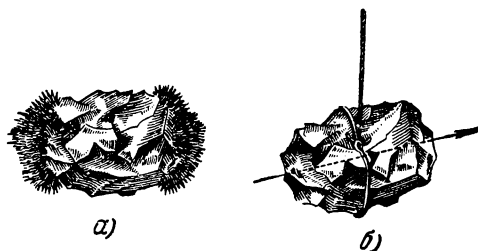


Рис. 201. Естественный магнит. а) Кусок магнитной руды притягивает к себе железные опилки. б) Кусок магнитной руды, подвешенный на нити, устанавливается определенным образом — с севера на юг.

2) Кусок железа или стали, находящийся вблизи магнита, сам намагничивается, т. е. приобретает способность притягивать к себе другие железные предметы (рис. 202). Магнитные свойства этого куска железа или стали проявляются тем сильнее, чем ближе он находится к магниту. Особенно

сильно намагничивание в том случае, когда железо притянуто к магниту вплотную.

3) После удаления магнита намагнитившийся под его действием кусок железа или стали теряет значительную часть своих магнитных свойств, но все же остается в большей или меньшей мере намагниченным.

Он превращается, таким образом, в искусственный магнит, обладающий всеми теми же свойствами, что и магнит естественный. В этом можно убедиться при помощи такого простого опыта. На рис. 203, а стальной брусок *a*, притянутый к концу магнита *M*, сам намагни-

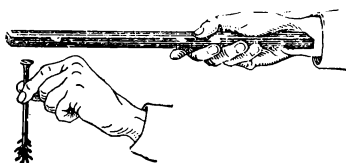


Рис. 202. Железный гвоздь, поднесенный к магниту, сам намагничивается и притягивает к себе железные опилки.

тился настолько сильно, что он удерживает груз, состоящий из нескольких таких же брусков *b*, *c*, *d*, *e*. В свою очередь каждый из этих брусков удерживает силами магнитного притяжения груз всех брусков, расположенных ниже

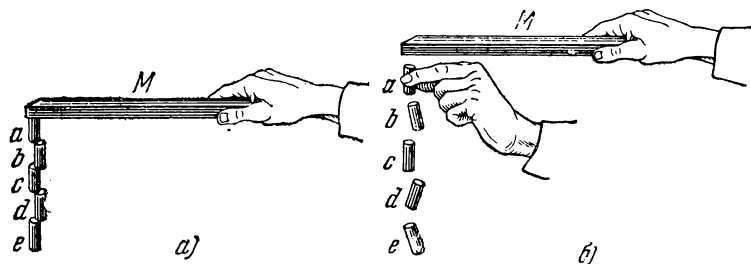


Рис. 203. Намагничивание железных предметов возрастает по мере приближения их к магниту. а) Верхний брусок *a* притянут к магниту *M* вплотную и намагнитился настолько сильно, что удерживает всю цепочку *b*, *c*, *d*, *e*. б) Магнит *M* отодвинут от бруска *a*, намагничивание ослабло и цепочка распалась.

его. Таким образом, вся цепочка висит, удерживаясь с и л а м и м а г н и т н о г о п р и т я ж е н и я, которые уравновешивают силы тяжести. Если мы немного отодвинем магнит *M*, придерживая пальцами верхний брусок, то цепочка рассыплется: бруски размагнитиваются настолько, что каждый из них уже не в состоянии удержать груз нижних брусков (рис. 203, б). Легко, однако, видеть, что все же каждый из

брусков сохранил известную долю намагничивания. Достаточно внести какой-нибудь из этих брусков в железные опилки, и мы увидим, что они пристанут к его концам.

То намагничивание, которое имело место, когда наш кусок железа находился вблизи магнита, называют в р е м е н н ы м н а м а г н и ч и в а н и е м, в отличие от постоянного, или остаточного, н а м а г н и ч и в а н и я, которое сохраняется и после удаления магнита.

Опыты этого рода показывают, что о с т а т о ч н о е н а м а г н и ч и в а н и е, вообще говоря, значительно меньше временного; у мягкого железа оно составляет лишь небольшую долю его.

4) Как временное, так и остаточное намагничивания различны для р а з н ы х с о р т о в железа и стали. Временное намагничивание мягкого, отожженного железа значительно сильнее, чем неотожженного железа или стали. Напротив, остаточное намагничивание стали, особенно некоторых специальных сортов ее, например содержащих примесь кобальта, значительно больше, чем остаточное намагничивание мягкого железа. Таким образом, если мы возьмем два одинаковых бруска — один из мягкого железа, другой из стали — и поместим их вблизи одного и того же магнита, то железный брусок намагничивается значительно сильнее, чем стальной. Но когда мы магнит уберем, то железный брусок размагнитится почти полностью, а стальной сохранит значительную долю своего намагничивания. В результате стальной брусок превратится в значительно более сильный постоянный магнит, чем железный. Поэтому постоянные искусственные магниты всегда готовят из специальных сортов стали, а не из железа.

5) Искусственные магниты, получаемые путем простого помещения куска стали вблизи магнита или прикосновением его к магниту, довольно слабы. Более сильные магниты получаются, если натирать стальную полосу магнитом в одном направлении. Однако и в этом случае мы всегда получаем магнит более слабый, чем тот, при помощи которого производилось намагничивание. Всякого рода удары и встряхивание во время намагничивания благоприятствуют ему. Напротив, сотрясения готового постоянного магнита, а также резкие изменения его температуры способствуют размагничиванию.

Остаточное намагничивание зависит не только от материала, но и от ф о р м ы намагничиваемого тела. Сравнительно короткие и толстые

бруски из мягкого железа, как мы говорили, размагничиваются после удаления магнита почти полностью. Но если из того же железа мы приготовим кусок проволоки, длина которого в 300—500 раз больше ее диаметра, то эта проволока, не свернутая в бухту или клубок, в значительно большей степени сохраняет свое намагничивание.

У п р а ж н е н и я. 112.1. Вертикальный магнит притягивает к себе железный шарик. Положим, что шарик помещен на таком расстоянии от магнита, что это притяжение в точности уравнивает вес шарика, так что он может висеть в воздухе без опоры. Устойчивое ли это равновесие или неустойчивое? Куда будет двигаться шарик, если мы чуть-чуть поднимем или опустим его из положения равновесия?

112.2. Железный кубик, лежащий на гладком стекле, притягивается к магниту, тоже лежащему на этом стекле. Кубик скользит по стеклу. Как он движется: равномерно, равномерно ускоренно, ускоренно?

§ 113. Полюсы магнита и его нейтральная зона. Посмотрим, одинаковы ли магнитные свойства естественного или искусственного магнита в разных точках его поверхности. Возьмем железный шарик, укрепленный на одном конце слабой спиральной пружинки. Прикоснемся этим шариком к какому-нибудь месту магнита M , а затем будем отрывать шарик, растягивая пружинку (рис. 204). Растяжение пружинки в момент отрыва шарика дает нам наглядное представление о той силе, которая необходима, чтобы преодолеть притяжение шарика к данному месту магнита. Оказывается, что в одних точках — у концов магнита — для того, чтобы оторвать шарик, требуется довольно значительное усилие, а в других точках — у середины магнита — шарик почти не притягивается к нему.

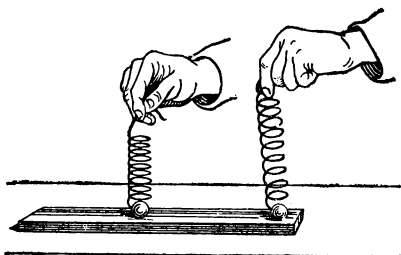


Рис. 204. У середины магнита сила притяжения мала, у концов его — велика. Об этом можно судить по растяжению пружины в момент отрыва железного шарика.



Рис. 205. Железные опилки пристаут в виде «бороды» к концам магнита и не пристаут к его середине.

По этой же причине, если погрузить магнит в железные опилки и затем вынуть его, то мы увидим, что опилки пристаут в виде густой «бороды» к концам магнита и не пристаут к его середине (рис. 205).

Те части поверхности магнита, в которых притяжение железных предметов проявляется заметным образом, называют **полюсными областями**, или коротко, **полюсами** магнита, а та часть поверхности магнита, в которой силы притяжения не обнаруживаются или очень слабы, называется **нейтральной областью**, или **нейтральной зоной** магнита.

Обычно искусственным магнитам придают вид полосы — прямой или подковообразной (рис. 206, *а* и *б*). Такие магниты почти всегда имеют два полюса на концах полосы и нейтральную зону между ними. Можно, однако, намагнитить кусок стали так, чтобы он имел не 2, а 4, 6 ... и т. д.

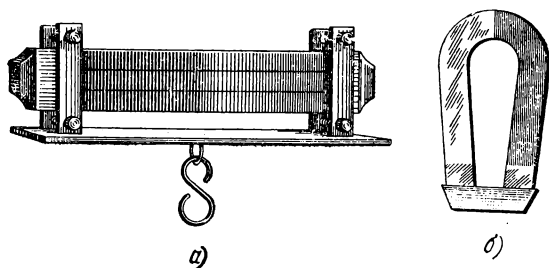


Рис. 206. Обычные формы постоянных магнитов: *а*) полосовая и *б*) подковообразная. При хранении концы магнита соединяют железным бруском (якорем), чтобы предохранить магниты от размагничивания.

полюсов, разделенных нейтральными зонами. Но, что особенно важно отметить, **никогда не удается получить магнит с нечетным числом полюсов**. В частности, **невозможно получить магнит с одним полюсом**.

Соотношение между размерами полюсных областей и нейтральной зоны зависит от **формы** магнита.

Если изготовить магнит в виде очень длинного и тонкого стержня, то полюсные области его сводятся почти к точкам, лежащим у концов магнита, а вся остальная поверхность представляет собой нейтральную зону. Подобный удлинённый магнит можно назвать **магнитной стрелкой**. Часто магнитной стрелке придают вид вытянутого ромба (рис. 207). Если такую стрелку укрепить на острие или подвесить так, чтобы она могла свободно вращаться, то она всег-

да устанавливается так, чтобы один из ее полюсов был обращен к северу, а другой к югу; точно так же ориентируется и любой магнит, подвешенный на тонкой, легко закручивающейся нити. Тот полюс магнита, который поворачивается к северу, называют северным полюсом, а другой полюс — южным. Магнитные стрелки особенно удобны для обнаружения магнитных свойств естественного или искусственного магнита. Приближая к стрелке магнит, мы увидим, что ее северный полюс притягивается к южному полюсу магнита и отталкивается от северного (и наоборот), так что магнитная стрелка под действием

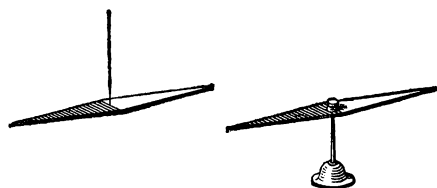


Рис. 207. Магнитные стрелки в виде вытянутого ромба: подвешенная на нити и укрепленная на острие.

магнита поворачивается на своей оси. Способность магнита поворачивать и притягивать железные тела сводится к таким же действиям: приближение магнита к железу прежде всего намагничивает железо, т. е. обращает его в слабый магнит, который поворачивается нашим магнитом и притягивается к нему.

С помощью магнитной стрелки мы можем также легко различить, имеем ли мы дело с ненамагниченным куском железа или с магнитом. Поднося к концу стрелки конец магнита, мы вызовем или притяжение или отталкивание, в зависимости от того, сближаются ли одноименные или разноименные полюсы стрелки и исследуемого магнита. При поднесении же к концу стрелки железа мы всегда обнаружим притяжение; ближайший к полюсу стрелки конец железа всегда намагничивается противоположно этому полюсу; второй, удаленный конец железного куска намагничивается, конечно, противоположно ближнему концу, т. е. одноименно с рассматриваемым полюсом стрелки, но его взаимодействие со стрелкой будет гораздо слабее,

и мы обнаружим только взаимодействие разноименных полюсов, т. е. притяжение стрелки к железу.

У п р а ж н е н и я. 113.1. Имеется стальная спица. Как узнать, намагничена ли она, не пользуясь ничем, кроме этой спицы?

113.2. Имеются два стальных бруска, из которых только один намагничен. Как узнать, какой именно брусок намагничен, не пользуясь ничем, кроме этих брусков?

§ 114. Магнитные действия электрического тока. Простейшие электрические и магнитные явления известны людям с очень давних времен.

По-видимому, уже за 600 лет до н. э. греки знали, что магнит притягивает к себе железо, а натертый янтарь — легкие предметы, вроде соломинок и т. п. Однако различие между электрическими и магнитными притяжениями было еще не ясно; те и другие считались явлениями одной природы.

Четкое разграничение этих явлений составляет заслугу Уильяма Джильберта ¹⁾, который в 1600 г. выпустил в свет книгу под названием «Новая физиология о магнитах, магнитных силах и великом магните Земли». С этой книги, собственно, и начинается подлинно научное изучение электрических и магнитных явлений. Джильберт описал в своей книге все свойства магнитов, которые в его эпоху были известны, а также изложил результаты собственных очень важных опытов. Он указал на ряд существенных различий между электрическими и магнитными притяжениями и ввел самое слово «электричество».

Хотя после Джильберта различие между электрическими и магнитными явлениями было уже для всех неоспоримо ясно, тем не менее ряд фактов указывал на то, что при всем своем различии эти явления каким-то образом тесно и неразрывно связаны друг с другом. Наиболее бросающимися в глаза были факты намагничивания железных предметов и переманичивания магнитных стрелок под влиянием молний. В своей работе «Гром и молния» Араго ²⁾ описывает, например, такой случай. «В июле 1681 г. корабль «Королева», находившийся в сотне миль от берега, в открытом море, был поражен молнией, которая причинила значительные повреждения в мачтах, парусах и пр. Когда же наступила ночь, то по положению звезд выяснилось, что из трех компасов, имевшихся на корабле, два вместо того, чтобы указывать на север, стали указывать на юг, а третий стал указывать на запад». Араго описывает также случай, когда молния, ударившая в дом, сильно намагнитила в нем стальные ножи, вилки и другие предметы.

В начале XVIII века было уже установлено, что молния, по сути дела, представляет собой сильный э л е к т р и ч е с к и й т о к, идущий через воздух; поэтому факты вроде описанных выше могли подсказать мысль, что всякий электри-

¹⁾ Уильям Джильберт (1544—1603) — английский врач и естественный исследователь.

²⁾ Доминик Араго (1786—1853) — французский физик.

ческий ток обладает какими-то магнитными свойствами. Однако обнаружить на опыте эти свойства тока и изучить их удалось только в 1820 г. Эрстеду¹⁾.

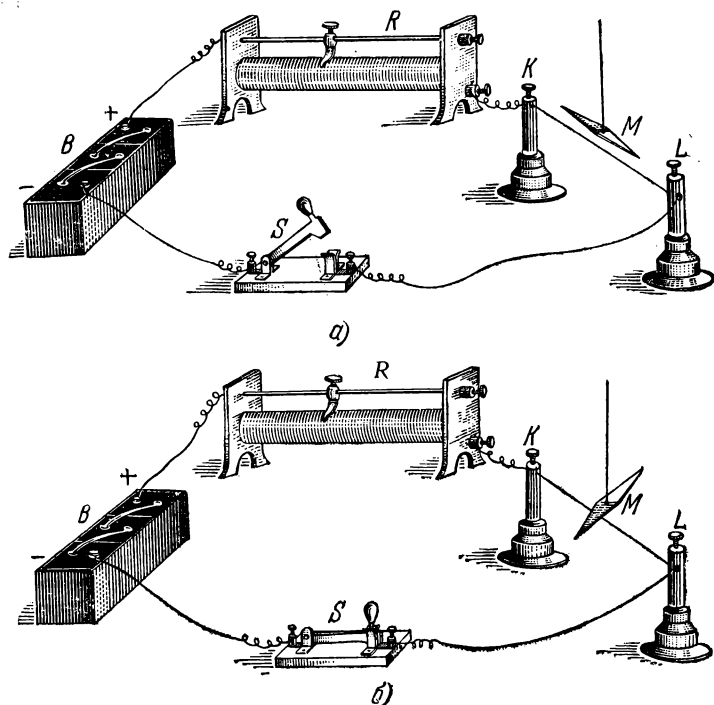


Рис. 208. Опыт Эрстеда с магнитной стрелкой, обнаруживающий существование магнитного поля тока. B — батарея гальванических элементов, создающих ток; KL — провод, по которому течет ток, когда цепь замкнута; M — магнитная стрелка, подвешенная параллельно проводу KL ; R — реостат, служащий для ограничения тока через провод KL , имеющий очень малое сопротивление; S — ключ. а) Разомкнутая цепь. б) Замкнутая цепь; магнитная стрелка M повернулась перпендикулярно к проводу KL .

Основной опыт Эрстеда изображен на рис. 208, а и б. Над неподвижным проводом KL , расположенным вдоль меридиана, т. е. в направлении север — юг, подвешена на тонкой нити магнитная стрелка (рис. 208, а). Стрелка, как известно,

¹⁾ Ганс Христиан Эрстед (1777—1851) — датский физик.

устанавливается также приблизительно по линии север — юг и поэтому она располагается примерно параллельно проводу. Но как только мы замкнем ключ и пустим ток по проводу KL , мы увидим, что магнитная стрелка поворачивается, стремясь установиться под прямым углом к нему т. е. в плоскости, перпендикулярной к проводу (рис. 208, б). Этот фундаментальный опыт показывает, что в пространстве, окружающем проводник с током, действуют силы, вызывающие движение магнитной стрелки, т. е. силы, подобные тем, которые действуют вблизи естественных и искусственных магнитов. Такие силы мы будем называть магнитными силами, так же как мы называем силы, действующие на электрические заряды, электрическими.

В главе II мы ввели понятие электрического поля для обозначения того особого состояния пространства, которое проявляется в действиях электрических сил. Точно так же мы будем называть магнитным полем то состояние пространства, которое дает себя действием магнитных сил. Таким образом, опыт Эрстеда доказывает, что *в пространстве, окружающем электрический ток, возникают магнитные силы, т. е. создается магнитное поле.*

Первый вопрос, который поставил перед собой Эрстед после того, как он сделал свое замечательное открытие, был таков: влияет ли вещество провода на создаваемое током магнитное поле? «Соединительный провод, — пишет Эрстед, — может состоять из нескольких проволок или металлических полос. Природа металла не меняет результата, разве только, пожалуй, в отношении величины¹⁾».

С одинаковым результатом мы пользовались проволоками из платины, золота, серебра, латуни и железа, а также оловянными и свинцовыми полосами и ртутью».

Все свои опыты Эрстед проводил с металлами, т. е. с проводниками, в которых проводимость, как мы теперь знаем, имеет электронный характер. Нетрудно, однако, изменить опыт Эрстеда, заменив металлический провод трубкой с электролитом или трубкой, в которой происходит

¹⁾ Разные металлы имеют разное сопротивление. Поэтому при присоединении их к одной и той же батарее, как это делал Эрстед, величина тока была различна, а потому было различно и магнитное действие этого тока. Надо помнить, что Эрстед производил свои опыты ранее, чем был установлен закон Ома и выяснено понятие о сопротивлении проводников и его зависимости от материала.

разряд в газе. Такие опыты мы уже описали выше, в § 41 (рис. 74, стр. 116) и видели, что хотя в этих случаях электрический ток обусловлен движением положительных и отрицательных ионов, но действие его на магнитную стрелку то же, что и в случае тока в металлическом проводнике. Какова бы ни была природа проводника, по которому течет ток, вокруг проводника всегда создается магнитное поле, под влиянием которого стрелка поворачивается, стремясь стать перпендикулярно к направлению тока.

Таким образом, мы можем утверждать: *вокруг всякого тока возникает магнитное поле*. Об этом важнейшем свойстве электрического тока мы уже упоминали (§ 40), когда говорили подробнее о других его действиях — тепловом и химическом.

Из трех свойств или проявлений электрического тока наиболее характерным является именно создание магнитного поля. Химические действия тока в одних проводниках — электролитах — имеют место, в других — металлах — отсутствуют. Выделяемое током тепло может быть при одном и том же токе больше или меньше, в зависимости от сопротивления проводника. В сверхпроводниках возможно даже прохождение тока без выделения тепла (§ 49). Но *магнитное поле — неотделимый спутник всякого электрического тока*. Оно не зависит ни от каких специальных свойств того или иного проводника и определяется лишь величиной и направлением тока. Большинство технических применений электричества также связано с наличием магнитного поля тока.

§ 115. Магнитные действия токов и постоянных магнитов одинаковы. Открытие Эрстеда вызвало необычайный интерес среди всех физиков и послужило началом ряда замечательных исследований, показавших тождественность магнитных действий токов и постоянных магнитов. На некоторых из этих явлений мы остановимся немного подробнее.

1) В опыте Эрстеда мы видели, что ток действует на магнит. Существует ли обратное действие магнита на проводник с током?

Положим на стол неподвижный полосовой магнит M , а над ним подвесим параллельно ему проводник KL на гибких металлических шнурах, подводящих к нему ток и дающих ему вместе с тем возможность поворачиваться

(рис. 209, а). Как только мы включим ток, проводник KL повернется, стремясь установиться перпендикулярно к магниту (рис. 209, б).

Другой вариант этого же опыта показан на рис. 210. Гибкий проводник KL подвешен рядом с намагниченным стержнем NS (рис. 210, а). Когда по проводнику идет ток, то на каждый участок гибкого проводника действует сила, стремящаяся установить этот участок перпендикулярно к магниту. Под действием этих сил при включении тока проводник обвивается вокруг магнита (рис. 210, б). Из этого опыта

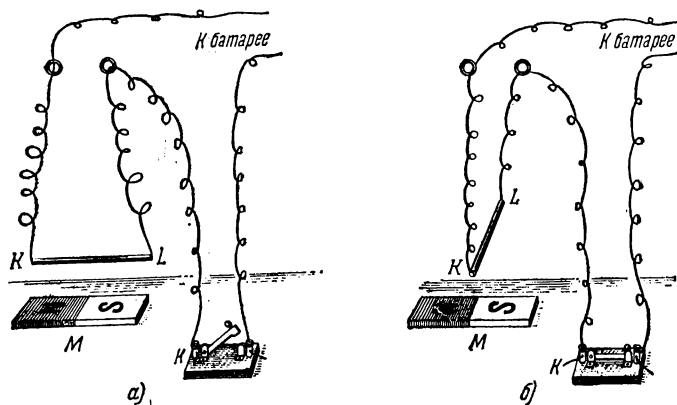


Рис. 209. Обращение опыта Эрстеда. Магнит M лежит на столе. Над ним подвешен на гибких шнурах проводник KL . а) Ток выключен. б) При включении тока проводник KL поворачивается, стремясь установиться перпендикулярно магниту.

ясно, что *магнит действует на проводник с током*, причем обнаруживается, что магнит действует на *каждый* *участок* проводника с током.

Еще один опыт, в котором также проявляются эти силы, изображен на рис. 211. Между полюсами неподвижного магнита M свободно подвешена рамка L , сделанная из нескольких витков проволоки (рис. 211, а). К ней может быть подведен ток через зажимы A и K . После включения тока рамка устанавливается перпендикулярно к линии, соединяющей полюсы магнита (рис. 211, б). Такое соединение магнита и рамки используется в гальванометрах для измерения постоянного тока (см. дальше § 136).

Описанный в § 103 опыт отклонения катодного луча магнитом есть также проявление действия магнита на ток, ибо пучок катодных лучей представляет собой электрический ток.

2) Магнит обладает способностью намагничивать железо и притягивать его к себе. Обладает ли такой же способностью электрический ток? Еще в 1820 г. Араго заметил, что если

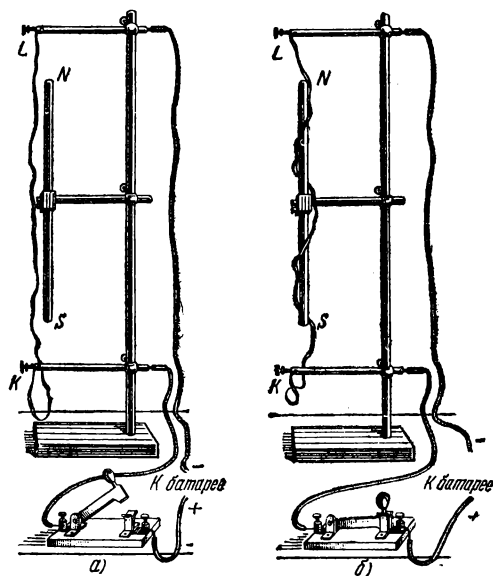


Рис. 210. Опыт, обратный опыту Эрстеда: магнит NS закреплен неподвижно, а провода, идущие к батарее, сделаны гибкими. а) Ток выключен. б) Ток включен; провод обвился вокруг магнита.

погрузить провод, по которому идет достаточно большой ток, в железные опилки, то частицы железа пристаут к нему так же, как к магниту. Провод обрастает густой «бородой» из опилок. Если выключить ток, опилки сейчас же отпадают. Материал проводника безразличен. Обычно пользуются медным проводом. Для того чтобы ток не проходил через опилки, провод следует брать в изолирующей обмотке. При большом токе можно даже не погружать провод в опилки, а только близко поднести его.

Немного позже Араго и Ампер¹⁾ нашли способ сильно намагничивать железо и сталь при помощи электрического тока. Они наматывали провод в виде спирали из большого числа витков и внутрь такой катушки помещали стальную иглу. По этой спирали они пропускали сильный электрический ток, а затем вынимали иглу, которая оказывалась

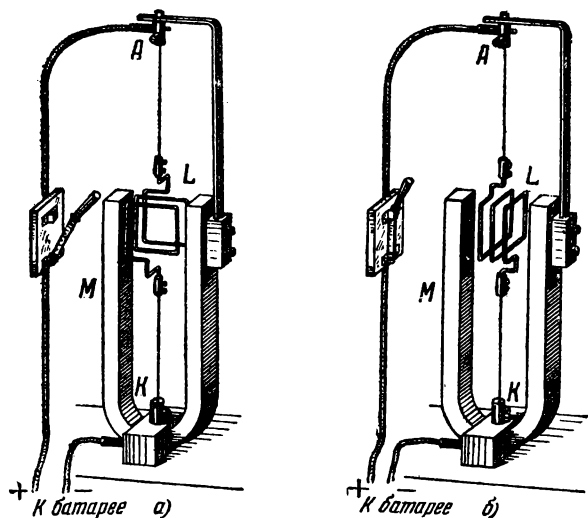


Рис. 211. При включении тока катушка, подвешенная между полюсами магнита, поворачивается и устанавливается перпендикулярно к линии, соединяющей полюсы магнита. а) Рамка при выключенном токе. б) Рамка при включенном токе.

сильно намагниченной. На одном конце ее был северный полюс, на другом — южный. При перемене направления тока полюсы менялись местами.

3) Магнитная стрелка, могущая свободно вращаться вокруг вертикальной оси, устанавливается, как известно, в определенном направлении — приблизительно с севера на юг. Ориентирует ли Земля также и электрические токи? В том же 1820 г. Ампер обнаружил и ориентирующее влияние Земли на виток с электрическим током. Прибор Ампера состоит из проволоочного витка L в форме почти замкнутого

¹⁾ Андре Ампер (1775—1836) — французский физик.

кольца диаметром около 40 см или квадратной рамки (рис. 212, а); концы витка находятся точно один под другим и на небольшом расстоянии друг от друга. К ним прикреплены два стальных острия *A* и *K*, опущенных в чашечки с ртутью, к которым присоединены проводники, идущие от батарей. Благодаря такому устройству виток может свободно вращаться на остриях, и при этом движении цепь тока не прерывается. (Вместо этого можно, конечно, просто подвесить

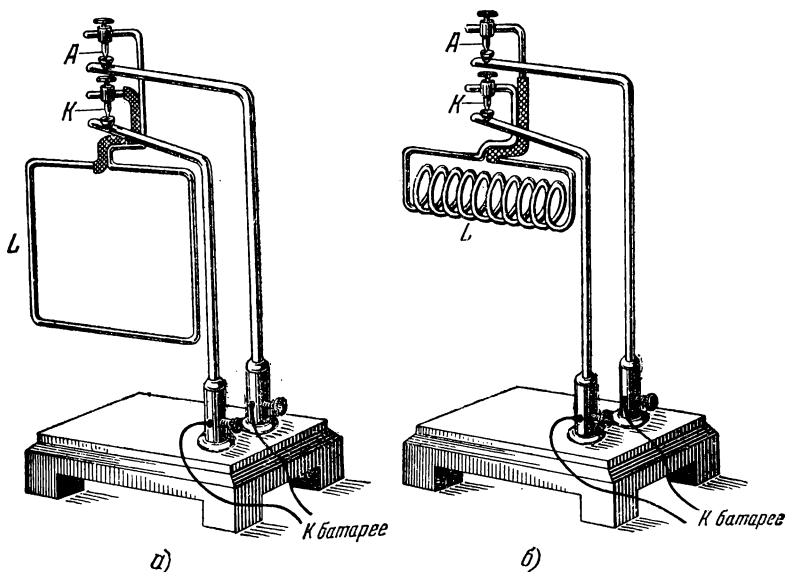


Рис. 212. Прибор Ампера для обнаружения действия магнитного поля Земли на виток тока. а) Свободно подвешенный виток *L* устанавливается так, что плоскость его приблизительно перпендикулярна к меридиану (с запада на восток). б) Рамка заменена соленоидом *L*.

рамку или соленоид на гибких металлических шнурах, как в опыте на рис. 211.) При замыкании тока виток приходит в движение и плоскость его устанавливается приблизительно в направлении с запада на восток. Таким образом, действие магнитного поля Земли на виток с током таково же, как и на магнитную стрелку, ось которой перпендикулярна к плоскости витка.

Особенно удобно наблюдать это ориентирующее действие Земли на виток с током, если в приборе Ампера подвесить

не один виток, а катушку, или, как говорят, соленоид, состоящий из большого числа таких витков (рис. 212, б).

4) Ампер установил также новое и чрезвычайно важное явление — взаимодействие между двумя

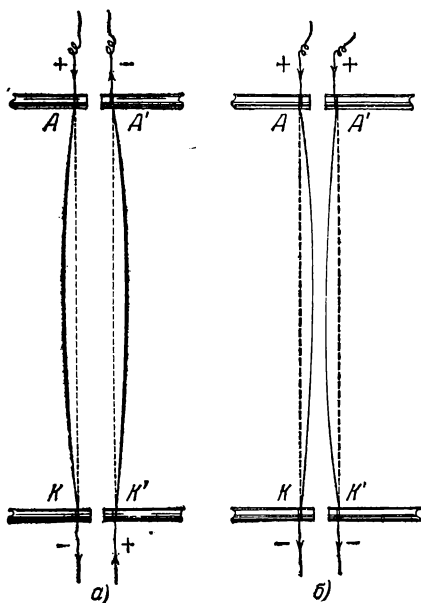


Рис. 213. а) Два параллельных проводника отталкиваются друг от друга, если по ним проходят электрические токи в противоположных направлениях. б) Два параллельных проводника притягиваются друг к другу, если по ним проходят электрические токи в одинаковом направлении. А и К — контакты. Пунктиром показано положение обоих проводов при отсутствии тока в них.

проводниками, по которым идет ток. Если мы расположим, например, две длинные гибкие проволоки параллельно друг другу, то при включении в них тока эти проводники будут друг от друга отталкиваться, если токи в них противоположны по направлению (рис. 213, а); напротив, проволоки будут друг к другу притягиваться, если токи в них имеют одинаковые направления (рис. 213, б). Движения проводников, вызываемые взаимодействием между ними, могут быть весьма разнообразны в зависимости от формы проводников, их взаимного расположения и условий закрепления. Опыт, иллюстрирующий характер взаимодействия между двумя соленоидами с током, изображен на рис. 214. Следует обратить внимание на то, что движе-

ния — повороты, притяжения и отталкивания — двух соленоидов носят такой же характер, как и движения двух намагниченных брусков (магнитных стрелок), но только вместо надевания друг на друга магниты притягиваются до упора. Мы видим, что *по всем своим магнитным*

свойствам соленоид с током совершенно подобен магнитной стрелке.

Из этих опытов можно заключить, что магнитные действия магнитов вполне тождественны магнитным

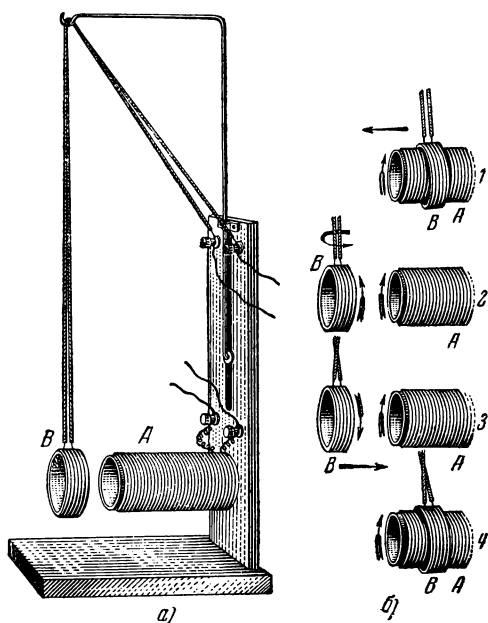


Рис. 214. Взаимодействие двух соленоидов.
 а) Соленоид А закреплен неподвижно, соленоид В подвешен на гибком проводнике. При включении тока в обе катушки катушка В поворачивается так, чтобы направления тока в А и В были одинаковы, притягивается к катушке А и надевается на нее. б) При перемене направления тока в одной из катушек катушка В слезает с А, поворачивается на 180° и снова надевается на А.

действиям токов при соответствующем подборе тока и формы проводника.

У п р а ж н е н и е. 115.1. Стальная игла помещена внутри двух поставленных рядом и соединенных последовательно катушек и намагничивается током, проходящим по этим катушкам. Каково будет

расположение полюсов и нейтральных областей на игле в том случае, когда токи в обеих катушках направлены одинаково (рис. 215, а) и когда они направлены противоположно (рис. 215, б)?

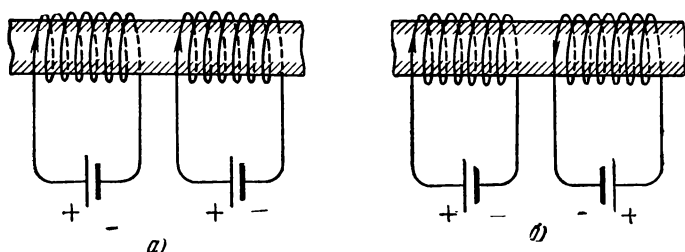


Рис. 215. К упражнению 115.1.

§ 116. Происхождение магнитного поля постоянных магнитов. Опыт Кулона. Как возникает магнитное поле постоянных магнитов? Каковы те физические процессы, которые превращают простой немагнитный брусок стали в магнит? Эти основные вопросы не перестают привлекать к себе внимание исследователей до наших дней.

Когда изучение магнитных явлений только начиналось, внимание исследователей особенно привлек к себе факт существования в намагниченных брусках полюсов, в которых магнитные свойства выражены особенно сильно. При этом бросалось в глаза, что оба полюса магнита различны, так что каждый полюс одного магнита притягивает к себе один из полюсов другого и отталкивает второй полюс его. Для объяснения этих явлений еще Джильберт высказал предположение, что подобно электрическим зарядам в природе существуют и «магнитные заряды» — северный и южный, взаимодействующие друг с другом.

Эти представления были в значительной мере развиты Кулоном. С помощью крутильных весов, описанных в § 10, Кулон исследовал взаимодействие двух длинных и тонких магнитов. Мы говорили уже, что в таких магнитах полюсы сосредоточены в очень маленьких областях, почти в точках, лежащих на концах магнита. Действие каждого магнитного полюса очень быстро убывает по мере увеличения расстояния от него. Поэтому когда мы сближаем, например, полюс N первого магнита с полюсом S' второго, то взаимодействие остальных двух полюсов с этими полюсами и друг с другом (взаимодействие полюса S первого и полюса N' вто-

рого, а также взаимодействие полюсов N и N' и S и S') настолько слабее взаимодействия между близкими полюсами, что им можно пренебречь. Наблюдаемое в этих опытах взаимодействие магнитов может рассматриваться, таким образом, как результат взаимодействия только двух сближенных полюсов магнита. Эти силы взаимодействия между магнитными полюсами можно изучать с помощью крутильных весов (§ 10, рис. 20) совершенно так же, как изучается сила взаимодействия между двумя заряженными шариками.

Кулон показал, что можно характеризовать каждый полюс определенным «количеством магнетизма», или «магнитной массой», причем закон взаимодействия магнитных полюсов такой же, как закон взаимодействия электрических зарядов (§ 10): *два одноименных полюса отталкиваются друг от друга, а два разноименных полюса притягиваются друг к другу с силой, которая прямо пропорциональна «количествам магнетизма», сосредоточенным в этих полюсах, и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.* Таким образом, если один из полюсов характеризуется «количеством магнетизма» M , а другой «количеством магнетизма» m и если расстояние между полюсами есть r , то сила взаимодействия между полюсами F равна

$$F = k \frac{Mm}{r^2}, \quad (10,1)$$

где k — множитель пропорциональности, зависящий от выбора единиц. Можно, конечно, определить на основе этого закона единицу «количества магнетизма» так, чтобы этот множитель пропорциональности был равен единице, подобно тому, как это делается для установления единицы количества электричества (§ 10).

Единица «количества магнетизма», следовательно, — такое количество, которое действует на равное ему и расположенное на расстоянии 1 см количество магнетизма с силой в одну дину. При этом закон Кулона имеет вид

$$F = \frac{Mm}{r^2} \text{ дин.} \quad (10,2)$$

Как и в случае электрических зарядов, закон Кулона выражается так просто лишь в том случае, когда полюсы можно считать точечными, т. е. когда расстояние между взаимодействующими полюсами велико по сравнению

с размерами полюсных областей. Если это условие не соблюдено, то закон взаимодействия может быть более сложным, но, вообще говоря, сила взаимодействия быстро убывает с увеличением расстояния между взаимодействующими магнитами.

Однако сам Кулон, проделавший эту громадной важности работу, обратил внимание и на чрезвычайно существенное и глубокое различие между электрическими и магнитными явлениями. Это различие заключается в том, что мы можем

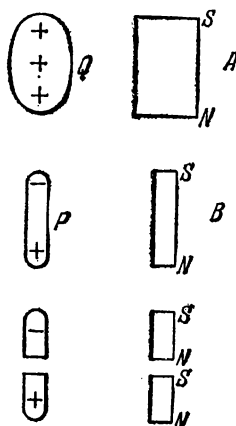


Рис. 216. Сопоставление процесса электризации куска металла путем электростатической индукции (слева) и намагничивания куска железа под влиянием магнита (справа).

разделить электрические заряды и получить тело с избытком положительного или отрицательного электричества (§ 5), но мы никак не можем разделить в теле северный и южный магнетизм и получить тело с одним только полюсом. Больше того: оба полюса любого магнита представляют собою равные по величине количества магнетизма, так что мы не можем иметь тело, содержащее в избытке северный или южный магнетизм.

Чтобы выяснить это различие, напомним какой-нибудь из процессов электризации тела, например опыт электрической индукции (§ 8), и попробуем проделать аналогичный опыт с магнитом. На рис. 216 слева изображен опыт электризации тела путем электростатической индукции, а справа — аналогичный опыт намагничивания через индукцию (влияние). Когда мы подносим к заряженному (например, положительно) телу Q кусок металла P , то на ближайшем конце его возникает отрицательный заряд, а на противоположном конце — положительный. Точно так же, когда мы подносим стальной брусок B к полюсу (скажем, северному) магнита A , то на ближайшем конце бруска возникает южный, а на более удаленном — северный магнитный полюс. До сих пор аналогия полная. Но дальше явления идут совершенно различно: если мы разделим наэлектризованный брусок P на части и раздвинем их, то одна часть окажется наэлектризованной отрицательно, т. е. будет иметь избыток отри-

цательного заряда, другая окажется наэлектризованной положительно; если же мы разделим на части намагнитившийся стальной брусок, то легко убедимся в том, что каждая из этих половинок представляет собой магнит с двумя полюсами, расположенными так, как показано на рис. 216. Мы можем сломать каждую из половинок опять на две части и продолжать этот процесс сколь угодно долго — каждый маленький обломок магнита будет представлять собой магнит с двумя полюсами.

Разделить полюсы, т. е. получить тело с одним только полюсом, невозможно ни этим путем, ни каким бы то ни было иным. Из невозможности разделить северный и южный магнетизм в теле Кулон заключил, что эти два вида магнитных зарядов неразрывно связаны друг с другом в каждой элементарной частице намагничивающегося вещества. Иными словами, было признано, что каждая небольшая частица такого вещества — его атом, молекула или небольшая группа атомов или молекул — представляет собой нечто вроде маленького магнита с двумя полюсами на концах. Таким путем Кулон пришел к своей очень важной гипотезе о существовании элементарных магнитов с неразрывно связанными полюсами.

Как же нужно представлять себе с этой точки зрения процесс намагничивания железа? Нужно считать, что и в ненамагнитенном куске железа уже существуют описанные выше элементарные магниты, но все они расположены беспорядочно или, как говорят, хаотически. Магнитики без всякого порядка располагаются по всем возможным направлениям, причем в каждом направлении примерно столько же магнитиков ориентировано своим северным полюсом в одну сторону, сколько и в противоположную (рис. 217, а). Именно поэтому действия всех этих элементар-

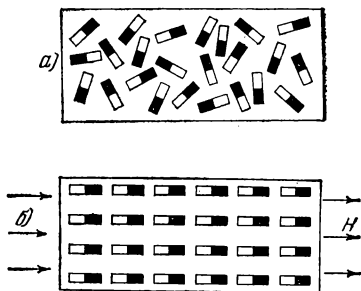


Рис. 217. Процесс намагничивания с точки зрения гипотезы Кулона. а) Хаотическое распределение элементарных магнитов в ненамагнитенном куске железа. б) Упорядоченное их расположение в намагнитенном железе, помещенном в магнитное поле H .

ных магнитов взаимно уравниваются, и кусок железа в целом представляется нам немагнитным. Когда же мы помещаем этот кусок железа в магнитное поле, например подносим его к магниту или помещаем внутрь катушки с электрическим током, то магнитное поле заставляет часть элементарных магнитов повернуться и выстроиться цепочками, как показано на рис. 217, б. При этом действие противоположных полюсов внутри магнита взаимно уничтожается, а на концах бруска возникают магнитные полюсы. Таким образом, *намагничивание тела представляет собой упорядочение расположения его элементарных магнитов под влиянием внешнего магнитного поля*, т. е. процесс, во многом аналогичный процессу поляризации диэлектриков (§ 37).

§ 117. Гипотеза Ампера об элементарных электрических токах. Открытия Эрстеда и Ампера привели к новому и более глубокому представлению о природе магнитных явлений. Опираясь на установленную в этих опытах тождественность магнитных действий магнитов и соответствующим образом подобранных токов, Ампер решительно отказался от представления о существовании в природе особых магнитных зарядов. С точки зрения Ампера, *элементарный магнит— это круговой ток, циркулирующий внутри небольшой частицы вещества: атома, молекулы или группы их*. При намагничивании большая или меньшая часть таких токов устанавливается параллельно друг другу, как показано на рис. 218 («амперовы токи»).

Мы видели уже в § 115, что по своим магнитным свойствам круговой ток вполне подобен короткому магниту, ось которого перпендикулярна к плоскости тока. Поэтому изображенная схематически на рис. 218 система ориентированных молекулярных токов совершенно равносильна цепочкам элементарных магнитиков в гипотезе Кулона.

Таким образом, теория Ампера сделала ненужным допущение о существовании особых магнитных зарядов, позволив объяснить все магнитные явления при помощи элементарных электрических токов. Дальнейшее более углубленное изучение свойств намагничивающихся тел показало не только, что *гипотеза магнитных зарядов или элементарных магнитиков излишня*, но что она *неверна* и не может быть согласована с некоторыми экспериментальными фактами. Мы позже познакомимся с этими фактами (§ 148). Иногда,

правда, для облегчения расчетов бывает удобно заменить систему электрических токов *ф и к т и в н ы м и*, воображаемыми магнитными полюсами, взаимодействующими по закону Кулона. Однако всегда нужно помнить, что это только удобный *п р и е м р а с ч е т а*, реальное же физическое существование имеют только амперовы элементарные токи.

С точки зрения теории Ампера становится совершенно понятной *н е о т д е л и м о с т ь* друг от друга северных и южных полюсов, о которой мы говорили в предыдущем параграфе. Каждый элементарный магнит представляет

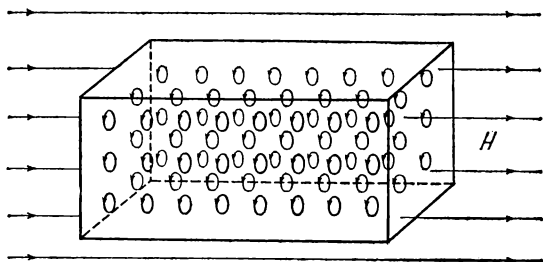


Рис. 218. Упорядоченное расположение амперовых токов в намагнитном железе, помещенном в магнитном поле H .

собой круговой виток тока. Мы видели уже, что одна сторона этого витка соответствует северному, другая — южному полюсу. Именно поэтому нельзя разделить друг от друга северный и южный полюсы, как нельзя разделить одну сторону плоскости от другой.

Таким образом, мы пришли к следующему основному результату:

Никаких магнитных зарядов не существует. Каждый атом вещества можно рассматривать в отношении его магнитных свойств как круговой ток. Магнитное поле намагнитенного тела складывается из магнитных полей этих круговых токов.

В ненамагниченном теле все элементарные токи расположены хаотически, и поэтому мы не наблюдаем во внешнем пространстве никакого магнитного поля.

Процесс намагничивания тела заключается в том, что под влиянием внешнего магнитного поля его элементарные токи в большей или меньшей степени устанавеливаются

параллельно друг другу и создают результирующее магнитное поле.

Значение и важность теории Ампера не возбуждали сомнения. Однако представления Ампера о существовании элементарных токов, непрерывно циркулирующих внутри частиц веществ, были чрезвычайно смелы и необычны для его времени. Дальнейшее развитие науки сделало эти представления естественным следствием созданной в XX веке теории атома. Атом представляет собой систему из центрального положительно заряженного тела — так называемого *я д р а а т о м а* и *э л е к т р о н о в*, обращающихся около него, подобно тому, как планеты обращаются вокруг Солнца. Сходство с планетной системой усугубляется тем, что электронам надо приписать не только обращение вокруг ядра, но и вращение вокруг собственной оси (аналогия с годичным и суточным движением планет). Как то, так и другое круговое движение зарядов представляет собой круговые токи, циркулирующие внутри атомов. Удалось даже осуществить специальные опыты, показывающие, что намагничивание тел сопровождается ориентировкой осей этих круговых токов, стремящихся расположиться параллельно.

Такие наглядные представления о строении атомов являются слишком грубыми и потому неточными, однако они в общих чертах правильно передают сущность дела.

ГЛАВА XI

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

§ 118. Магнитное поле и его проявления. Пространство вблизи магнита или проводника с током находится в особом состоянии, которое мы обозначили названием «магнитное поле» (§ 114). Название выражает мысль, что в этом пространстве проявляются механические силы, действующие на другие магниты или проводники с током. Однако эти действия не являются единственным проявлением магнитного поля. Можно указать еще большое число других физических явлений, в которых сказывается влияние поля. Так, например, под действием магнитного поля изменяется электрическое сопротивление различных металлов; некоторые тела, помещенные в магнитное поле, изменяют свои размеры и т. д.

Наиболее сильно влияние магнитного поля на электрическое сопротивление висмута, что позволило построить висмутовый «измеритель поля». Изменение размеров под действием магнитного поля больше всего проявляется у тел, которые сделаны из сильно намагничивающихся веществ (железо, никель, кобальт); это явление, именуемое магнитострикцией, получило важные технические применения: с его помощью возбуждают очень быстрые колебания железных стерженьков, служащих источником очень коротких звуковых волн (ультразвук).

Когда действие магнитного поля в разных его точках проявляется в различной степени, мы говорим, что напряженность поля в этих точках различна. Для установления количественной меры напряженности магнитного поля мы могли бы использовать любое его проявление. Практически оказывается наиболее удобным характеризовать поле теми механическими силами, с которыми оно действует на магниты и проводники с током.

§ 119. Напряженность магнитного поля. Единица напряженности. В § 116 мы упоминали об опытах Кулона, изучавшего взаимодействия между концами двух длинных тонких магнитов. Эти опыты могут быть использованы для характеристики поля. Действительно, в опытах Кулона измеряется сила, с которой поле, возникающее вблизи конца первого магнита, действует на полюс второго магнита. Конечно, как мы уже многократно упоминали, отделение одного полюса магнита от другого *принципиально* невозможно, и мы всегда имеем дело с взаимодействием *магнитов* в *целом*. Однако для тех длинных и тонких магнитов, с которыми производил свои опыты Кулон, это взаимодействие практически неотличимо от взаимодействия между двумя *воображаемыми* полюсами, расположенными в тех местах, где находятся сближенные концы кулоновых магнитов. На основании этих опытов полюс магнита характеризуется «количеством магнетизма» так, что сила F , действующая на этот полюс, *пропорциональна* количеству его магнетизма m . Поэтому на единицу магнетизма будет действовать сила в m раз меньшая, т. е. равная

$$H = \frac{F}{m}. \quad (11,1)$$

Величина H , представляющая собой силу, с которой данное магнитное поле действует на магнитный полюс, равный единице, обычно принимается за меру *напряженности* магнитного поля.

Напряженность поля имеет определенную *величину*, равную F/m , и определенное *направление*, совпадающее с направлением силы F , т. е. является *вектором*. При этом для определенности условились называть направлением поля направление силы, действующей на *северный* полюс магнита; на южный полюс поле действует с силой, направленной в противоположную сторону.

Нас не должно смущать, что для характеристики напряженности магнитного поля мы выбрали силу, с которой поле действует на *отдельный* магнитный полюс, хотя такой отдельный полюс не может быть, как мы знаем, осуществлен на опыте и является лишь вспомогательным, воображаемым понятием. В § 121 мы увидим, как можно измерить напряженность поля, изучая действие его на *реальный* магнит, а не на воображаемый отдельный полюс.

Сравним формулу (10,1), выражающую силу взаимодействия двух магнитных полюсов M и m , удаленных друг от друга на расстояние r , с формулой $F = H \cdot m$, выражающей силу, с которой магнитное поле напряженности H действует на полюс m :

$$F = \frac{M}{r^2} \cdot m = H \cdot m,$$

т. е.

$$H = \frac{M}{r^2}. \quad (11, 2)$$

Так выражается напряженность поля, создаваемого магнитным полюсом M , в точке, расположенной на расстоянии r от него. Это выражение аналогично выражению $E = \frac{Q}{r^2}$ (§ 14), которое дает напряженность электрического поля, создаваемого точечным зарядом Q , в точке, расположенной на расстоянии r от него. Но в то время как электрическое поле $E = \frac{Q}{r^2}$ есть действительно поле отдельного заряда, магнитное поле, выражаемое (11, 2), представляет собой приближенно поле около полюса магнита, настолько длинного, что можно пренебречь неизбежным влиянием второго полюса того же магнита.

Выбранная нами для характеристики магнитного поля величина, которую мы называли *напряженностью* магнитного поля, пригодна, конечно, не только для характеристики поля, создаваемого концами длинного магнита, но и для всякого магнитного поля. Магнитное поле можно осуществить с помощью одного или нескольких различно расположенных магнитов и проводников с током, и существуют магнитные поля, для которых мы не можем даже точно указать, чем они обуславливаются, например магнитное поле Земли. И тем не менее любое магнитное поле мы всегда будем характеризовать его напряженностью, т. е. силой, с которой это поле действует на магнитный полюс, равный единице. Поэтому *за единицу напряженности магнитного поля надо принять напряженность такого поля, которое на магнитный полюс, равный единице, действует с силой в одну дину*. Напряженность такого поля называется *эрстед* (сокращенное обозначение э).

§ 120. Как действует магнитное поле на стрелку? Определив, что мы называем напряженностью магнитного поля, и установив единицу для его измерения (эрстед), мы должны указать способ измерения напряженности. Однако ясно, что измерять силу, действующую на отдельный полюс, невозможно, ибо отдельного полюса не

существует, а существуют только магниты, имеющие два равных и разноименных полюса. Искусственный прием, осу-

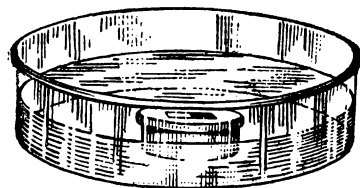


Рис. 219. Магнитная стрелка, плавающая на поплавке, поворачивается под действием магнитного поля Земли.

ществленный Кулоном, который пользовался очень тонкими и длинными магнитами, т. е. магнитами с удаленными друг от друга полюсами, является лишь приблизительным приемом, и притом далеко не всегда осуществимым. Ведь он основывается на том, что второй конец испытательного магнита удален в такое место, где на него

практически не действует поле. Ясно, что этот прием не пригоден для измерений поля, которое обладает заметной напряженностью на большом пространстве.

Таково, например, магнитное поле Земли. Какую бы длинную намагниченную спицу мы ни пытались применить для его исследования, мы не могли бы пренебречь действием поля на другой конец спицы и не могли бы, следовательно, непосредственно определить силу, с которой это поле действует на один полюс, т. е. напряженность поля. Для измерений напряженности поля необходимо изучать действие поля не на отдельный полюс, которого не существует, а на целый магнит (магнитную стрелку).

Прикрепим магнитную стрелку к легкому поплавку, плавающему на воде (рис. 219). Под действием магнитного поля Земли стрелка повернется и остановится в определенном положении, указывая одним своим концом на север. Несмотря на то, что поле Земли действует на оба полюса стрелки, стрелка остается неподвижной. Это значит, что силы, действующие на эти полюсы (F_1 и F_2), равны и противоположны (рис. 220). Следовательно, напряженность поля одинакова и по величине и по направлению в обоих местах,



Рис. 220. В положении равновесия на магнитную стрелку в однородном магнитном поле действуют равные и противоположные силы ($F_1 = F_2$). Направление магнитного поля — это направление от южного конца к северному, т. е. SN .

в которых расположены полюсы стрелки. Действительно, наш опыт показывает, что силы, действующие на полюсы, $F_1 = H_1 \cdot m_1$ и $F_2 = H_2 \cdot m_2$ равны между собой; но так как $m_1 = m_2$ (два полюса одного и того же магнита), то следовательно, $H_1 = H_2$. Такое поле, напряженность которого в разных точках имеет одинаковую величину и направление, называется однородным.

Итак, однородное поле действует на оба полюса стрелки с равными, параллельными и противоположно направленными силами, т. е. с силами, образующими пару сил. В соответствии с этим однородное магнитное поле обуславливает вращение стрелки и не может вызвать ее поступательного перемещения (т. I, «Механика»).

Количественной характеристикой пары сил, с которой однородное поле действует на стрелку, как и всякой пары вообще, служит ее вращающий момент. Вращающий момент пары сил равняется произведению одной из сил на расстояние между направлениями сил (т. I, «Механика»). Следовательно, вращающий момент, с которым поле действует на нашу стрелку (рис. 221), равен

$$P = F \cdot l \cdot \sin \alpha, \quad (11,3)$$

где l — расстояние между точками приложения сил («длина стрелки»), а α — угол между направлением стрелки и направлением поля. Подвесив стрелку на тонкой упругой проволочке и измеряя угол, на который закрутится нить, когда стрелка повернется под действием магнитного поля, мы получим возможность измерить величину вращающего момента, с которым поле действует на нашу стрелку. Если поле неоднородно, то к вращающему моменту, с которым оно действует на магнит, присоединяется еще сила, увлекающая весь магнит в определенном направлении, втягивая его в ту область, где напряженность поля больше. Такое движущее действие неоднородного поля объясняется тем, что напряженность его в разных точках различна, благодаря чему сила, действующая на один из полюсов магнита, отличается по величине от силы, действующей на второй полюс того же магнита.

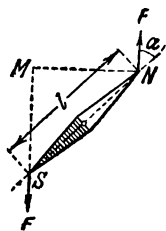


Рис. 221. Пара сил, с которой однородное поле действует на стрелку. Вращающий момент пары сил $P = F \cdot MN = F \cdot NS \cdot \sin \alpha = F \cdot l \cdot \sin \alpha$.

У п р а ж н е н и е. 120.1. Максимальный вращающий момент, действующий в данной точке поля на некоторую стрелку, равен $1000 \text{ дин} \cdot \text{см}$. Какой момент действует на стрелку, когда она находится под углом 30° по отношению к направлению поля?

§ 121. Измерение напряженности магнитного поля с помощью стрелки. Заменяя в формуле (11,3) силу F ее выражением через напряженность магнитного поля из формулы (11,1), получим:

$$P = H \cdot m \cdot l \cdot \sin \alpha. \quad (11,4)$$

Формула (11,4), равно как и (11,3), показывает, что вращающий момент P зависит от угла α между направлением стрелки и направлением поля. Поэтому измерение вращающего момента надо вести при каком-нибудь определенном угле α . Обычно выбирают $\alpha = 90^\circ$, т. е. закручивают проволочку так, чтобы стрелка расположилась перпендикулярно к направлению магнитного поля. Измеренный в этом положении стрелки вращающий момент имеет максимальное значение, которое мы обозначим через $P_{\text{макс}}$. Итак,

$$P_{\text{макс}} = H \cdot m \cdot l. \quad (11,5)$$

Измерив вращающий момент $P_{\text{макс}}$ в $\text{дин} \cdot \text{см}$, m — в единицах Кулона и l в см , мы получим напряженность магнитного поля в эрстедах.

Мы видим, таким образом, что действие однородного поля на стрелку, определяемое вращающим моментом $P_{\text{макс}}$, зависит от напряженности поля H и от свойств нашей магнитной стрелки, характеризующейся величиной произведения $m \cdot l$. Однако такая характеристика магнитной стрелки пригодна лишь для стрелок, имеющих вид длинных и тонких спиц. Только в этом случае мы можем характеризовать стрелку «количеством магнетизма» m , измеренным по способу Кулона, и считать, что эти «количества магнетизма» расположены у концов спицы, так что l есть длина спицы. Но и в этих случаях результат наших опытов зависит, как мы видим из формулы (11,5), не от величин m и l в отдельности, а от их произведения. Другими словами, данное магнитное поле действует с одним и тем же вращающим моментом на намагниченные спицы с различными m и l , если только для всех этих спиц произведение m на l имеет одно и то же значение. Поэтому для выражения действия данного поля на наши стрелки их принято характеризовать

одной величиной, носящей название **магнитного момента** N стрелки. Для длинных и тонких спиц, о которых мы до сих пор вели рассуждения, магнитный момент выражается как произведение m на l , т. е. $N = m \cdot l$.

У п р а ж н е н и е. 121.1. Имеются две магнитные стрелки: одна длины $l_1 = 5$ см и с магнитным моментом $N_1 = 10$ ед. СГС, другая длины $l_2 = 6$ см и с магнитным моментом 30 ед. СГС. С какой силой будут притягиваться друг к другу разноименные полюсы этих стрелок, если их поместить на расстоянии 5 мм друг от друга? **У к а з а н и е.** Вычисление провести, предполагая, что заряды точечные и сосредоточены на концах стрелок; взаимодействием других полюсов стрелок пренебречь.

Для магнитов иной формы (а, строго говоря, также и для длинных спиц) магнитный момент зависит от распределения магнитных свойств по всему магниту и не может быть просто вычислен, но может быть и з м е р е н на опыте. Введя понятие магнитного момента N , мы можем придать формуле (11, 5) вид

$$P_{\text{макс}} = N \cdot H. \quad (11, 6)$$

Соотношение (11, 6) может служить для определения магнитного момента N л ю б о г о магнита. Для этого достаточно подвесить его на проволочке в однородном магнитном поле известной напряженности H и определить по закручиванию проволочки вращающий момент $P_{\text{макс}}$. Зная $P_{\text{макс}}$ и H , найдем:

$$N = \frac{P_{\text{макс}}}{H}.$$

Наоборот, приготовив стрелку с определенным и постоянным магнитным моментом (э т а л о н н у ю стрелку) и измерив вращающий момент поля, действующий на эту стрелку, расположенную перпендикулярно к направлению поля, мы найдем величину напряженности магнитного поля. Что же касается направления магнитного поля, то оно указывается направлением SN вдоль магнитной стрелки, установившейся свободно, т. е. при незакрученной нити. Таким образом, при помощи магнитной стрелки мы имеем возможность определить и величину и направление напряженности магнитного поля и не должны прибегать к помощи о т д е л ь н ы х магнитных полюсов, которых, как мы много раз подчеркивали, в природе не с у щ е с т в у е т. Конечно, если поле неоднородно, т. е. напряженность его меняется от точки к точке,

то надо применять достаточно короткую стрелку; в противном случае нельзя сказать, к какому месту поля относится наше измерение. Если же стрелка достаточно коротка, то на всем ее протяжении поле можно считать однородным.

Из изложенного следует, что для измерения напряженности магнитного поля надо располагать эталонной магнитной стрелкой (т. е. стрелкой с известным магнитным моментом), подобно тому, как для измерения напряженности электрического поля надо иметь эталонный электрический заряд, а для измерения напряженности гравитационного поля надо иметь эталонную массу (т. I, «Механика»). Однако изготовление и хранение эталонных стрелок сопряжено с большими трудностями, ибо магнитные свойства стрелки сильно зависят от материала и меняются со временем. Поэтому предпочитают поступать иначе. Осуществляют эталонное магнитное поле, т. е. поле с неизменной и заранее заданной напряженностью. Это нетрудно сделать, пользуясь магнитным полем, создаваемым электрическим током, проходящим по катушке. Зная величину тока и размер и форму катушки, можно рассчитать напряженность магнитного поля (в эрстедах), которое осуществляется с помощью такой катушки (подробно см. дальше § 127). С напряженностью такого эталонного поля можно сравнить напряженность любого интересующего нас поля и, таким образом, выразить его напряженность в эрстедах. Для такого сравнения можно пользоваться любой стрелкой, и нет надобности знать ее магнитный момент.

Действительно, пусть измерения вращающего момента дали для эталонного поля $H_{\text{этал}}$ значение $P_{\text{макс}}$, а для исследуемого поля H значение $P'_{\text{макс}}$. Измерения произведены с одной и той же стрелкой, магнитный момент которой N неизвестен. На основании формулы (11,6) имеем:

$$P_{\text{макс}} = N \cdot H_{\text{этал}} \quad \text{и} \quad P'_{\text{макс}} = N \cdot H.$$

Отсюда

$$\frac{P'_{\text{макс}}}{P_{\text{макс}}} = \frac{N \cdot H}{N \cdot H_{\text{этал}}},$$

или

$$H = H_{\text{этал}} \cdot \frac{P'_{\text{макс}}}{P_{\text{макс}}},$$

т. е. неизвестный магнитный момент в окончательный результат не входит.

Умея осуществлять магнитные поля различной напряженности, можно непосредственно на опыте убедиться, что различные поля действуют на один и тот же магнит с вращающими моментами, которые пропорциональны напряженности поля, т. е. $P_{\text{макс}} = NH$, где N есть постоянная величина, характеризующая данный магнит. Таким образом, наш опыт подтверждает возможность характеризовать любой магнит некоторой постоянной величиной N , которую мы называем магнитным моментом. При выводе формулы (11,6) мы ввели это понятие для длинных и тонких магнитов и применили его к магниту любой формы; опыт показал, что это применение оправдывается.

§ 122. Сложение магнитных полей. Напряженность магнитного поля характеризуется величиной и направлением. Поэтому удобно изображать напряженность магнитного поля в точке O в виде отрезка OA (рис. 222), направление которого указывает направление напряженности, а длина дает в каком-то масштабе величину напряженности. Допустим теперь, что мы устранили магниты и токи, создававшие магнитное поле OA , и заменили их другими, другой силы и иначе расположенными. Возникает новое магнитное поле, напряженность которого в точке O выразится другим отрезком, например OB . Какова будет напряженность магнитного поля, если одновременно действуют и источники, дававшие поле OA , и источники, дававшие поле OB ? Измерения показывают, что в этом случае мы получим поле, напряженность которого изображается отрезком OC , представляющим по величине и направлению диагональ параллелограмма, построенного на OA и OB .

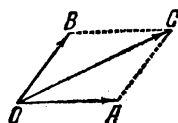


Рис. 222. Сложение напряженностей магнитных полей. Стрелки OA и OB своим направлением указывают направление поля, а своей длиной изображают (в выбранном масштабе) величину напряженности. Результирующая напряженность изображена стрелкой OC .

Итак, *напряженности магнитных полей складываются по правилу параллелограмма*. Это означает независимость действия магнитных полей ¹⁾. Так же, как и в случае электрического поля (§ 15), эти опыты

¹⁾ См. сноску в § 149 (магнитная защита), стр. 398.

доказывают, что *напряженность магнитного поля есть векторная величина*.

У п р а ж н е н и я. 122.1. В некоторой точке складываются два магнитных поля: одно — направленное вертикально сверху вниз и равное 30 э, другое — горизонтальное, действующее с востока на запад и равное 40 э. Как будет направлено результирующее поле и чему будет равна его напряженность?

122.2. Найдите напряженность магнитного поля H в некоторой точке, в которой действуют одновременно два поля: H_1 с горизонтальной составляющей (с востока на запад), равной 50 э, и вертикальной составляющей (снизу вверх), равной 40 э, и H_2 с горизонтальной составляющей (с востока на запад), равной 60 э, и вертикальной составляющей (сверху вниз), равной 10 э. Решите задачу: а) с помощью вычислений, б) графически.

122.3. Решите ту же задачу с тем отличием, что горизонтальная составляющая второго поля направлена не с востока на запад, а с севера на юг.

122.4. Напряженность поля равна 100 э. Направление ее образует угол 30° с отвесной линией. Разложите эту напряженность на две составляющие: вертикальную и горизонтальную, и вычислите значение каждой из них.

§ 123. Силовые линии магнитного поля. В § 17 мы познакомились с очень удобным и наглядным способом графического изображения электрического поля при помощи силовых линий. Этот же прием мы можем применять и к магнитному полю.

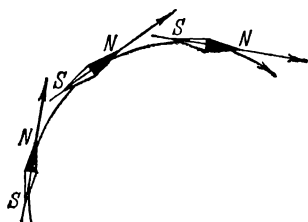


Рис. 223. Построение силовой линии магнитного поля.

Как и в случае электрического поля, мы будем называть силовыми линиями магнитного поля линии, проведенные так, что касательные к ним в каждой точке указывают направление поля в этой точке (рис. 223). Иными словами, если мы представим себе, что в какой-нибудь

точке магнитного поля находится свободная маленькая магнитная стрелка, то под действием поля она расположится по направлению касательной к силовой линии в этой точке, причем ее северный конец укажет нам направление силовой линии.

Существует очень простой способ получать картины силовых линий в различных магнитных полях. Он аналогичен способу, которым мы получали картины силовых линий электрических полей (§ 17). Положим на магнит NS лист

гладкого картона или кусок стекла, насыплем на этот картон или стекло немного железных опилок и слегка встряхнем его, чтобы облегчить движение отдельных частиц этих опилок. Опилки расположатся в виде цепочек. Эти цепочки и показывают форму силовых линий поля. Действительно, в поле магнита каждый кусочек железа намагничивается, превращается в маленькую магнитную стрелку и устанавливается по направлению напряженности поля в соответствующей точке. На рис. 224, *а* и *б* изображены полученные таким способом картины силовых линий в различных магнитных полях.

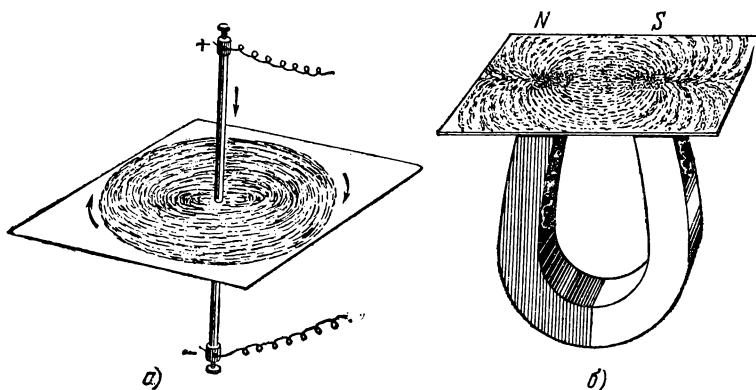


Рис. 224. Картины силовых линий магнитных полей, полученные при помощи железных опилок. *а*) Магнитное поле вокруг проводника, по которому идет электрический ток. *б*) Магнитное поле подковообразного магнита.

Мы видим, какое ясное качественное представление о магнитном поле дают эти картины. Совершенно так же, как и для электрического поля, мы можем при помощи силовых линий изображать не только направление магнитного поля, но и характеризовать величину напряженности поля. Для этого также условимся чертить силовые линии с таким расчетом, чтобы их густота, т. е. число линий, проходящих через 1 см^2 , давала величину напряженности магнитного поля. Таким образом, мы будем получать «магнитные карты», способ построения и употребления которых аналогичен «электрическим картам» (§ 18). Однако по своему виду магнитные карты будут отличаться от электрических карт. Главное отличие магнитного поля то, что

линии его всегда оказываются замкнутыми, как это видно на рис. 224.

§ 124. Приборы для измерения напряженности магнитного поля. С помощью магнитной стрелки, подвешенной на упругой нити, мы можем, как указывалось в § 121, сравнивать напряженности различных магнитных полей. С этой целью можно использовать крутильные весы, подобные крутильным весам Кулона (§ 10), головка которых снабжена делениями для отсчета угла закручивания нити, а положение концов стрелки

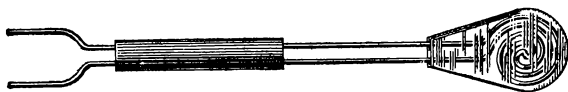


Рис. 225. Висмутовая спираль для измерения напряженности магнитного поля.

отсчитывается по делениям на защитном цилиндре. Такой прибор можно назвать **магнетометром**. Подвешенная на упругой нити стрелка, в отличие от свободной стрелки, будет находиться в равновесии лишь

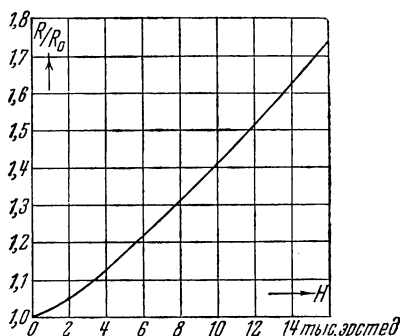


Рис. 226. Зависимость электрического сопротивления висмута R от напряженности магнитного поля H . Сопротивление R_0 висмута вне поля принято за единицу, величина H выражена в тысячах эрстедов.

тогда, когда вращающий момент, создаваемый полем, равен и противоположен вращающему моменту, создаваемому закрученной нитью. Если стрелка расположена вдоль магнитного поля ($\alpha=0$), т. е. $P=0$, то и нить не должна быть закручена (нулевое положение). Закрутив нить на больший или меньший угол, можно добиться равновесия стрелки при любой ориентации. По углу закручивания нити определяют при помощи расчета или предварительной градуировки (т. I, «Механика») вращающий момент нити, а следовательно, и вращающий момент поля. Таким образом, можно определить максимальный вращающий момент поля $P_{\text{макс}}$, который соответствует $\alpha=90^\circ$, т. е. положению, при котором направление стрелки перпендикулярно к направлению магнитного поля.

Подобный статический магнетометр построить трудно, но приборы этого рода не обладают достаточной чувствительностью и точностью. Поэтому во многих случаях предпочитают измерять действующий на стрелку вращающий момент из наблюдения над качаниями стрелки. Магнитная стрелка, отклоненная из положения

равновесия в магнитном поле, прежде чем вернуться в это положение, совершает несколько колебаний около него, подобно тому, как качается выведенный из положения равновесия маятник. Если стрелка довольно массивна и испытывает малое трение, то она может совершить много колебаний, прежде чем остановится. Поэтому можно точно измерить период колебаний, т. е. время, за которое совершается полное колебание, от крайнего положения до возвращения к нему же. Расчет такого колебания показывает, что период его тем меньше, чем больше вращающий момент, с которым поле действует на стрелку, т. е. чем больше напряженность магнитного поля. Таким образом, сравнивая периоды колебания одной и той же стрелки в различных полях, мы можем надежно сравнивать напряженности различных магнитных полей. Такие **д и н а м и ч е с к и е м а г н е т о м е т р ы** с успехом применяются при измерении напряженности **с л а б ы х** магнитных полей, например магнитного поля Земли.

Помимо этих способов, основанных на измерении вращающего момента, с которым поле действует на магнитную стрелку, можно пользоваться для измерения напряженности магнитного поля различными другими явлениями, в которых проявляются действия этого поля (§ 118). Часто, например, пользуются для этой цели свойством **в и с м у т а** изменять свое **э л е к т р и ч е с к о е с о п р о т и в л е н и е** под действием магнитного поля. Из висмутовой проволоки изготавливают плоскую спираль (рис. 225) и помещают ее в исследуемое место поля. Измерив сопротивление спирали в поле и вне его, мы по изменению сопротивления заключаем о напряженности магнитного поля. Конечно, висмутовая спираль должна быть заранее проградуирована, т. е. должно быть определено, как меняется ее сопротивление, когда она помещается в магнитные поля уже известной напряженности. Пример такой градуировочной кривой приведен на рис. 226. Висмутовая спираль пригодна для измерения **с и л ь н ы х** полей, например полей электромагнитов, напряженность которых в тысячи раз превосходит напряженность магнитного поля Земли.

У п р а ж н е н и е 124.1. Пользуясь рис. 226, определите напряженность магнитного поля, в котором сопротивление висмутовой спирали равно 26 ом , если вне поля сопротивление ее равнялось 20 ом .

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ

§ 125. Магнитное поле прямолинейного тока и кругового витка. **Правило буравчика.** Наглядное представление о характере магнитного поля, возникающего вокруг какого-либо проводника, по которому идет электрический ток, да-

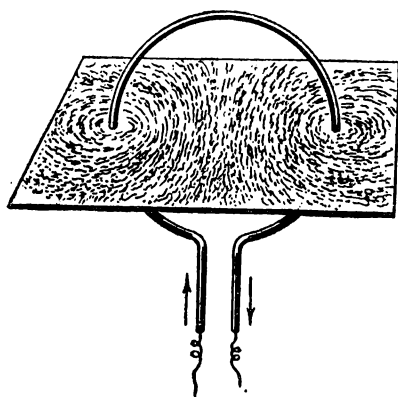


Рис. 227. Картина силовых линий магнитного поля кругового витка тока.

ют картины силовых линий, получаемые так, как это было описано в § 122.

На рис. 224, а и рис. 227 изображены такие картины силовых линий, полученные с помощью железных опилок для поля длинного прямолинейного проводника и для поля кругового витка тока.

Рассматривая внимательно эти рисунки, мы прежде всего обращаем внимание на то, что *силовые линии магнитного*

поля имеют вид замкнутых линий. Это свойство их является совершенно общим и очень важным. Какова бы ни была форма проводников, по которым идет ток, линии создаваемого им магнитного поля всегда замкнуты сами на себя, т. е. не имеют ни начала, ни конца. В этом существенное отличие магнитного поля от электрического, линии которого, как мы видели в § 18, всегда начинаются на одних зарядах и кончаются на других. Мы видели, например, что линии элек-

трического поля заканчиваются на поверхности металлического тела, которая оказывается заряженной (§ 18), и внутрь металла электрическое поле не проникает. Наблюдение же над магнитным полем показывает, наоборот, что линии его никогда не оканчиваются на какой-нибудь поверхности. Когда магнитное поле создается постоянными магнитами, то не так легко проследить, что и в этом случае магнитное поле не оканчивается на поверхности магнитов, а проникает внутрь их, ибо мы не можем использовать

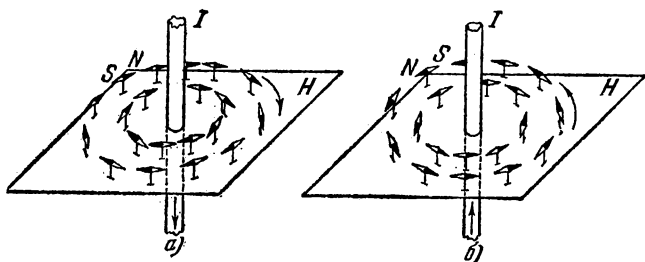


Рис. 228. Связь между направлением тока в прямолинейном проводнике и направлением силовых линий магнитного поля, создаваемого этим током. а) Ток направлен сверху вниз; б) ток направлен снизу вверх.

железные опилки для наблюдения того, что делается в н у т р и ж е л е з а. Однако и в этих случаях тщательное исследование показывает, что магнитное поле проходит с к в о з ь железо, и линии его замыкаются сами на себя, т. е. являются з а м к н у т ы м и.

Это важное различие между электрическими и магнитным полями связано с тем, что в природе существуют электрические заряды и не существует магнитных. Поэтому линии электрического поля идут от заряда к заряду, у магнитного же поля нет ни начала ни конца, и линии его имеют замкнутый характер.

Если в опытах, дающих картины магнитного поля тока, заменить опилки маленькими магнитными стрелками, то северные концы их укажут направление силовой линии, т. е. направление поля (§ 119). Рис. 228, а и б показывают, что при изменении направления тока меняется и направление магнитного поля. Взаимную связь между направлением тока и направлением поля, им создаваемого, легко запомнить при помощи п р а в и л а б у р а в ч и к а (рис. 229).

Если ввинчивать буравчик (правый винт) так, чтобы он шел по направлению тока, то направление вращения его ручки указывает направление поля (направление силовых линий).

В такой форме это правило особенно удобно для установления направления поля вокруг длинных прямол

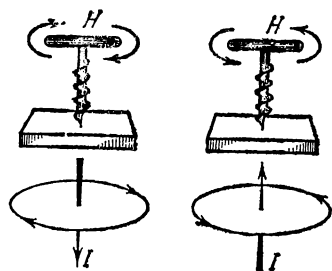


Рис. 229. К правилу буравчика.

проводника то же правило применимо к каждому участку его. Еще удобнее для кольцевых проводников правило буравчика сформулировать так:

Если ввинчивать буравчик так, чтобы он шел по направлению поля (вдоль силовой линии), то направление вращения его ручки укажет направление тока.

Нетрудно видеть, что обе формулировки правила буравчика совершенно равноценны и их можно одинаково применять к определению связи между направлением тока и направлением напряженности магнитного поля при любой форме проводников.

У п р а ж н е н и я. 125.1. Укажите, какой из полюсов магнитной стрелки M на рис. 74 (стр. 115) — северный и какой — южный.

125.2. К вершинам A и B проволочного параллелограмма (рис. 230) подведены провода от источника тока. Какова напряженность маг-

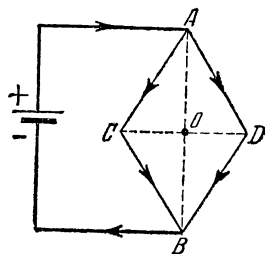


Рис. 230. К упражнению 125.2.

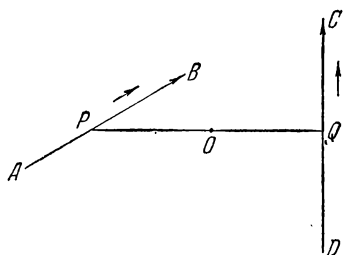


Рис. 231. К упражнению 125.3.

нитного поля в центре параллелограмма (точка O)? Как будет направлена напряженность поля в точке O , если ветвь ACB параллелограмма сделать из медной проволоки, а ветвь ADB — из алюминиевой проволоки того же сечения?

125.3. Два длинных прямолинейных проводника AB и CD , не лежащих в одной плоскости, перпендикулярны друг к другу (рис. 231). Точка O лежит посередине кратчайшего расстояния между этими прямыми — отрезка PQ . Токи в AB и CD имеют указанное на рисунке направление и равны по величине. Найдите графически направление напряженности магнитного поля в точке O . Сформулируйте, в какой угол образует она с плоскостью, проходящей через AB и PQ ?

125.4. Выполните то же построение, что в задаче 125.3, переменяя на обратное: а) направление тока в AB , б) направление тока в CD , в) направление тока в обоих проводниках.

125.5. По двум большим кругам шара — вертикальному и горизонтальному (рис. 232) идут токи одной и той же величины. Направления их указаны на рисунках стрелками. Найдите графически направление напряженности магнитного поля в центре шара O . Под каким углом будет наклонен этот вектор к плоскости каждого из круговых витков? Выполните то же построение, изменив направление тока на обратное сначала в вертикальном проводе, затем в горизонтальном, и, наконец, в обоих.

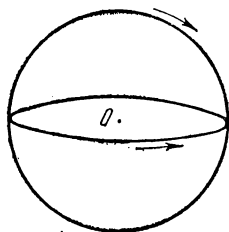


Рис. 232. К упражнению 125.5.

Измерения напряженности магнитного поля в разных точках вокруг проводника, по которому идет ток, показывают, что *напряженность магнитного поля в каждой данной точке всегда пропорциональна току в проводнике*. Но при данном токе напряженность поля в различных точках поля *различна* и чрезвычайно сложно зависит от размеров и формы проводника, по которому проходит ток. Мы ограничимся одним важным случаем, где эти зависимости сравнительно просты. Это — магнитное поле *внутри соленоида*.

§ 126. Магнитное поле соленоида. Эквивалентность соленоида и полосового магнита. Длинную цилиндрическую катушку, состоящую из некоторого числа витков проволоки, намотанных по спирали, называют *соленоидом*. Магнитное поле, которое создается проходящим через эти витки электрическим током, можно представить себе как результат сложения полей, создаваемых отдельными, рядом стоящими витками тока. На рис. 233, *а, б, в, г* показано, как изменяется картина силовых линий магнитного поля по мере того, как мы увеличиваем число витков катушки.

Когда длина катушки *значительно* превосходит ее диаметр, то внутри соленоида силовые линии поля имеют

вид прямых, параллельных его оси (рис. 233, *г*). Это означает, что во всех точках внутри соленоида напряженность магнитного поля имеет одно и то же направление: она параллельна оси соленоида. Только вблизи концов соленоида

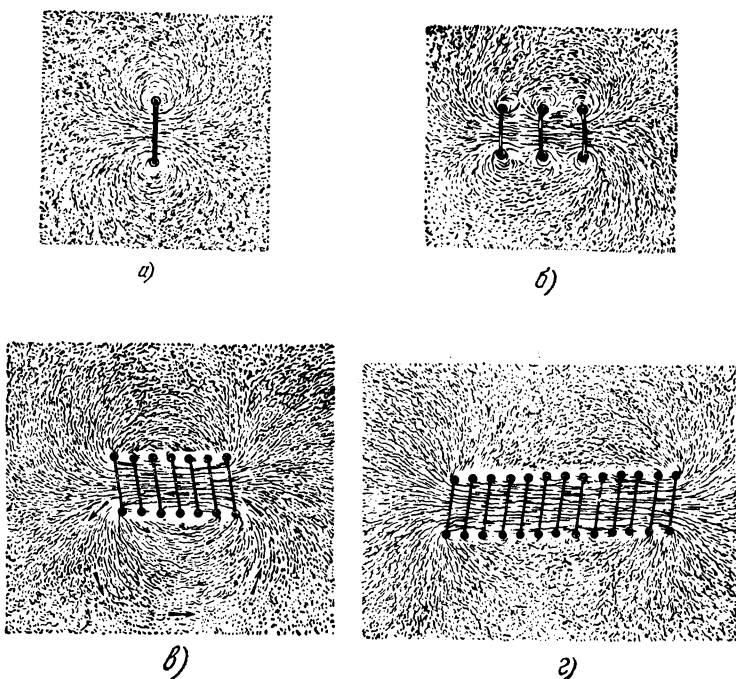


Рис. 233. Картины силовых линий магнитного поля соленоида, полученные при помощи железных опилок при различном числе витков соленоида.

линии магнитного поля искривляются. В н е соленоида магнитное поле подобно полю длинного намагнич е н н о г о б р у с к а (рис. 234, *а* и *б*). Силовые линии тянутся от одного конца соленоида к другому, так же, как в случае полосового магнита они тянутся от одного конца магнита к другому. Ф о р м а силовых линий в о в н е ш н е м пространстве соленоида также тождественна с формой линий соответствующего намагнич е н н о г о б р у с к а. Измеряя каким-нибудь способом напряженность магнитного поля вокруг соленоида и вокруг полосового магнита, мы можем

убедиться, что не только по общему виду, но и по распределению напряженности магнитное поле вокруг магнита тождественно с магнитным полем соленоида при подходящем размере его и подходящей величине тока. У соленоида можно также обнаружить нейтральную зону и полюсные области,

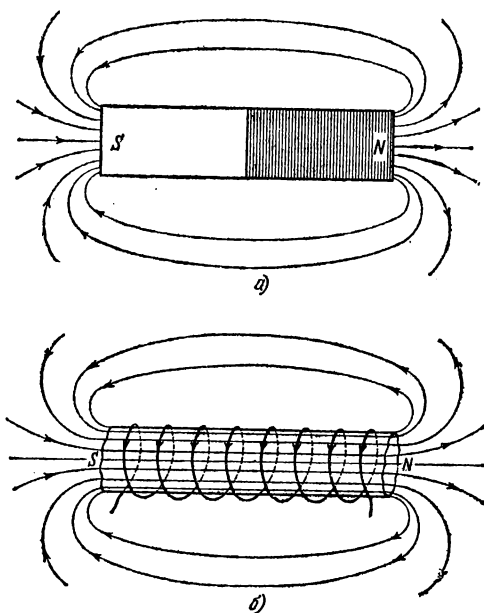


Рис. 234. Силовые линии магнитного поля: а) длинного намагниченного железного бруска; б) длинного соленоида. Концы обмотки ведут к батарее, на рисунке не показанной. Стрелки указывают направление тока в обмотке и направление магнитного поля вне и внутри соленоида.

северную и южную, так что в н е соленоида магнитное поле направлено, как и у полюсового магнита, от с е в е р н о г о п о л ю с а к ю ж н о м у. Соленоид, подвешенный на нити, ориентируется в магнитном поле Земли так же, как и подвешенный намагниченный брусок (стрелка). Два соленоида или соленоид и магнит взаимодействуют подобно двум магнитам и т. д. Кажущееся различие заключается только в том, что соленоид не только п р и т я г и в а е т к себе железные предметы, магнит или другой соленоид, но

и может в т я н у т ь их внутрь себя. Но это различие обусловливается тем, что внутренность соленоида доступна для проникновения, тогда как внутрь железа тела проникнуть не могут. Сходство станет окончательным, если мы заполним внутренность соленоида чем-нибудь твердым, например наведем соленоид на деревянный цилиндр. Присутствие дерева внутри соленоида практически не изменяет поля соленоида ни вне его, ни внутри. Силовые линии по-прежнему не имеют ни начала, ни конца и проходят сквозь деревянный сердечник соленоида, направляясь в н е соленоида от северного полюса к южному, а внутри соленоида от южного полюса к северному (рис. 234, б).

У п р а ж н е н и я . 126.1. Провод с током натянут сверху вниз. Так как он оказался слишком длинным, в средней части его изогнули двумя витками (в горизонтальной плоскости). Начертите магнитные силовые линии тока, если ток направлен сверху вниз. Обозначьте на чертеже северный и южный полюсы двух витков. Что произойдет, если переключить ток в противоположном направлении?

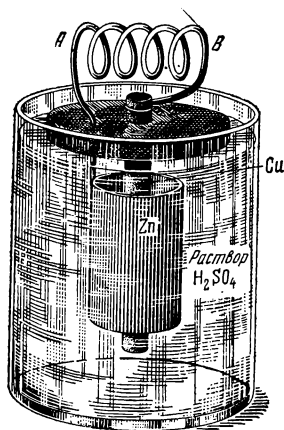


Рис. 235. К упражнению 126.4.

126.2. В некоторых приборах (например, в катушках сопротивлений), содержащих длинный, намотанный на катушку провод, нежелательно появление магнитного поля при прохождении тока. В таких приборах устанавливают так называемую бифилярную намотку: на катушку наматывают провод, сложенный вдвое (так что оба конца провода на катушке оказываются рядом). Объясните смысл бифилярной намотки.

126.3. Каким концом — северным или южным — обращен к наблюдателю соленоид, если, глядя на этот конец, наблюдатель видит, что ток в соленоиде идет по направлению часовой стрелки?

126.4. Как ориентируется соленоид АВ на поплавке, изображенном на рис. 235?

§ 127. Магнитное поле внутри соленоида как эталонное поле. Единица напряженности магнитного поля. Особый интерес представляет магнитное поле внутри соленоида, длина которого значительно превосходит его диаметр. Внутри такого соленоида напряженность магнитного поля имеет повсюду одно и то же направление, параллельное оси соленоида, и значит, силовые линии параллельны между собой.

Измеряя каким-нибудь способом напряженность магнитного поля в разных точках внутри соленоида, мы можем убедиться в том, что если витки соленоида расположены равномерно ¹⁾, то магнитное поле внутри соленоида имеет во всех точках не только одинаковое направление, но и одинаковую численную величину. Итак, поле внутри длинного равномерно навитого соленоида — однородно. В дальнейшем, говоря о поле внутри соленоида, мы всегда будем иметь в виду подобные «длинные» равномерные соленоиды и не будем обращать внимания на отступления от однородности поля в областях, близких к концам соленоида.

Подобные измерения, выполненные с различными соленоидами и при различной величине тока в них, показали, что напряженность однородного магнитного поля внутри длинного соленоида прямо пропорциональна току I и не зависит от диаметра сечения соленоида; но напряженность поля увеличивается с увеличением густоты витков, составляющих соленоид. Именно, напряженность поля соленоида пропорциональна числу витков, приходящихся на один сантиметр длины соленоида, т. е. величине n/l , где n — полное число витков соленоида, l — его длина. Таким образом, результаты этих измерений выражаются соотношением:

$$H = k \cdot I \cdot \frac{n}{l}, \quad (12,1)$$

где k есть коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц для измерения всех входящих в эту формулу величин. Отсюда следует, что внутри соленоида можно осуществить однородное магнитное поле любой желательной нам напряженности. Другими словами, с помощью соленоида мы можем осуществить эталонное поле (§ 121). Возьмем равномерно навитый соленоид и подберем величины n , l и I так, чтобы $\frac{n \cdot I}{l}$ было равно единице, например в соленоиде, имеющем 10 витков на cm длины, возьмем ток в $\frac{1}{10} a$, или в соленоиде с 20 витками на cm — ток в $\frac{1}{20} a$ и т. д. Напряженность магнитного поля внутри такого соленоида

¹⁾ То есть на единицу длины соленоида всюду приходится одно и то же число витков.

имеет вполне определенное значение. Теоретические расчеты показывают, что напряженность такого поля равняется $\frac{4\pi}{10} = 1,256$ э. Таким образом, если величину тока выражать в амперах, длину соленоида в сантиметрах, а напряженность поля в эрстедах, то коэффициент k в формуле (12,1) принимает значение

$$k = \frac{4\pi}{10} = 1,256$$

и, следовательно, для вычисления напряженности поля соленоида в эрстедах мы должны применять формулу (12,1) в виде

$$H = \frac{4\pi}{10} \cdot I \cdot \frac{n}{l} = 1,256 \cdot I \cdot \frac{n}{l}, \quad (12,1')$$

причем ток I выражен в амперах, длина соленоида l в сантиметрах, а n — полное число витков соленоида — есть, конечно, отвлеченное число.

Значение коэффициента $k = \frac{4\pi}{10}$ получилось потому, что для всех входящих в форму (12,1) величин мы воспользовались единицами, установленными ранее из разных соображений (амперы для силы тока, эрстеды для напряженности поля, сантиметры для длины). Мы могли бы использовать формулу (12,1) для выбора, например, единицы напряженности поля с таким расчетом, чтобы сделать коэффициент $k=1$ при измерении величины тока в амперах и длины в сантиметрах. Установленная таким образом единица напряженности магнитного поля носит несколько неуклюжее название: «ампервиток на сантиметр» и нередко употребляется в электротехнических расчетах, ибо при ее применении формула (12,1) принимает простой вид: $H = I \cdot \frac{n}{l}$. Легко видеть, что

$$1 \frac{\text{ампервиток}}{\text{см}} = \frac{4\pi}{10} \text{ э} = 1,256 \text{ э}$$

и обратно

$$1 \text{ э} = \frac{10}{4\pi} \frac{\text{ампервиток}}{\text{см}} = 0,796 \frac{\text{ампервиток}}{\text{см}}.$$

Если измерять напряженность магнитного поля H на разных расстояниях l от очень длинного прямолинейного

проводника, по которому течет ток I , то, как оказывается,

$$H = k \frac{1}{2\pi r}. \quad (12,2)$$

Коэффициент k здесь тот же, что и в формуле (12,1) для поля внутри соленоида, т. е. $k = \frac{4\pi}{10}$, если выражать H в эрстедах, I в амперах и r в сантиметрах. В Международной системе единиц СИ тоже полагают $k=1$, но для определения единицы напряженности магнитного поля используют формулу (12,2). Эта единица называется а м п е р н а м е т р (a/m): *один ампер на метр есть напряженность магнитного поля на расстоянии 2 метра от прямолинейного бесконечно длинного проводника, по которому проходит ток силой 4π ампер*. Слово «виток» здесь, конечно, не употребляется, но, поскольку и здесь $k=1$, а число витков n — отвлеченное число, нетрудно понять, что

$$1 \text{ а/м} = 1 \frac{\text{ампервиток}}{\text{м}} = 0,01 \frac{\text{ампервитка}}{\text{см}} = 0,01256 \text{ э.}$$

У п р а ж н е н и я. 127.1. Напряженность магнитного поля внутри соленоида равна 300 э. Какой силы ток проходит в соленоиде, если длина его 30 см, а число витков равно 120?

127.2. Как изменится напряженность магнитного поля внутри соленоида из предыдущей задачи, если: а) соленоид растянуть до длины 40 см, б) сжать его до 10 см? Что произойдет, если сложить соленоид пополам так, чтобы витки одной его половины легли между витками второй половины?

127.3. Имеется соленоид длиной 20 см, состоящий из 60 витков диаметром 15 см, по которому идет ток. а) Что произойдет с магнитным полем внутри соленоида, если уменьшить диаметр его витков до 5 см, сохранив прежнюю длину соленоида и использовав тот же самый кусок провода? б) Какими способами можно получить прежнюю напряженность поля, сохранив неизменными длину и диаметр витков соленоида?

127.4. Внутри соленоида длиной 8 см с полным числом витков 40 расположен другой соленоид с числом витков 10 на 1 см длины соленоида. Через оба соленоида проходит одинаковый ток в 2 а. Какова напряженность магнитного поля внутри обоих соленоидов, если северные концы их обращены: а) в одинаковую сторону, б) в противоположные стороны?

127.5. Имеются три соленоида: длина первого $l_1=30$ см, а число витков в нем $n_1=1500$; длина второго соленоида $l_2=5$ см, $n_2=1000$; длина третьего $l_3=24$ см, $n_3=600$. Через первый соленоид идет ток в 1 а. Какие токи нужно пропустить через второй и третий соленоиды, чтобы напряженность магнитного поля внутри всех трех соленоидов была одна и та же?

127.6. Вычислите (в ампервитках/см и э) значение напряженности поля в каждом из соленоидов задачи 127.5.

127.7. В соленоиде длиной 10 см нужно получить магнитное поле с напряженностью 500 ампервитков/см. При этом ток в соленоиде должен быть равен 5 а. Из скольких витков должен состоять соленоид?

127.8. Какова напряженность магнитного поля внутри соленоида, длина которого равна 20 см, а полное число витков 500, при токе в 0,1 а? Как изменится напряженность поля, если соленоид будет растянут до 50 см, а ток уменьшен до 10 ма?

§ 128. Магнитное поле движущихся зарядов. В § 114 мы подчеркивали, что магнитное поле создается любым током, каков бы ни был механизм проводимости в том или другом частном случае. С другой стороны, мы знаем, что всякий ток представляет собой процесс движения отдельных электрически заряженных частиц — электронов или ионов. Совокупность этих данных позволяет утверждать, что *магнитное поле создается благодаря движению заряженных частиц — электронов или ионов*. Иными словами, каждая движущаяся заряженная частица создает свое магнитное поле, и наблюдаемое нами поле тока есть результат сложения магнитных полей, создаваемых отдельными движущимися частицами. В частности, поток электронов, несущихся в электроннолучевой или в разрядной трубке (катодные лучи, §§ 102 и 103), должен создавать вокруг себя магнитное поле. Мы уже видели (§ 103), что, действительно, катодные лучи отклоняются магнитом, подобно току. Но если магнит отклоняет катодные лучи, то и наоборот, катодные лучи должны отклонять легкую магнитную стрелку, т. е. создавать вокруг себя магнитное поле. Действительно, магнитное поле катодных лучей было обнаружено непосредственными опытами. Были осуществлены также опыты, обнаружившие возникновение магнитного поля при самом простом перемещении зарядов, — при достаточно быстром движении заряженного тела обычных размеров (опыты Роуланда в Америке и А. А. Эйхенвальда в Москве).

Опыт Роуланда и Эйхенвальда состоит в следующем. По круглому проволочному витку проходит ток. При этом, как мы знаем, возникает магнитное поле, которое можно обнаружить по отклонению магнитной стрелки, подвешенной на нити вблизи витка. Схематично опыт изображен на рис. 236, а, где вверху слева виток показан в плоскости чертежа, а магнитная стрелка — перпендикулярно к этой плоскости; вверху справа тот же виток изображен перпендикулярно к плоскости чертежа, а стрелка лежит в этой плоскости. Внизу пунктиром показан путь заряженного тела, движущегося по окружности. Отклонение магнитной стрелки, вызванное этим движением, такое же, как при протекании тока по витку проволоки.

Реально этот опыт осуществляется так, как показано на рис. 236, б. Мы имеем здесь проволочное кольцо или сплошной диск D на хорошо изолированной оси AA' . Кольцо (или диск) заряжаются и могут с большой скоростью вращаться вокруг оси AA' . Над ними помещается маг-

нитная стрелка M , защищенная от внешних электрических воздействий металлическим футляром. На нити, на которой подвешена стрелка, укреплено маленькое зеркальце S ; с помощью зрительной трубы и этого зеркальца можно через окошечко f наблюдать за отклонениями стрелки. Опыт показал, что при вращении диска стрелка отклоняется совершенно так же, как если бы по проволочному кольцу проходил электрический

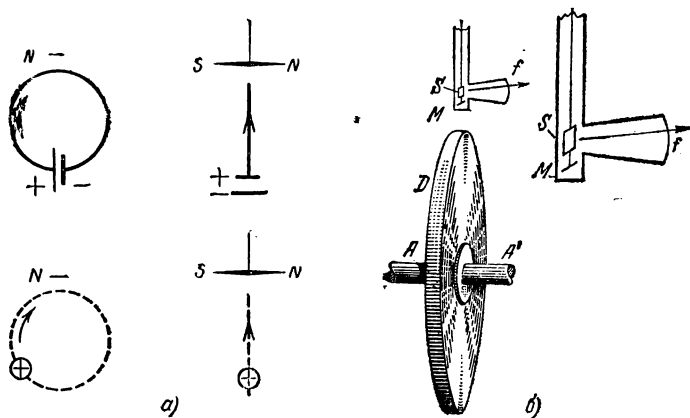


Рис. 236. а) Схема опыта Роуланда — Эйхенвальда. б) Осуществление опыта; при вращении заряженного диска D магнитная стрелка M отклоняется так же, как под действием соответствующего кругового тока; отклонение наблюдают с помощью зеркальца S через окошечко f .

ток соответствующей величины и направления. При изменении направления вращения диска или знака заряда на нем отклонение стрелки также изменяется на обратное.

Эти опыты доказывают, что движущееся заряженное тело создает вокруг себя магнитное поле совершенно такое же, как обычный электрический ток. Они подтверждают, таким образом, предположение, что наблюдаемое нами магнитное поле тока есть результат наложения магнитных полей, создаваемых отдельными движущимися заряженными частицами — электронами или ионами.

ГЛАВА XIII

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

§ 129. Магнитное поле Земли. В § 112 мы говорили о том, что подвешенная на нити или укрепленная на острие магнитная стрелка устанавливается в каждой точке вблизи земной поверхности определенным образом — приблизительно в направлении с севера на юг. Этот основной факт означает, что *существует магнитное поле Земли*.

Изучение магнитного поля Земли имеет чрезвычайно важное практическое и научное значение. С давних времен известен компас, прибор, в котором используется магнитное поле Земли и который дает возможность ориентироваться относительно стран света. Обычный походный компас изображен на рис. 237.

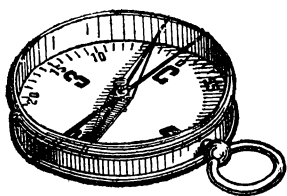


Рис. 237. Компас.

В современном кораблевождении и самолетовождении магнитный компас уже не является единственным средством ориентации и определения курса корабля или самолета. Для этих целей существуют и другие приборы. Однако магнитный компас отнюдь не потерял своего значения. Он остается и теперь важным прибором для штурмана корабля, и магнитными компасами по сегодняшний день снабжаются все корабли и самолеты. Компас широко применяется также разведчиками, охотниками, путешественниками, геологами и т. п.

Наличие магнитного поля Земли позволяет осуществить также ряд других важных исследований. Из них мы особенно отметим методы поисков и изучения месторождений железа.

Ход силовых линий земного магнитного поля схематически изображен на рис. 238, из которого видно, что земное магнитное поле имеет такой вид, как будто земной шар представляет собой магнит с осью, направленный приблизительно с севера на юг. В северном полушарии все магнитные силовые линии сходятся в точке, лежащей на $70^{\circ}50'$ шев. широты и 96° зап. долготы. Эта точка называется южным магнитным полюсом Земли¹⁾. В южном полушарии точка схождения силовых линий лежит на $70^{\circ}10'$ южн. широты и $150^{\circ}45'$ вост. долготы; она называется северным магнитным полюсом Земли. Нужно заметить, что точки схождения силовых линий земного магнитного поля лежат не на самой поверхности Земли, а под ней. Магнитные полюсы Земли, как мы видим, не совпадают с ее географическими полюсами. Магнитная ось Земли, т. е. прямая, проходящая через оба магнитных полюса Земли, не проходит через ее центр и, таким образом, не является земным диаметром.

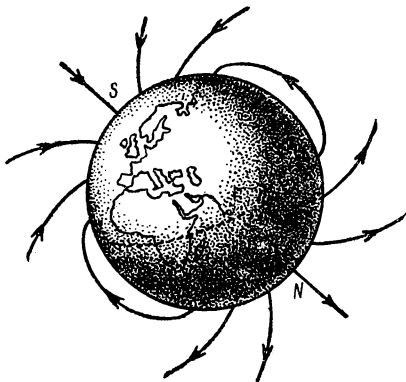


Рис. 238. Силовые линии магнитного поля Земли.

У п р а ж н е н и я. 129.1. Уже очень давно, с XVI века, известно, что вертикально стоящие железные оконные решетки с течением времени намагничиваются. Объясните это явление. Какой вывод можно сделать из него относительно направления напряженности земного магнитного поля? На каком конце вертикального прута — верхнем или нижнем — возникает северный полюс и на каком — южный?

129.2. В книге одного из первых исследователей земного магнетизма Джильберта описан следующий опыт. Если бить молотком по железной полосе, расположенной с севера на юг, то полоса намагнитится. Объясните это явление. Укажите, как будут расположены северный и южный полюсы на намагнитившейся таким образом полосе.

129.3. Самопроизвольное намагничивание железных предметов в магнитном поле Земли было использовано для устройства магнитных

¹⁾ Впрочем, положение магнитных полюсов Земли со временем медленно изменяется.

мин, которые устанавливаются на некоторой глубине под поверхностью воды и взрываются при прохождении над ними корабля. Механизм, заставляющий мину всплывать и взрываться, приходит в действие, когда магнитная стрелка, вращающаяся вокруг горизонтальной оси, поворачивается под влиянием магнитного поля проходящего над миной железного корабля, который всегда оказывается самопроизвольно намагниченным (подобно железным решеткам в задаче 129.1). Для борьбы с магнитными минами применяют два способа: магнитное траление этих мин и нейтрализацию магнитного поля корабля.

Первый способ заключается в том, что самолет, летящий низко над поверхностью моря, пронесит над этим участком подвешенный к нему на тросах сильный магнит. Иногда вместо этого опускают на поверхность воды на поплавках кабель в виде кольца и пропускают по этому кольцу ток. Под влиянием поля магнита или тока механизмы всех мин приходят в действие, и мины взрываются, не причиняя вреда.

Второй способ состоит в том, что на корабле укрепляют петли из изолированного провода и по ним пропускают токи с таким расчетом, чтобы магнитное поле этих токов было равно и противоположно полю корабля (постоянного магнита). Оба поля, складываясь, уничтожают друг друга, и корабль свободно проходит над магнитной миной, не приводя в действие ее механизма. Укажите: а) как должен быть направлен ток в петле, если она расположена горизонтально: по направлению часовой стрелки или против нее, если смотреть на палубу корабля сверху? б) Имеет ли значение направление тока в кабеле при первом способе?

129.4. К одной из чашек весов привешен вертикальный железный стержень, после чего весы уравновешены. В какую сторону нарушится равновесие весов, если мы намагнитим этот стержень так, чтобы северный полюс его был внизу?

129.5. При подготовке полетов на северный полюс много внимания уделялось вопросу об обеспечении ориентации самолета вблизи полюса, так как там обыкновенные магнитные компасы работают очень плохо и практически непригодны. Почему это так?

§ 130. Элементы земного магнетизма. Так как магнитные и географические полюсы Земли не совпадают, то магнитная стрелка указывает направление север — юг только при близком к горизонту положении. Плоскость, в которой устанавливается магнитная стрелка, называют плоскостью магнитного меридиана данного места, а прямую, по которой эта плоскость пересекается с горизонтальной плоскостью, называют магнитным меридианом. Угол между направлениями магнитного и географического меридианов называют магнитным склонением. Его принято обозначать греческой буквой ϕ , и величина его меняется от места к месту на земном шаре.

Магнитное склонение называют западным или восточным, в зависимости от того, к западу или к востоку от плоскости географического меридиана отклоняется северный полюс магнитной стрелки (рис. 239, а и б).

Величину склонения измеряют ст 0 до 180° . Часто восточное склонение отмечают знаком $+$, а западное знаком $-$.

Из рис. 238 мы видим, далее, что силовые линии земного магнитного поля, вообще говоря, не параллельны поверхности Земли. Это означает, что напряженность магнитного поля Земли не лежит в плоскости горизонта данного места, а образует с этой плоскостью некоторый угол. Этот угол называется магнитным наклоном. Магнитное наклонение часто обозначают буквой i . Величина магнитного наклонения в разных местах Земли различна.

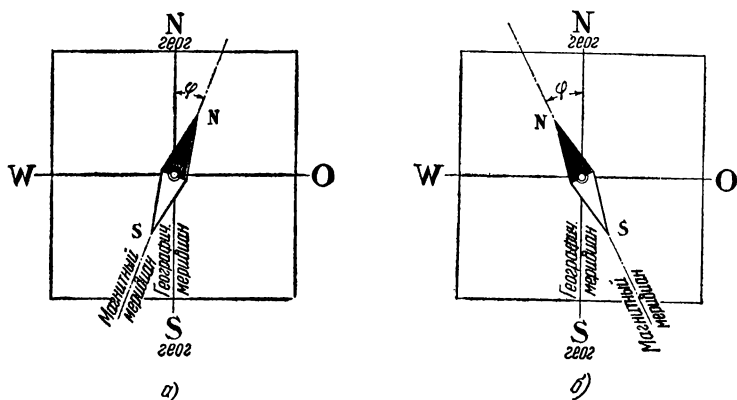


Рис. 239. Положение магнитной стрелки относительно стран света: а) в местах с восточным магнитным склонением; б) в местах с западным магнитным склонением. φ — угол склонения; W — точка запада; O — точка востока.

Очень ясное представление о направлении напряженности земного магнитного поля в данной точке можно получить, укрепив магнитную стрелку так, чтобы она могла свободно вращаться и вокруг вертикальной и вокруг горизонтальной оси. Это можно осуществить, например, с помощью подвеса (так называемого карданова подвеса), показанного на рис. 240. Стрелка устанавливается при этом по направлению напряженности поля.

Магнитное склонение и магнитное наклонение (углы φ и i) полностью определяют направление напряженности земного магнитного поля в данном месте. Остается еще определить численное значение этой величины. Пусть плоскость P на рис. 241 представляет

собой плоскость магнитного меридиана данного места. Лежащую в этой плоскости напряженность земного магнитного поля M мы можем разложить

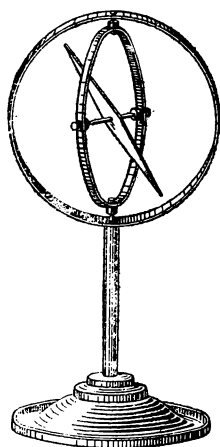


Рис. 240. Магнитная стрелка, укрепленная в кардановом подвесе, устанавливается по направлению напряженности земного магнитного поля.

на две составляющие: горизонтальную H и вертикальную Z . Зная угол i (наклонение) и величину одной из составляющих, мы можем легко вычислить величину другой составляющей или самого вектора M . Если, например, нам известна величина горизонтальной составляющей H , то из прямоугольного треугольника находим:

$$M = \frac{H}{\cos i}; \quad Z = H \cdot \operatorname{tg} i.$$

На практике оказывается наиболее удобным непосредственно измерять именно горизонтальную составляющую земного магнитного поля. Поэтому чаще всего величину напряженности этого поля в том или ином месте Земли характеризуют величиной ее горизонтальной составляющей.

Таким образом, три величины: *склонение, наклонение и численное значение горизонтальной составляющей* полностью характеризуют по величине и направлению магнитное поле Земли в данном месте. Эти три величины называют элементами земного магнитного поля.

Упражнения. 130.1. Угол наклонения магнитной стрелки $i = 60^\circ$. Если к ее верхнему концу прикрепить гирьку весом в 0,1 Г, то стрелка установится под углом 30° к горизонту. Какую гирьку нужно прикрепить к верхнему концу этой стрелки, чтобы стрелка стала горизонтально?

130.2. На рис. 242 изображен инклинатор, или буссоль наклонений,— прибор, служащий для измерения магнитного наклонения. Он представляет собой магнитную стрелку, укрепленную

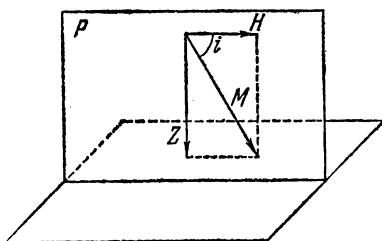


Рис. 241. Разложение напряженности земного магнитного поля на горизонтальную и вертикальную составляющие.

на горизонтальной оси и снабженную вертикальным разделенным кругом для отсчета углов наклоения. Стрелка всегда вращается в плоскости этого круга, но сама плоскость эта может поворачиваться вокруг вертикальной оси. При измерении наклоения круг устанавливается в плоскости магнитного меридиана.

Покажите, что если круг инклинометра установлен в плоскости магнитного меридиана, то стрелка установится под углом к плоскости горизонта, равным наклоению земного магнитного поля в данном месте. Как будет изменяться этот угол, если мы будем поворачивать круг инклинометра вокруг вертикальной оси? Как установится стрелка, когда плоскость круга инклинометра будет перпендикулярна к плоскости магнитного меридиана?

130.3. Как будет вести себя обыкновенная компасная стрелка, помещенная над одним из земных магнитных полюсов? Как будет вести себя там стрелка наклоения?

Точное знание величин, характеризующих земное магнитное поле, для возможно большего числа пунктов на Земле имеет чрезвычайно важное значение. Ясно, например, что для того, чтобы штурман корабля или самолета мог

пользоваться магнитным компасом, он должен в каждой точке своего пути знать величину магнитного склонения. Ведь компас указывает ему направление магнитного меридиана, а для определения курса корабля он должен знать направление географического меридиана.

Склонение дает ему ту поправку к показаниям компаса, которую необходимо внести, чтобы найти истинное направление север — юг. Поэтому с середины прошлого века во всех цивилизованных странах ведется систематическое изучение земного магнитного поля. Свыше 50 специальных магнитных обсерваторий, распределенных по всему земному шару, систематически, изо дня в день, ведут магнитные наблюдения.

В настоящее время мы имеем обширные данные о распределении элементов земного магнетизма по земному шару. Данные эти показывают, что элементы земного магнетизма

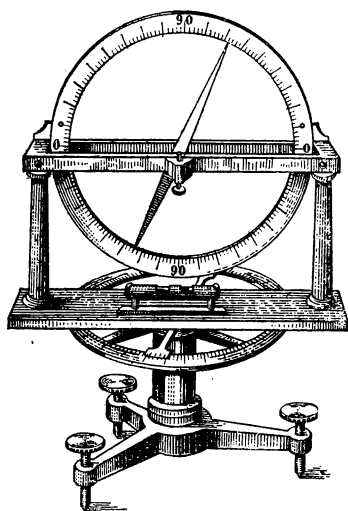


Рис. 242. К упражнению 130.2. Инклинометр.

изменяются от точки к точке закономерно и в общем определяются широтой и долготой данного пункта.

§ 131. Магнитные аномалии и магнитная разведка полезных ископаемых. На земном шаре встречаются местности, в которых магнитные элементы изменяются очень резко и имеют значения, сильно отличающиеся от соответствующих значений в соседних местностях. Такие области называются областями магнитной аномалии.

Причиной магнитной аномалии в большинстве случаев является наличие под поверхностью Земли больших масс магнитной железной руды. Поэтому изучение магнитной аномалии может дать ценные указания о наличии и расположении этих залежей. Одной из самых больших и хорошо изученных магнитных аномалий является Курская магнитная аномалия, исследованная под руководством академика П. П. Лазарева. Здесь обнаружены огромные залежи железной руды, разработка которых уже началась.

Детальное изучение магнитного поля Земли представляет собой мощное орудие исследования скрытых в недрах Земли богатств. Магнитная разведка является в настоящее время одним из очень важных и широко применяемых геофизических методов разведки полезных ископаемых.

§ 132. Изменение элементов земного магнетизма с течением времени. Магнитные бури. Элементы земного магнетизма в каждой точке земного шара с течением времени медленно изменяются. Для некоторых европейских станций уже имеются наблюдения за 300—400 лет, и можно довольно ясно представить себе закон, по которому происходят эти медленные или, как говорят, вековые изменения земного магнитного поля.

Однако, помимо этого векового изменения земного магнитного поля, элементы земного магнетизма еще немного меняются периодически в течение суток и в течение года. Эти изменения, носящие название суточного и годового хода земного магнетизма, невелики.

Все эти периодические изменения магнитного поля происходят довольно плавно. Однако время от времени случается, что магнитное поле Земли сразу, в течение нескольких часов, меняется очень сильно. Это явление носит название магнитной бури, или магнитного возмущения. Магнитная буря продолжается обычно от 6 до

12 часов, а затем элементы земного магнетизма постепенно возвращаются к своим нормальным значениям. Магнитные бури во время равноденствий случаются чаще, чем в другие времена года.

Число и интенсивность магнитных бурь в разные годы различны. Периоды максимума магнитных бурь повторяются с промежутком в 11,5 года. После каждого такого периода число бурь постепенно уменьшается, достигает минимума и затем начинает снова повышаться до максимума. Ряд других явлений: число полярных сияний, число солнечных пятен, некоторые явления, связанные с распространением радиоволн и др., также имеют периодичность в 11,5 года. В настоящее время можно считать установленным, что эти совпадения не случайны, а указывают на внутреннюю связь упоминаемых явлений.

ГЛАВА XIV

СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ НА ПРОВОДНИКИ С ТОКОМ

§ 133. Введение. В предшествующих главах мы познакомились с разнообразными электромагнитными явлениями. Были рассмотрены различные случаи взаимодействия магнитов между собой, действия токов на магниты и магнитов на токи, равно как и взаимодействия токов. Во всех этих случаях дело сводится к воздействию магнитного поля, созданного какими-либо магнитами и токами, на помещенные в это поле магниты и токи. Но магнитные свойства постоянных магнитов также обуславливаются токами, непрерывно циркулирующими в элементарных частицах, из которых построено вещество этих магнитов (молекулярные амперовы токи). Таким образом, в основе всех магнитных взаимодействий лежит воздействие магнитного поля на токи. Поэтому более подробное рассмотрение этого вопроса представляет глубокий научный интерес. С другой стороны, и огромное количество технических применений электромагнитных явлений сводится к воздействию магнитного поля на проводники, по которым идет ток. В соответствии с этим мы в настоящей главе рассмотрим более внимательно силы, действующие в магнитном поле на проводники, по которым идет ток.

§ 134. Действие магнитного поля на прямолинейный ток. Правило левой руки. Мы можем придать проводникам такую форму, при которой более отчетливо выяснится характер воздействия магнитного поля на отдельные участки цепи, по которой течет ток. Воспользуемся магнитным полем подковообразного магнита или электромагнита, а цепь с током составим так, чтобы только один

прямолинейный участок ее оказался в сильном поле, остальные же участки цепи проходили по тем частям пространства, где напряженность поля чрезвычайно мала и действием поля на эти части цепи можно смело пренебречь. Рис. 243 показывает удобное расположение этого рода. Практически лишь прямолинейный участок цепи AB находится под действием значительного поля, так что наблюдаемые силы являются силами, с которыми магнитное поле

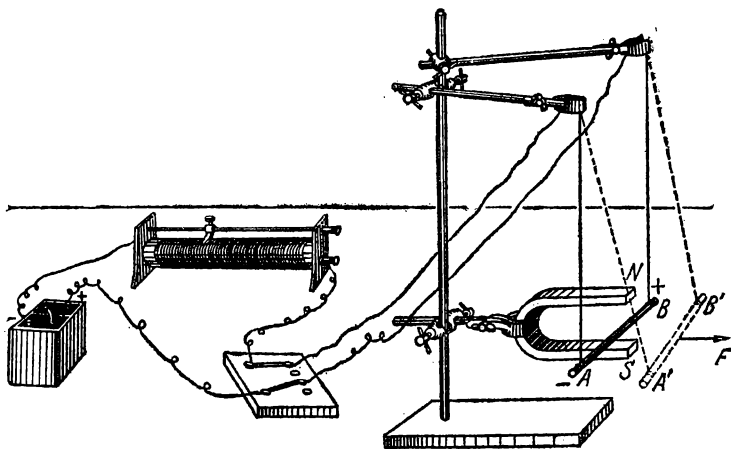


Рис. 243. Действие магнитного поля на прямолинейный ток. Стрелкой F отмечено направление силы, действующей на проводник, по которому течет ток. Проводник AB , по которому течет ток, выталкивается из магнитного поля.

действует на прямолинейный ток. Меняя направление тока в участке AB (например, с помощью переключателя), изменяя ориентировку участка AB по отношению к магнитному полю (поворачивая магнит), можно исследовать направление действующей силы (рис. 244, a , b , $в$)¹⁾. Эти опыты показывают, что участок проводника AB отклоняется вправо или влево (рис. 243) или стремится

¹⁾ На рис. 244, a , b и $в$ для простоты чертежа показано, что провод AB висит на упругих пружинках (на динамометре), которые растягиваются или сжимаются в зависимости от того, направлена ли сила вниз или вверх. Чтобы установка была достаточно чувствительной, надо провод AB подвесить к чашке чувствительных весов и применить сильное магнитное поле и большой ток.

переместиться вверх или вниз (рис. 244, а и б). Наконец, в расположении рис. 244, в оказывается, что поле не действует на провод, когда ток в нем течет параллельно направлению поля. Выполняя разнообразные опыты такого рода, можно сделать следующий общий вывод:

Направление силы F , с которой магнитное поле действует на прямолинейный участок проводника с током I , всегда перпендикулярно к направлению тока и к направлению напряженности магнитного поля H .

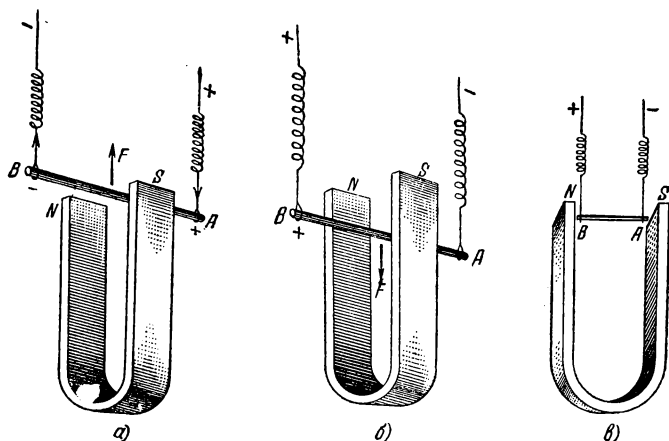


Рис. 244. а), б) При перемене направления тока меняется направление силы F : проводник с током, который выталкивался из магнитного поля, втягивается в него. в) Такое направление тока относительно магнита, при котором магнитное поле не действует на проводник с током.

На проводники, расположенные вдоль направления поля, поле не действует.

При этом взаимное расположение направлений I , H и F таково, как показано на рис. 245, а, б, в, г. Для запоминания этого взаимного расположения удобно пользоваться следующим правилом — правилом левой руки (рис. 246).

Если положить левую ладонь так, чтобы вытянутые пальцы указывали направление тока, а линии магнитного поля впились в ладонь, то отставленный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник.

Если направление напряженности магнитного поля H составляет некоторый угол с направлением прямолинейного

участка тока I , то для определения действия поля на ток надо разложить напряженность H на две составляющие: $H_{||}$, параллельную току, и H_{\perp} , перпендикулярную к току (рис. 247). Лишь эта последняя и обуславливает силу действия поля, и по отношению к ней надо применять наше правило.

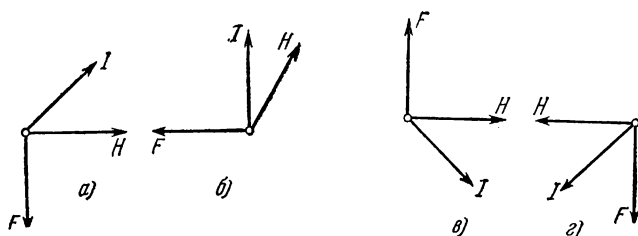


Рис. 245. Различные случаи взаимного расположения направлений напряженности магнитного поля (стрелка H) и направления тока (стрелка I). Стрелкой F на всех рисунках отмечено направление силы, действующей на проводник с током.

Если выполнять измерение величины силы F , пользуясь показаниями весов (или динамометра) в расположении рис. 244, а и б, то можно установить, что эта сила пропорциональна току, напряженности поля и длине участка AB ¹⁾. Это соотношение носит название закона Ампера. Конечно, подобными опытами оно может быть проверено лишь очень грубо. Однако, пользуясь им для расчета сил, действующих на сложные проводники, в самых разнообразных случаях и сравнивая результаты расчета с опытом, мы убеждаемся в справедливости этого закона.

Если напряженность поля равна H , сила тока I , длина прямолинейного участка тока l и угол между H и l равен φ , то закон Ампера выразится в виде соотношения

$$F = k \cdot H \cdot I \cdot l \cdot \sin \varphi, \quad (14,1)$$

¹⁾ Предполагается, что на протяжении всего участка AB поле имеет одну и ту же напряженность H .



Рис. 246. Правило левой руки.

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц измерения. Так, если F выражается в динах, I — в амперах, H — в эрстедах, l — в сантиметрах, то $k=0,1$.

Из формулы (14,1) следует, что когда l параллельно H (т. е. $\varphi=0$), то $F=0$, т. е. на проводники, параллельные направлению поля, поле не действует, как это и вытекает из опытов, описанных в этом параграфе (рис. 244, в).

Мы уже говорили о том, что два параллельных прямолинейных проводника притягиваются друг к другу, если по ним проходят одинаково направленные токи, и отталкиваются, если токи направлены

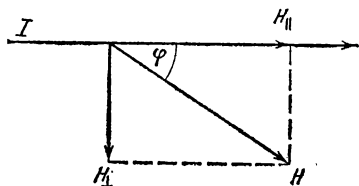


Рис. 247. Магнитное поле H разложено на две составляющие: H_{\parallel} , параллельную направлению тока, и H_{\perp} , перпендикулярную к нему.

навстречу друг другу (§ 115). Это нетрудно объяснить, если учесть, что каждый проводник находится в магнитном поле, создаваемом током в другом проводнике, и воспользоваться правилами буравчика и левой руки.

Что касается величины силы притяжения (или отталкивания), то она пропорциональна произведению сил токов I_1 , I_2 в первом и втором проводниках и длине проводов l и обратно пропорциональна расстоянию между проводами r :

$$F = k \frac{I_1 I_2 l}{r}. \quad (14,2)$$

Получается это потому, что магнитное поле H_1 тока I_1 на расстоянии r от первого проводника пропорционально I_1/r , а сила, действующая на второй проводник (на его участок длины l), в соответствии с формулой (14,1), пропорциональна $H_1 I_2 l$. Угол φ в данном случае прямой, т. е. $\sin \varphi=1$. Легко понять, что такая же по величине сила действует на первый проводник в магнитном поле тока I_2 .

Для сравнения сил токов и установления единицы силы тока можно, вообще говоря, воспользоваться любым из различных действий (проявлений) электрического тока — тепловым (§ 57), химическим (§ 65) или магнитным (гл. XII). Так, например, в Международной практической системе

единиц токи сравниваются по их химическому действию и за единицу силы тока (ампер) принимается ток, который за 1 сек выделяет на катоде 1,1180 мг серебра.

В системе СИ ампер (одна из основных единиц в этой системе) определяется при помощи сил взаимодействия между проводниками, по которым текут токи. Для определения используется именно формула (14,2), выражающая силу взаимодействия двух параллельных токов. Коэффициент k полагается равным $2 \cdot 10^{-7}$, так что один ампер есть сила такого постоянного тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам, расположенным на расстоянии $r=1$ м друг от друга, вызывает между ними силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ ньютона на каждый метр длины провода ($l=1$ м). Провода предполагаются при этом очень длинными и очень тонкими. В идеальном случае они должны быть бесконечно длинными и бесконечно тонкими, а практически их длина должна быть гораздо больше, а их диаметр — гораздо меньше расстояния между проводниками.

Определенный таким способом ампер практически совпадает как с ампером абсолютной системы единиц (стр. 118), так и с ампером Международной практической системы, определенным по электрохимическому действию тока. Однако практически трудно с достаточной точностью обеспечить условия применимости формулы (14,2) и измерять в этих условиях силу F . Поэтому, хотя определение ампера в системе СИ дано именно для случая параллельных проводов, на практике для установления эталона ампера и для калибровки других приборов, предназначенных для измерения силы тока, пользуются другим прибором — так называемыми ампер-весами. В них при помощи точных весов измеряется сила взаимодействия двух катушек, по которым проходит один и тот же ток. Для этих условий тоже можно вывести точную формулу, которая, подобно (14,2), связывает величину силы притяжения катушек с силой тока в них.

Упражнение 134.1. Проводник MN (рис. 248) укреплен на острие так, что он может свободно вращаться вокруг оси $Ол$. Концы проводника загнуты и погружены в кольцеобразные желобки с ртутью, соединенные с полюсами батареи. Таким образом, через проводник постоянно проходит ток в направлении стрелки I_1 . В той же горизонтальной плоскости находится проводник CD , по которому идет ток в направлении стрелки I_2 . Как установится проводник MN под действием магнитного поля, создаваемого током в проводнике CD ?

134.2. Как направлена сила, с которой магнитное поле Земли действует в северном полушарии на горизонтальный проводник с током: а) если этот проводник расположен в плоскости магнитного меридиана и ток идет с севера на юг? б) если проводник перпендикулярен к плоскости магнитного меридиана и ток идет с запада на восток?

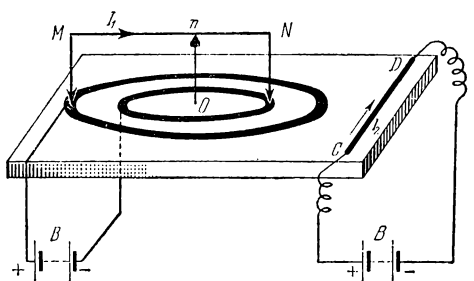


Рис. 248. К упражнению 134.1.

§ 135. Действие магнитного поля на виток или соленоид, по которому проходит ток. В предыдущем параграфе мы рассмотрели действие поля на искусственно выделенный прямолинейный участок тока. Но ток, протекающий по проводнику, представляет собой замкнутую цепь, и действие магнитного поля на ток весьма сложным образом зависит от формы проводников и от их расположения в поле. Мы ограничимся рассмотрением сравнительно простых, но важных случаев, когда проводник представляет собой один виток или совокупность последовательно соединенных витков (соленоид). Для изучения действия магнитного поля на такой виток или соленоид удобно придать приборам форму, изображенную на рис. 249, а и б, где провода MM' и LL' , подводящие ток от батареи B , сделаны длинными и тонкими, так что они одновременно служат подвесами, дающими возможность витку легко поворачиваться и перемещаться. Помещая такой виток или соленоид в магнитное поле, например в магнитное поле Земли или между полюсами магнита или электромагнита, мы можем изучать действие поля на виток (соленоид). При этом можно пренебречь действием поля на подводящие провода, если они расположены очень тесно друг к другу или, еще лучше, обвивают друг друга. Действительно, по этим проводам текут токи одинаковой величины и противоположного направления и они

находятся в одном и том же поле. Следовательно (§ 134), на подводящие провода действуют равные и противоположные силы, под действием которых подвес остается в покое.

Мы неоднократно обращали внимание на то, что виток, обтекаемый током, эквивалентен короткому магниту, направление которого перпендикулярно к плоскости витка, причем северный полюс этого магнита расположен на той стороне плоскости витка, с которой ток кажется циркулирующим против часовой стрелки

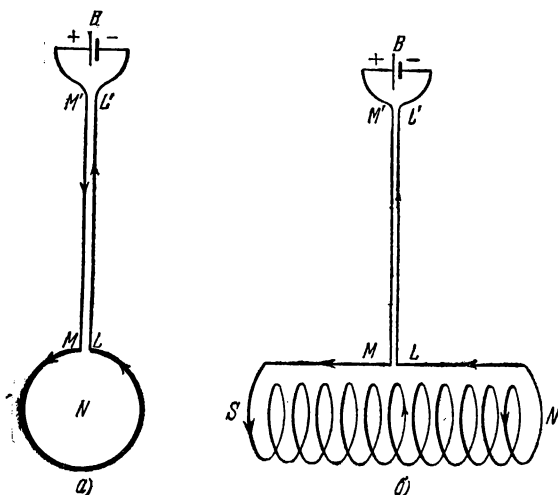


Рис. 249. Для исследования в магнитном поле удобна такая форма: а) витка с током; б) соленоида.

(правило буравчика, § 125), а южный на противоположной стороне. Соленоид же эквивалентен магниту, лежащему вдоль оси соленоида. Ось этого магнита совпадает с осью соленоида, а расположение северного и южного полюсов определяется правилом буравчика, так же как и в случае витка. Естественно поэтому, что на такой виток или соленоид поле действует как на магнитную стрелку, а именно: однородное поле создает вращающий момент, стремящийся повернуть виток или соленоид так, чтобы ось его расположилась вдоль поля и направление от южного полюса витка (или соленоида) к северному совпало с направ-

лением поля (рис. 250, а и б). В неоднородном поле к этому вращающемуся моменту присоединяется сила, увлекающая повернувшийся виток (соленоид) в том направлении, в каком увеличивается напряженность поля.

Пользуясь сведениями, полученными нами в § 134 относительно действия магнитного поля на прямолинейный участок тока, мы можем яснее представить себе происхождение

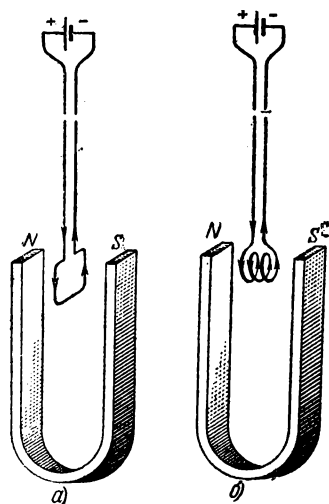


Рис. 250. Положение, которое принимают в магнитном поле: а) виток с током, б) соленоид.

вращающего момента и влекущей силы, которые действуют на виток с током в магнитном поле. Пусть виток имеет прямоугольную форму (рис. 251) и расположен в однородном поле так, что две его стороны параллельны направлению поля, а две перпендикулярны к нему. На первые две поле не действует (положение рис. 244, в), а на две вторые действует с равными и противоположными силами F_1 и F_2 , потому что обе эти стороны имеют одинаковую длину l и по ним течет ток I , одинаковый по величине, но противоположного направления (рис. 251, а и б).

Таким образом, силы, с которыми однородное поле действует на виток, составляют пару сил, которая и обуславливает вращающий момент, поворачивающий виток так, что плоскость его устанавливается перпендикулярно к направлению поля. Если поле однородно, то этим поворотом и ограничивается воздействие поля, ибо в этом положении действие поля сводится к двум равным и противоположно направленным силам, которые не могут перемещать виток, а только стремятся его деформировать и уничтожаются упругими силами, возникающими при деформации жесткого витка (рис. 252, а и б). Но если поле неоднородно и, следовательно, напряженность поля в разных местах его имеет различное направление (и величину), то результат будет несколько сложнее (рис. 253). Силы, действующие на разные стороны повернувшегося витка,

теперь не равны и направлены не в прямо противоположные стороны, а составляют некоторый угол между собой (рис. 253, а), ибо эти силы перпендикулярны к направлению

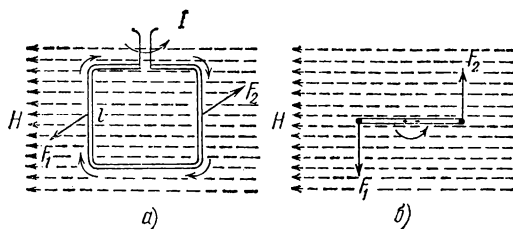


Рис. 251. Рамка с током в однородном поле поворачивается, устанавливаясь так, чтобы плоскость ее была перпендикулярна к линиям поля. F_1 и F_2 — силы, поворачивающие рамку. а) Вид сбоку; б) вид сверху. Стрелка указывает направление вращения.

напряженности поля. Их равнодействующая E направлена в сторону возрастания напряженности поля (рис. 253, б) ¹⁾.

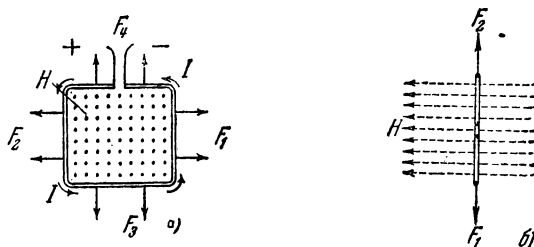


Рис. 252. Когда рамка с током стоит перпендикулярно к линиям однородного поля H , то действующие на нее силы стремятся только деформировать рамку (сжать или растянуть ее), но не вызывают ее поступательного движения как целого. F_1 , F_2 , F_3 и F_4 — силы, действующие на рамку. а) Вид сбоку, магнитное поле направлено навстречу наблюдателю; б) вид сверху.

Наше рассмотрение касалось прямоугольного витка. Оно сохраняет свою силу и для витка любой

¹⁾ Напоминаем, что при графическом изображении магнитного поля с помощью силовых линий линии чертятся гуще там, где напряженность больше (§ 123).

формы, только в этом случае расчет несколько более сложен и мы его не приводим.

В случае соленоида сказанное применимо к каждому витку. Вращающие моменты, действующие на каждый виток

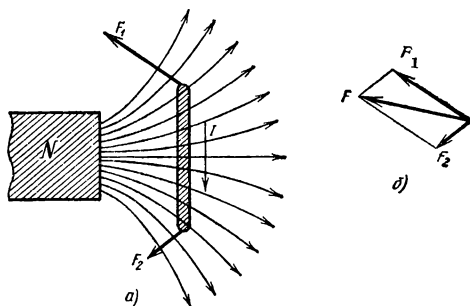


Рис. 253. Когда рамка ориентируется в неоднородном поле, то действующие на нее силы дают равнодействующую, вызывающую движение рамки в область наибольшей напряженности поля. а) Вид на рамку сверху; I — ток в рамке. б) Сложение сил F_1 и F_2 , действующих на боковые стороны рамки. F — равнодействующая сила, стремящаяся втянуть рамку в область наибольшей напряженности поля.

жесткого соленоида, складываясь, дают результирующий вращающий момент, поворачивающий весь соленоид. При неоднородном поле силы, влекущие каждый виток в сторону

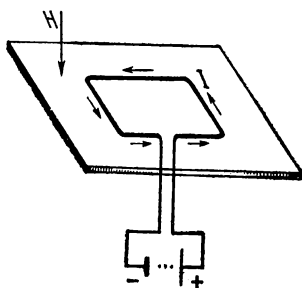


Рис. 254. К упражнению 135.1.

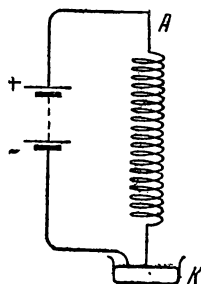


Рис. 255. К упражнению 135.3.

возрастания напряженности поля, окажут такое же действие и на весь соленоид в целом. Это рассмотрение объясняет нам, каким образом действие поля на каждый элементарный

амперов ток приводит к повороту всей магнитной стрелки и к ее увлечению вдоль поля, если оно неоднородно.

У п р а ж н е н и я . 135.1. В горизонтальной плоскости лежит виток. Однородное магнитное поле направлено вертикально сверху вниз (рис. 254). Как будут направлены силы, действующие на виток, если по нему пропустить ток I в направлении, указанном стрелкой? Как будут направлены силы, если ток идет в обратном направлении? Какую форму стремится принять виток, если он сделан из очень гибкой проволоки, при первом и втором направлениях тока?

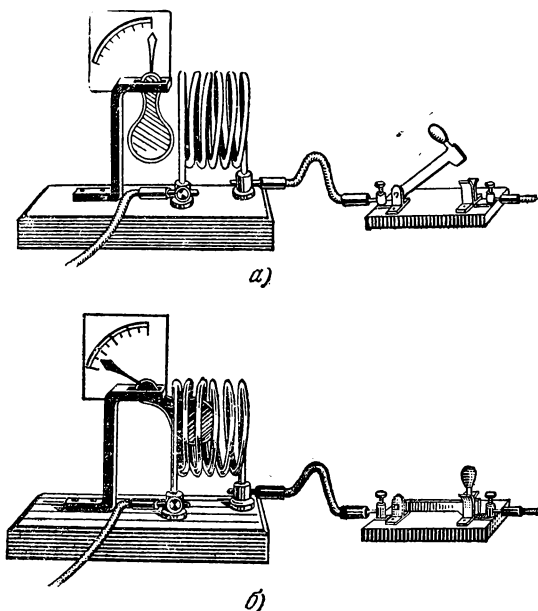


Рис. 256. К упражнению 135.4. а) ток в соленоиде выключен; б) ток включен.

135.2. Если через проволочную спираль пропускать ток, то витки ее притягиваются друг к другу, и спираль стягивается по оси. Объясните это явление.

135.3. Объясните опыт с «танцующей пружиной», изображенной на рис. 255. Ток подводится к пружине через верхний неподвижный конец ее A и через чашечку с ртутью K , в которую погружен нижний конец пружины. При включении тока пружина начинает периодически сжиматься и растягиваться, причем конец ее то выскакивает из ртути, то снова погружается в нее. Какой из известных нам приборов напоминает это устройство? Для какой цели его можно было бы использовать?

135.4. Кусок железа, помещенный перед катушкой (рис. 256), притягивается к ней при включении тока, независимо от направле-

ния тока. На этом основано устройство амперметров и вольтметров так называемой электромагнитной системы, применяемых для измерения переменного тока и напряжения; для ясности кусок железа снабжен стрелкой и показана шкала. Объясните этот опыт. Двигалось ли бы железо, если бы мы поместили его в н у т р ь катушки, т. е. в область, где магнитное поле однородно?

135.5. На рис. 257 изображена модель «электропушки» ¹⁾, представляющая собой горизонтально укрепленный соленоид, намотанный на медную или стеклянную трубку. У одного конца его находится железный «снаряд» (гвоздь) *п*. Если на короткое время включить в соленоид

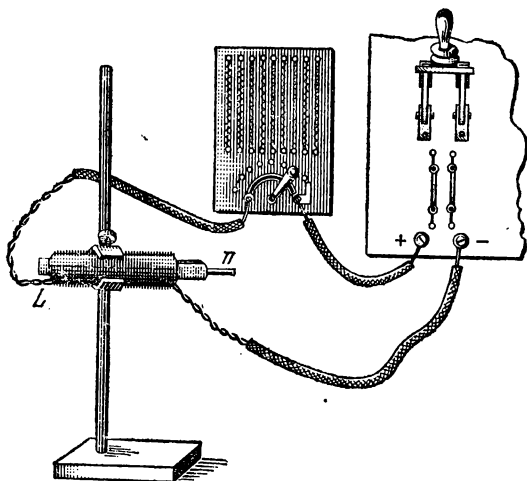


Рис. 257. К упражнению 135.5. Модель электропушки.

достаточно большой ток, то снаряд втянется внутрь соленоида, пролетит сквозь него и вылетит с довольно значительной скоростью. В какой момент нужно выключить ток, чтобы снаряд вылетел из соленоида с наибольшей скоростью? Каково будет движение снаряда, если ток остается включенным все время?

§ 136. Гальванометр, основанный на взаимодействии магнитного поля и тока. Так как силы, действующие в магнитном поле на ток, пропорциональны величине тока, то это действие удобно использовать для измерения величины тока, т. е. для построения электроизмерительных приборов, носящих общее название г а л ь в а н о -

¹⁾ Об электропушке можно прочитать в книге Внукова «Физика и оборона страны», ч. II.

метров. Наиболее распространенными являются гальванометры с вращающейся катушкой (рамкой). Схема такого гальванометра изображена на рис. 258. *C* — легкая плоская катушка (рамка) из очень тонкой медной проволоки, висящая на упругих подвесах или вращающаяся на подшипниках и удерживаемая в положении равновесия упругими пружинами (наподобие «волоска» карманных часов). Ток в катушку подводится через подвесы или через очень тонкие ленточки из какого-либо мягкого металла (например, из сусального золота). Катушка помещается между полюсами магнита таким образом, чтобы под действием упругих креплений в отсутствие тока плоскость катушки располагалась вдоль направления магнитного поля. При прохождении тока магнитное поле поворачивает катушку до тех пор, пока вращающий момент поля не будет уравновешен вращающим моментом закручивающегося подвеса или упругих пружинок. Проградуировав предварительно прибор, т. е. определив, какие углы поворота катушки соответствуют разным токам, мы получаем возможность по углу поворота судить о величине тока в катушке. Показания прибора отсчитывают на шкале по положению стрелки, прикрепленной к катушке, а в более чувствительных приборах с помощью светового зайчика, отбрасываемого прикрепленным к рамке легким зеркальцем на удаленную шкалу.

Чувствительность гальванометров такого типа может быть сделана очень высокой, до 10^{-9} и даже 10^{-10} ампера на одно деление шкалы. Очень чувствительные гальванометры удается также осуществить по принципу рис. 244. Проводником *AB* служит очень тонкая и легкая проволока, удерживаемая упругими растяжками в магнитном поле. При прохождении тока она слегка смещается под действием силы *F*. Величину смещения нити, зависящую от величины тока, отсчитывают при помощи микроскопа с небольшим увеличением (с т р у н н ы й г а л ь в а н о м е т р).

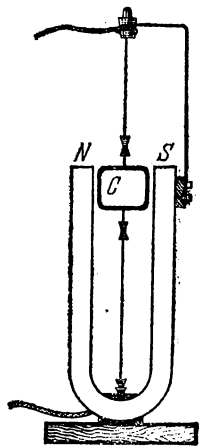


Рис. 258. Схема гальванометра с вращающейся катушкой: *NS* — постоянный магнит, *C* — свободно подвешенная катушка из многих витков тонкой изолированной проволоки.

§ 137. Силы Лорентца. В § 128 мы показали, что магнитное поле электрического тока следует рассматривать как поле, создаваемое движущимися зарядами. Эта важная мысль, высказанная Лорентцем¹⁾, была подтверждена опытами А. А. Эйхенвальда, Рентгена и других. Лорентцу же принадлежит и обратный вывод: силы, с которыми магнитное поле действует на проводник с током, являются силами, действующими на движущиеся заряды (электроны или ионы), которые и составляют ток. (Эти силы называют с и л а м и Л о р е н т ц а.) Но так как движущиеся заряды сталкиваются с атомами вещества, то силы, действующие со стороны магнитного поля на движущиеся заряды, увлекают и с а м ы й п р о в о д н и к, в котором эти заряды движутся, т. е. по которому проходит ток. Таким образом, силы взаимодействия между током и полем, рассмотренные в предыдущих параграфах, сводятся к силам Лорентца. Существование сил Лорентца проще всего проявляется в опытах по отклонению электронного луча в магнитном поле, которые рассмотрены в § 103. Эти опыты показывают, что сила Лорентца, действующая на электрон, движущийся в магнитном поле, перпендикулярна к направлению движения электрона и к направлению напряженности магнитного поля. Направление этой силы может быть определено по правилу левой руки (§ 134), только надо помнить, что направление движения электронов п р о т и в о п о л о ж н о направлению электрического тока, ибо электроны несут отрицательный заряд; поэтому пальцы левой руки, указывающие направление тока, должны располагаться н а в с т р е ч у движению электронов.

У п р а ж н е н и я. 137.1. Какие из катодных лучей сильнее отклоняются одним и тем же магнитным полем: более быстрые или более медленные? (Предполагаем, что поле очень протяженно, и мы можем рассматривать электроны, не вылетевшие за его пределы.)

137.2. Есть ли разница в отклонении одним и тем же магнитным полем ионов в ионизованном газе: а) положительных и отрицательных, б) заряженных однократно, двукратно и более, в) ионов с большим и малым молекулярным весом?

137.3. Пучок электронов, имеющих одинаковую скорость v , попадает в область однородного магнитного поля H и здесь искривляется под действием сил Лорентца. По какой кривой будет двигаться каждый электрон? Изменится ли при этом численная величина скорости, с которой дегались электроны?

137.4. В электроннолучевой трубке с магнитным управлением (применяемой иногда в телевизорах) пучок электронов, падающих на светя-

¹⁾ Генрик Антон Лорентц (1853—1928) — голландский физик.

щийся под их ударами экран, отклоняется от прямолинейного пути магнитным полем. Если пучок направлен горизонтально, а магнитное поле направлено сверху вниз, то как отклонится пучок электронов? Как отклонятся положительные и отрицательные газовые ионы, присутствующие в плохо откачанной трубке?

137.5. На рис. 182 (гл. VIII) показано, как смещается пятно на экране электроннолучевой трубки, если к ней подносить магнит. Проверьте правильность этого рисунка, пользуясь правилом левой руки.

В случае опытов с катодными лучами электроны движутся в вакууме и поэтому отклонение их магнитным полем является прямым и легко наблюдаемым результатом действия сил Лорентца. В случае же токов в проводниках (твердых, жидких и газообразных) силы Лорентца проявляются в действии на проводник, благодаря взаимодействию движущихся ионов и электронов с атомами и молекулами проводника. Существование такого взаимодействия — своего рода трения между заряженными и незаряженными частицами — нетрудно обнаружить и показать на ряде простых опытов.

На рис. 259 изображен сосуд, наполненный раствором какого-либо электролита; два электрода — кольцо A и стержень K — присоединены к полюсам батареи. Ток в электролите идет от A к K , т. е. ионы движутся вдоль радиусов сосуда. Поставим наш сосуд на один из полюсов магнита, например на северный, так что магнитное поле H , указанное вертикальной стрелкой, направлено кверху, перпендикулярно к направлению движения ионов. Силы Лорентца стремятся перемещать ионы в направлении горизонтальной стрелки по окружностям перпендикулярно к радиусам сосуда. Мы обнаружим, что в этом направлении начинает двигаться весь раствор, что указывается движением поплавка с флажком. Если изменить на обратное

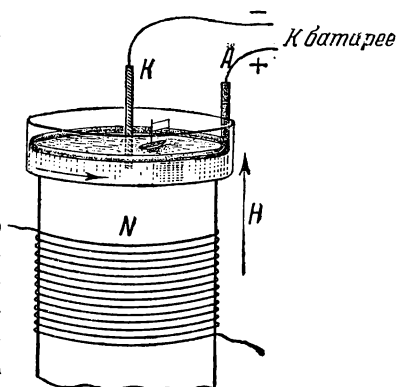


Рис. 259. Ионы, движущиеся по радиусам сосуда (положительные от A к K , отрицательные от K к A), отклоняются магнитным полем H и увлекают за собой частицы жидкости. Поплавок с флажком начинает двигаться по окружности.

направление тока в электролите или направление магнитного поля, то меняется и направление движения поплавка.

Чтобы понять смысл этого опыта, надо вспомнить, что ионы составляют лишь малую долю от общего количества молекул раствора. Только движущиеся ионы находятся непосредственно под действием сил Лорентца; вся же масса нейтральных молекул жидкости приходит в круговое движение благодаря столкновению ионов с молекулами.

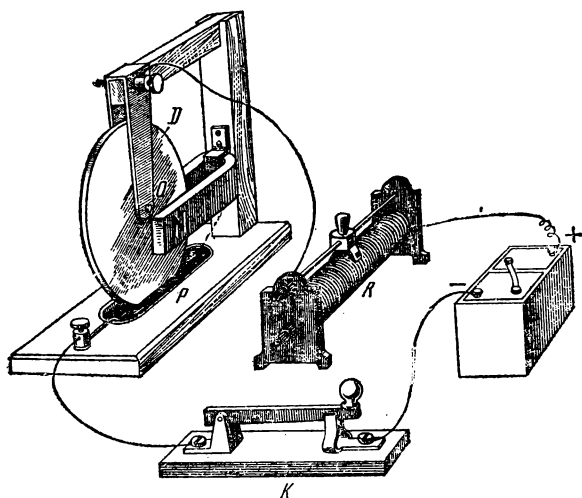


Рис. 260. Электроны, движущиеся по радиусам диска D , отклоняются магнитным полем подковообразного магнита и приводят диск во вращение. K — ключ, R — реостат.

Наш опыт доказывает, следовательно, не только существование сил, действующих на движущиеся ионы со стороны магнитного поля, но и существование сил трения между ионами и молекулами жидкости.

Аналогичный опыт, обнаруживающий «трение» между электронами и атомами металла, можно осуществить, налив в сосуд рис. 259 вместо электролита ртуть.

Рис. 260 изображает опыт, иллюстрирующий «трение» между электронами и атомами твердого металла. Между полюсами подковообразного магнита может вращаться медный диск D , кромка которого погружена в желобок со ртутью P , служащий для подводки тока от батареи к кром-

ке диска. Второй полюс батареи соединен с осью диска. Если замкнуть ключ K , то диск начинает в р а щ а т ь с я. При изменении направления тока или направления магнитного поля направление вращения меняется на обратное. Объяснение явления аналогично изложенному выше. При прохождении тока электроны движутся вдоль радиуса между точками O и P . Силы Лорентца стремятся отклонять их в перпендикулярном направлении. Вследствие «трения» между электронами и атомами металла весь диск приходит во вращение. Направление вращения можно установить без труда, пользуясь правилом левой руки.

Напомним, наконец, об опытах, выяснивших природу электрического тока в металлах (§ 86), в которых также было обнаружено взаимодействие между частицами металла и свободными электронами в нем. В известном смысле слова это опыт, обратный по отношению к описанным здесь. Там обнаружилось увлечение электронов при движении вещества в целом, здесь обнаруживается увлечение вещества при движении электронов. Но и здесь и там опыт показывает существование того «трения» между электронами и веществом, которое позволяет с помощью сил Лорентца объяснить действие магнитного поля на проводники с током.

У п р а ж н е н и е. 137.6. Определите, в каком направлении вращается диск на рис. 260.

Вся совокупность описанных опытов дает нам неопровержимое к а ч е с т в е н н о е подтверждение правильности точки зрения Лорентца. Но сам Лорентц пошел дальше. Тщательно изучив законы, определяющие силы, которые действуют на отдельные движущиеся заряженные частицы, он показал, что все силы, действующие в магнитном поле на проводники с током, могут быть не только качественно, но и к о л и ч е с т в е н н о объяснены как результат действия поля на отдельные частицы, движение которых в проводнике и есть электрический ток.

Учет лорентцевых сил приводит к чрезвычайно важным заключениям. Так, например, измеряя отклонение электронов в магнитном поле, происходящее под действием сил Лорентца, и отклонение их в электрическом поле, удалось определить чрезвычайно важную для характеристики электрона величину — отношение его электрического заряда e к массе m ¹⁾. Оказалось, что каким бы путем мы ни получали поток свободных электронов — испусканием из раскаленных тел (§ 90), или в результате фотоэффекта (§ 9), или при выбивании ударами ионов (§ 101), — получающиеся

¹⁾ Подробное описание таких опытов мы откладываем до III тома.

электроны всегда характеризуются одним и тем же значением отношения e/m . Таким образом, эти изменения доказывают, что при этих опытах выделяются частицы — электроны — одной и той же природы.

Численное значение отношения заряда к массе электрона по современным данным равно

$$\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^8 \text{ к/г.}$$

Можно измерить и заряд электрона и притом различными способами. Все они дают для величины заряда электрона значение

$$e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ к.}$$

Таким образом, масса электрона равна

$$m = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ г.}$$

Для того чтобы можно было более наглядно представить себе, как мала масса электрона, укажем, что она приблизительно во столько же раз меньше массы в 1 г, во сколько раз масса в 1 г меньше массы всего земного шара.

Интересно сопоставить найденное нами значение массы электрона с массой атома самого легкого вещества — водорода. В одной грамм-молекуле водорода, т. е. в 2,016 грамма его, содержится $6,02 \cdot 10^{23}$ молекул (число Авогадро). Следовательно, молекула водорода имеет массу

$$\frac{2,016}{6,02 \cdot 10^{23}} = 3,35 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$

Но молекула водорода H_2 состоит из двух атомов его. Поэтому масса атома водорода в два раза меньше, т. е. равна $1,67 \cdot 10^{-24}$ г. Мы видим, таким образом, что масса электрона приблизительно в 2000 раз (точнее, в 1835 раз) меньше массы атома самого легкого вещества — водорода

§ 138. Силы Лорентца и полярные сияния. Силы Лорентца, вызывающие отклонения электронов, движущихся в магнитных полях, от их первоначального пути, проявляются в очень многих явлениях природы, которые только с помощью этих сил и удастся объяснить. Одно из самых красивых и величественных явлений такого рода — это так называемые «полярные сияния». В местах земного шара, расположенных в сравнительно высоких широтах, преимущественно за северным или южным полярным кругом, во время долгой полярной ночи часто наблюдают на небе явление поразительной красоты: на небе вдруг вспыхивает свечение разнообразной окраски и формы. Иногда оно имеет

вид однородной дуги, неподвижной или пульсирующей, иногда как бы состоит из множества лучей разной длины, которые переливаются, свиваются в виде лент или драпировок и т. п. (рис. 261). Цвет этого свечения желтовато-зеленый, красный, серо-фиолетовый. Вот в каких словах описывал это прекрасное явление природы великий русский ученый, мыслитель и поэт М. В. Ломоносов, который был одним из первых исследователей этого явления и оставил нам ряд превосходных зарисовок его:

«Но где ж, натура, твой закон?
С полночных стран грядет заря!
Не Солнце ль ставит там свой трон?
Не льдисты ль мещут огонь моря?
Се холодный пламень нас покрыл!
Се в ночь на Землю день вступил!»

Долгое время природа и происхождение полярных сияний оставались совершенно загадочными, и только сравнительно недавно удалось подойти к решению этой загадки.

Прежде всего удалось установить, на какой высоте вспыхивают полярные сияния. Для этого фотографировали одно и то же сияние из двух точек, отстоящих одна от другой на несколько десятков километров.



Рис. 261. Полярное сияние (одна из его форм).

По этим photographиям удалось выяснить, что полярные сияния возникают на высоте от 80 до 1000 км над землей, чаще всего на высоте около 100 км.

Дальше было выяснено, что полярные сияния представляют собой свечение разреженных газов земной атмосферы, до известной степени сходное с тем свечением, которое наблюдается в разрядных трубках (§ 100).

Наконец, была подмечена очень интересная связь между полярными сияниями и рядом других явлений. Полярные сияния не всегда происходят одинаково часто. В одни годы их бывает меньше, в другие больше.

Многолетние наблюдения показали, что периоды максимальной частоты полярных сияний регулярно повторяются через промежутки в 11,5 года. В течение каждого такого промежутка число полярных сияний сначала от года к году убывает, а затем начинает возрастать, чтобы через 11,5 года снова достичь максимума.

При наблюдении поверхности Солнца уже давно были замечены на его диске неправильной формы темные пятна, часто меняющие свою форму и положение на солнечном диске. Оказалось, что число и общая площадь этих пятен меняются от года к году не случайно, а периодически, с тем же периодом в 11,5 года. При этом в годы максимума солнечных пятен или, как говорят, в годы максимальной солнечной активности, достигает максимума и число полярных сияний, а по мере уменьшения числа пятен ослабевают и полярные сияния. Такой же ход имеет и число магнитных бурь (§ 132), которое также достигает максимума в годы наибольшей солнечной активности. В самые последние годы удалось с несомненностью установить такого же характера связь между солнечной активностью (числом пятен) и условиями распространения радиоволн в верхних слоях атмосферы. Вопрос приобрел, таким образом, помимо чисто научного интереса, также и важное практическое значение.

Сопоставляя эти факты, норвежский ученый Биркеланд высказал предположение, что пятна на Солнце являются теми местами, откуда с огромной скоростью выбрасываются в окружающее пространство потоки заряженных частиц — электронов. Попадая в верхние слои нашей атмосферы, они заставляют светиться составляющие ее газы, подобно тому, как они светятся под влиянием ударов электронов в разрядной трубке. Эти же электроны оказывают влияние на магнитное поле Земли и на условия распространения радиоволн вблизи земной поверхности.

Но если это так, то почему полярные сияния наблюдаются только в высоких широтах, т. е. в местностях, не очень удаленных от земных полюсов? Ведь солнечные лучи освещают всю Землю. На этот вопрос ответил другой норвежец, Штермер. Заряженные частицы, испускаемые Солнцем, подходя к Земле, попадают в земное магнитное поле. Здесь на них действуют силы Лорентца, отклоняющие их от первоначального прямого пути. Штермер произвел сложные математические вычисления и рассчитал пути этих электронов в магнитном поле Земли. Он показал, что, действительно, заряженные частицы, отклоняемые земным магнитным полем, могут попадать только в приполярные области земного шара.

Эта теория, основанная на учете действия сил Лорентца, отклоняющих заряженные частицы, которые движутся в магнитном поле Земли, хорошо согласуется с большим числом известных из опыта фактов и является в настоящее время общепринятой, хотя в самое последнее время и выяснился ряд трудностей в количественном объяснении всей совокупности явлений с этой точки зрения.

ГЛАВА XV

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 139. Условия возникновения индуцированного тока. Напомним некоторые простейшие опыты, в которых наблюдается возникновение электрического тока в результате электромагнитной индукции.

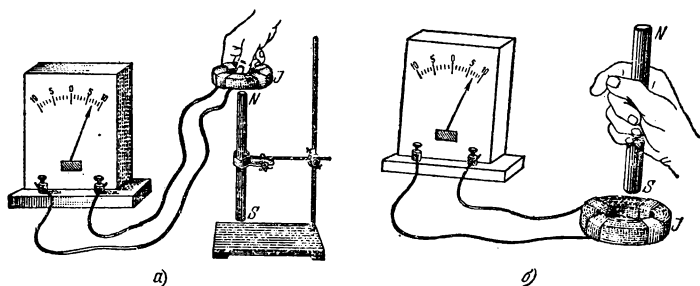


Рис. 262. При относительном перемещении катушки и магнита в катушке возникает индуцированный ток. а) Катушка J надевается на магнит NS ; б) магнит NS вдвигается в катушку J .

Один из таких опытов изображен на рис. 262, а и б. Если катушку J , состоящую из большого числа витков проволоки, быстро надевать на магнит NS или сдергивать с него (рис. 262, а), то в ней возникает кратковременный индуцированный ток, который можно обнаружить по отбросу стрелки гальванометра, соединенного с концами катушки. То же имеет место, если магнит быстро вдвигать в катушку или выдергивать из нее (рис. 262, б). Значение имеет, очевидно, только относительное движение катушки

и магнитного поля. Ток прекращается, когда прекращается это движение.

Рассмотрим теперь несколько дополнительных опытов, которые позволят нам в более общем виде сформулировать условия возникновения индуцированного тока.

Первая серия опытов: изменение напряженности магнитного поля, в котором находится индукционный контур (рамка).

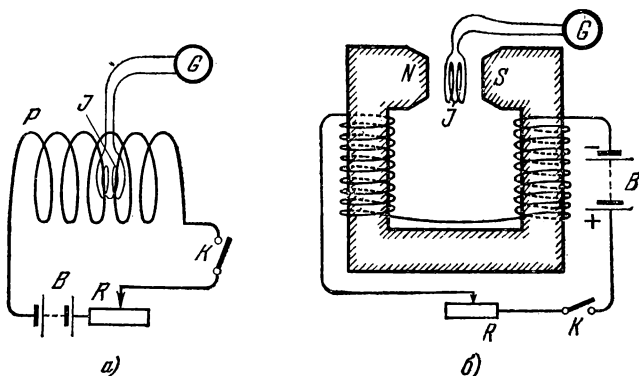


Рис. 263. В катушке возникает индуцированный ток при всяком изменении напряженности магнитного поля, если катушка стоит перпендикулярно к линиям магнитного поля. а) Катушка J в поле соленоида P . Напряженность поля изменяется при замыкании и размыкании ключа K или при изменении сопротивления R в цепи. G — гальванометр; B — батарея. б) Катушка J в поле электромагнита NS . Напряженность поля изменяется при замыкании и размыкании ключа K или при изменении величины тока в обмотке электромагнита при помощи реостата R .

Рамка J помещена в магнитное поле, например внутри соленоида P (рис. 263, а) или между полюсами электромагнита (рис. 263, б). Установим рамку J так, чтобы плоскость ее витков была перпендикулярна к линиям магнитного поля соленоида или электромагнита. Будем изменять напряженность магнитного поля, быстро меняя величину тока в обмотке (с помощью реостата R) или просто выключая и включая ток (ключом K). При каждом изменении магнитного поля стрелка гальванометра дает резкий отброс; это указывает на возникновение в цепи катушки J индуцированного электрического тока. При усилении (или возникновении) магнитного поля возникнет ток одного на-

правления, при его ослаблении (или исчезновении) — обратного. Прделаем теперь тот же опыт, установив рамку J так, чтобы плоскость ее витков была строго п а р а л л е л ь н а¹⁾ направлению напряженности поля (рис. 264). Опыт даст о т р и ц а т е л ь н ы й результат: как бы мы ни изменяли напряженность магнитного поля, мы не о б н а р у ж и м в цепи катушки J индуцированного тока.

Вторая серия опытов: изменение положения контура, находящегося в неизменном магнитном поле.

Поместим в н у т р ь соленоида, где магнитное поле однородно, наш контур (рамку) и будем быстро поворачивать его на некоторый угол около оси, перпендикулярной к направлению поля (рис. 265). При всяком таком повороте гальванометр, соединенный с рамкой, обнаруживает индуцированный ток, направление которого зависит от начального положения рамки и от направления вращения. При полном обороте рамки на 360° направление индуцированного тока меняется д в а ж д ы: всякий раз, когда рамка проходит положение, при котором плоскость ее перпендикулярна к направлению магнитного поля. Конечно, если вращать рамку очень быстро, то индуцированный ток будет так часто менять свое направление, что стрелка обычного гальванометра не будет успевать следовать за этими переменами и понадобится иной, более «послушный» прибор.

Если, однако, перемещать нашу рамку так, чтобы она не поворачивалась относительно направления поля, а лишь перемещалась п а р а л л е л ь н о с а м о й с е б е в любом направлении вдоль поля, поперек его или под каким-либо углом к направлению поля, то индуцированный ток возникать н е б у д е т. Подчеркиваем еще раз:

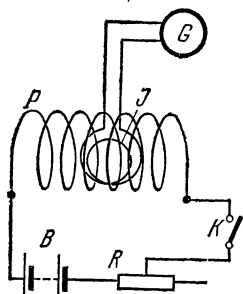


Рис. 264. Индуцированный ток не возникает, если плоскость витков катушки п а р а л л е л ь н а линиям магнитного поля. Катушка J помещена в поле соленоида P ; G — гальванометр; B — батарея; K — ключ; R — реостат.

¹⁾ Очевидно, такой опыт может удался только в том случае, если магнитное поле на всем протяжении рамки имеет о д н о и т о ж е направление. Он сравнительно легко удаётся в поле большого соленоида, которое однородно.

опыт перемещения рамки предполагается в однородном поле (например, внутри длинного соленоида или в магнитном поле Земли). Если поле неоднородно (например, вблизи полюса магнита или электромагнита), то всякое перемещение рамки может сопровождаться появлением индуцированного тока, за исключением одного случая: индуцированный ток не возникает, если рамка движется так, что плоскость ее все время остается

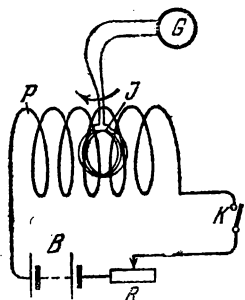


Рис. 265. При вращении катушки в магнитном поле в ней возникает индуцированный ток. J — катушка в поле соленоида P ; B — батарея; G — гальванометр; R — реостат; K — ключ.

параллельной направлению поля (т. е. сквозь рамку не проходят силовые линии магнитного поля).

Третья серия опытов: изменение площади контура, находящегося в неизменном магнитном поле.

Подобный опыт можно осуществить по следующей схеме (рис. 266). В магнитном поле, например, между полюсами большого электромагнита поместим контур, сделанный из гибкого провода. Пусть первоначально контур имел примерно круговую форму (рис. 266, а). Быстрым движением руки можно стянуть контур в узкую петлю, значительно уменьшив таким образом охватываемую им площадь (рис. 266, б). Гальванометр

покажет при этом возникновение индуцированного тока.

Еще удобнее осуществление опыта с изменением площади контура по схеме, изображенной на рис. 267. В магнитном поле расположен контур $ABCD$, одна из сторон которого (BC на рис. 267) сделана подвижной. При каждом ее передвижении гальванометр G обнаруживает возникновение в контуре индуцированного тока. При этом при передвижении BC влево (увеличение площади $ABCD$) индуцированный ток имеет одно направление, а при передвижении BC вправо (уменьшение площади $ABCD$) — противоположное. Однако и в этом случае изменение площади контура не дает никакого индуцированного тока, если плоскость контура параллельна направлению магнитного поля.

Сопоставляя все описанные разнообразные опыты, мы можем теперь сформулировать условия возникновения ин-

дуцированного тока в весьма общей форме. Во всех рассмотренных случаях мы имели контур, помещенный в магнитное поле, причем плоскость контура могла составлять тот или иной угол с направлением напряженности поля. Обозначим площадь, ограниченную контуром, через S , напряженность магнитного поля через H , а угол между направлением напряженности поля и плоскостью контура через φ . В таком случае составляющая напряженности поля,

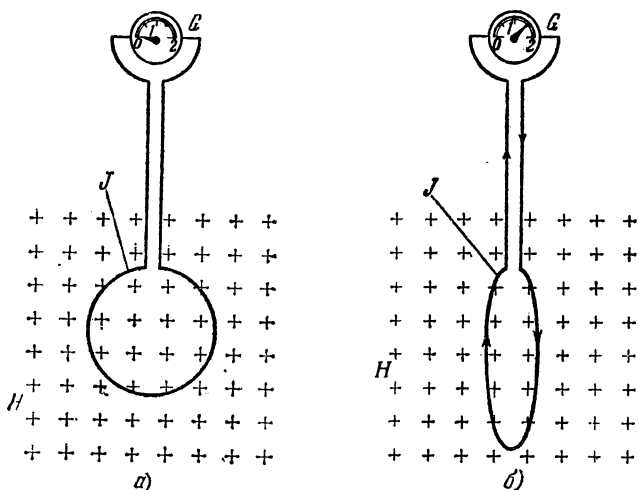


Рис. 266. В катушке возникает индуцированный ток, если меняется площадь ее контура, находящегося в неизменном магнитном поле и расположенного перпендикулярно к линиям магнитного поля. J — катушка; H — магнитное поле (направленное от наблюдателя за плоскость чертежа); G — гальванометр. При изменении площади контура в гальванометре возникает ток.

перпендикулярная к плоскости контура, которую мы обозначим через H_{\perp} , будет равна (рис. 268):

$$H_{\perp} = H \cdot \sin \varphi.$$

Произведение $H_{\perp} \cdot S$ мы будем называть потоком магнитной индукции¹⁾ или, короче, магнит-

¹⁾ Мы указывали уже (§§ 17 и 123), что картину силовых линий магнитного поля, как и поля электрического, можно чертить так, чтобы число линий, приходящееся на 1 см^2 площади нашего контура, было равно численному значению составляющей поля, перпендикулярной к

ным потоком через наш контур; эту величину мы будем обозначать буквой Φ . Таким образом,

$$\Phi = H_{\perp} \cdot S = H \cdot S \cdot \sin \varphi. \quad (15,1)$$

Во всех без исключения рассмотренных нами случаях мы тем или иным способом меняли величину магнитного потока Φ . В одних случаях мы осуществляли это путем изменения величины H (рис. 263); в

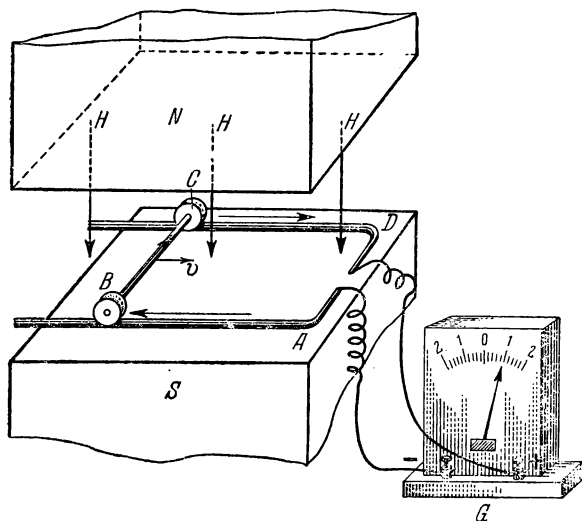


Рис. 267. При движении BC и изменении вследствие этого площади контура $ABCD$, находящегося в магнитном поле H , в контуре возникает ток, отмечаемый гальванометром G .

других случаях — менялся угол φ (рис. 265); в третьих — площадь S (рис. 266). В общем случае, конечно, возможно одновременное изменение в с е х этих величин, определяющих магнитный поток через индукционный контур. Вни-

площади контура. Таким образом, магнитный поток через контур можно наглядно представлять себе как полное число силовых линий, проходящих через площадь нашего контура. Отсюда и происходит слово «поток». Полное же название «поток магнитной индукции» подчеркивает, что речь идет о величине, имеющей существенное значение для явления индукции.

мательное рассмотрение самых разнообразных индукционных опытов показывает, что индуцированный ток возникает тогда и только тогда, когда меняется магнитный поток Φ ; ток индукции никогда не возникает, если магнитный поток Φ через данный контур остается неизменным. Итак:

При всяком изменении магнитного потока через проводящий контур в этом контуре возникает электрический ток.

В этом и заключается один из важнейших законов природы — закон электромагнитной индукции, открытый Фарадеем в 1831 г.

Упражнения. 139.1. На рис. 269 показан следующий опыт. Катушки P и J находятся одна внутри другой. В цепь первой включена батарея, в цепь второй — гальванометр. Если в первую катушку вдвигать или выдвигать из нее железный стержень, то гальванометр обнаружит возникновение во второй катушке индуцированного тока. Объясните этот опыт.

139.2. Проволочная рамка вращается в однородном магнитном поле вокруг оси, параллельной напряженности поля. Будет ли в ней возникать индуцированный ток?

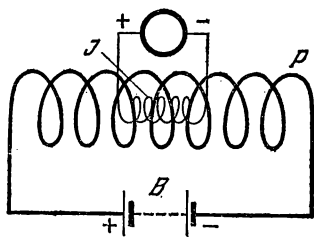


Рис. 269. К упражнению 139.1.

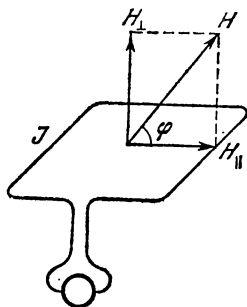


Рис. 268. Разложение напряженности магнитного поля H на составляющую H_{\perp} , перпендикулярную к плоскости индукционного контура, и составляющую H_{\parallel} , параллельную этой плоскости.

139.3. Возникает ли индуцированная э. д. с. на концах стальной оси автомобиля при его движении? При каком направлении движения автомобиля эта э. д. с. наибольшая и при каком наименьшая? Зависит ли величина ее от скорости автомобиля?

139.4. Шасси автомобиля вместе с двумя осями составляет замкнутый проводящий контур. Индуцируется ли в нем ток при движении автомобиля? Как согласовать ответ этой задачи с результатами задачи 139.3?

139.5. Почему при ударе молнии иногда в нескольких метрах от места

удара обнаруживались повреждения чувствительных электроизмерительных приборов, а также плавилась предохранители в осветительной сети?

§ 140. Направление индуцированного тока. Правило Ленца. В опытах, описанных в предыдущем параграфе,

мы видели, что в различных случаях направление индуцированного тока может быть различно: отброс гальванометра в наших опытах происходил иногда в одну сторону, иногда — в другую. Теперь мы постараемся найти общее правило, которым определяется направление индуцированного тока.

Для этого проследим внимательно за направлением тока в каком-нибудь индукционном опыте, например, в опыте, изображенном на рис. 263, а. Для ясности этот опыт еще раз показан схематически на рис. 270, причем каждая из

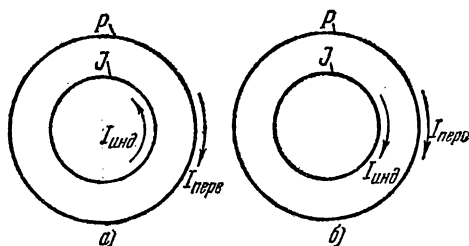


Рис. 270. Связь между направлением первичного тока, создающего магнитное поле, и направлением индуцированного тока: а) при усилении магнитного поля; б) при ослаблении магнитного поля. P — катушка с первичным током $I_{перв}$; J — катушка с индуцированным током $I_{инд}$.

катушек P и J изображена в виде одного витка, а стрелки $I_{перв}$ и $I_{инд}$ указывают соответственно направление первичного тока в катушке P и направление индуцированного тока в катушке J .

Рис. 270, а относится к случаю, когда ток $I_{перв}$ усиливается, а рис. 270, б — к случаю, когда он ослабляется. Мы видим, что в первом случае, т. е. при усилении магнитного поля, и следовательно, при увеличении магнитного потока токи в катушках P и J имеют противоположное направление; напротив, в случае, когда индукция происходит вследствие ослабления магнитного поля, т. е. при уменьшении магнитного потока, оба тока $I_{перв}$ и $I_{инд}$ имеют одинаковое направление. Иначе можно сказать, что когда причиной индукции является усиление магнитного потока, понижающего площадь индукционного контура, то возника-

ющий индуцированный ток направлен так, что он о с л а б л я е т первоначальный магнитный поток. Напротив, когда индукция происходит вследствие ослабления магнитного потока, магнитное поле индуцированного тока внутри катушки P усиливает первоначальный магнитный поток.

Полученный нами результат мы можем сформулировать в виде такого общего правила:

Индукцированный ток всегда имеет такое направление, при котором его магнитное поле уменьшает (компенсирует) изменение магнитного потока, являющееся причиной возникновения этого тока.

Это общее правило соблюдается во всех без исключения случаях индукции. Рассмотрев все опыты, изображенные в тексте и приведенные в упражнениях, легко убедиться в общности и удобстве этого правила.

Рассмотрим, в частности, случай, когда индукция вызывается перемещением контура или части его относительно магнитного поля. Такой опыт изображен, например, на рис. 262, *а* и 262, *б*. На схеме (рис. 271) кружок J изображает катушку (соленоид), причем стрелки на витках указывают направление тока, индуцируемого в катушке при ее приближении к северному полюсу магнита N (рис. 271, *а*), или при ее удалении от этого полюса (рис. 271, *б*). Пользуясь правилом буравчика (§125), легко определить направление магнитного поля индуцированного тока и убедиться, что оно соответствует сформулированному выше правилу.

Обратим теперь внимание на такой факт. Когда в катушке возникает индуцированный ток, то она становится эквивалентной магниту, положение северного и южного полюсов которого можно определить по правилу буравчика. На рис. 271 показано, что в случае *а*) на верхнем конце катушки возникает северный полюс, а в случае *б*) — южный

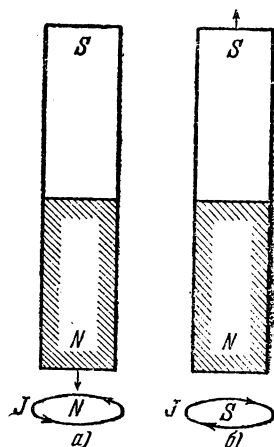


Рис. 271. Направление индуцированных токов, возникающих в контуре: *а*) при приближении к нему магнита и *б*) при удалении от него магнита.

полюс. Из этого рисунка мы видим, таким образом, что когда мы приближаем к индукционной катушке, скажем, северный полюс магнита N , то на ближайшем к нему конце катушки возникает также северный полюс, а когда мы удаляем от катушки северный полюс магнита N , то на ближайшем конце катушки возникает южный полюс. Но, как мы знаем, магниты, обращенные друг к другу одноименными полюсами, отталкиваются,

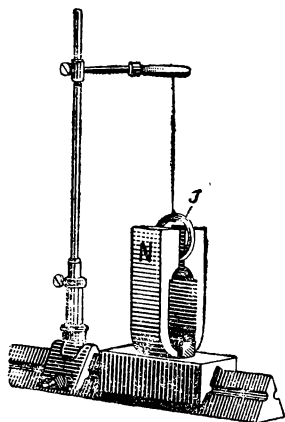


Рис. 272. Индукционная катушка J в форме кольца подвешена, как маятник, между полюсами магнита. Магнит можно передвигать по рельсу. Если магнит отодвигать от кольца, то кольцо следует за ним. Напротив, если магнит придвигать к кольцу, то оно уходит от магнита.

а разноименными, — притягиваются. Поэтому, когда индукция происходит вследствие приближения магнита к катушке, то силы взаимодействия между магнитом и индуцированным током отталкивают магнит от катушки, а когда индукция происходит при удалении магнита от катушки, то они притягиваются друг к другу. Таким образом, для случаев, когда индукция происходит вследствие движения магнита или всего индукционного контура в целом, мы можем установить следующее общее правило, по существу равносильное правилу, сформулированному выше, но для этих случаев более удобное:

Индукцированный ток всегда имеет такое направление, что взаимодействие его с первичным магнитным полем противодействует тому движению, вследствие которого происходит индукция.

Это правило носит название **правила (или закона) Ленца**¹⁾.

Правило Ленца стоит в тесной связи с законом сохранения энергии. В самом деле, представим себе, например, что при приближении северного полюса магнита N к соленоиду J ток в нем имел бы направление, противоположное тому, какого требует правило Ленца, т. е. что на

¹⁾ Иногда законом Ленца называют и более общее правило, определяющее направление индуцированных токов, установленное в этом же параграфе несколько раньше.

ближайшем к магниту конце соленоида возникал бы не северный, а южный полюс. В этом случае между соленоидом и магнитом возникли бы не силы отталкивания, а силы притяжения. Магнит продолжал бы самопроизвольно и со все большей скоростью приближаться к соленоиду, создавая в нем все большие индуцированные токи и тем самым все более увеличивая силу, притягивающую его к соленоиду. Таким образом, без всякой затраты внешней работы мы получили бы, с одной стороны, непрерывное ускоренное движение магнита к соленоиду, а, с другой, все более возрастающий ток в соленоиде, способный производить работу. Ясно, что это невозможно и что индуцированный ток не может иметь другого направления, чем то, которое указывается правилом Ленца. В том же можно убедиться, рассматривая и другие случаи индукции.

На рис. 272 показан очень простой и наглядный опыт, иллюстрирующий правило Ленца. Алюминиевое кольцо J , служащее «индукционной катушкой», подвешено вблизи полюсов сильного магнита или электромагнита, который можно передвигать. Отодвигая магнит от кольца, увидим, что кольцо следует за ним. Напротив, придвигая магнит к кольцу, обнаружим, что кольцо уходит от магнита. В обоих случаях при движении магнита меняется магнитный поток сквозь кольцо, и в кольце возникает индуцированный ток. По правилу Ленца этот ток направлен так, что взаимодействие его с перемещающимся магнитом тормозит движение магнита; согласно третьему закону Ньютона (т. I, «Механика») силы противодействия приложены к кольцу и вызывают перемещения его.

На рис. 273 изображен аналогичный опыт, в котором прямолинейное движение заменено вращением. При поворачивании магнита NS поле, оставаясь постоянным по величине, поворачивается вместе с ним. Вследствие этого магнитный поток через кольцо J все время меняется и в кольце индуцируется ток. Применяя правило Ленца и принимая во внимание третий закон Ньютона, мы легко поймем, что кольцо, помещенное во вращающееся магнитное поле, приходит во вращение в ту же сторону, в какую вращается поле.

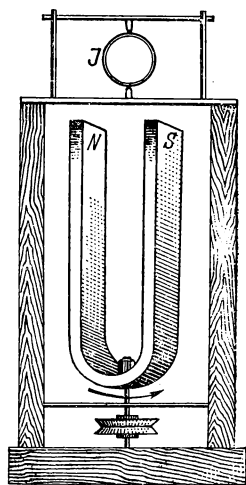


Рис. 273. Вращение магнита NS создает вращающееся магнитное поле, которое приводит во вращение кольцо J .

На этот опыт нужно обратить особое внимание, так как он облегчает понимание устройства одного из наиболее распространенных типов электрических моторов.

У п р а ж н е н и я . 140.1. Рядом расположены два длинных провода 1 и 2 (рис. 274); по одному из них идет ток от источника B , второй соединен с гальванометром. Если каким-нибудь способом, например, с помощью реостата R изменить величину тока в первом проводе, то гальванометр обнаружит возникновение во втором проводе индуцированного тока. Объясните этот опыт. Как проходят в этом случае силовые линии магнитного поля и где находится индукционный контур? Как направ-

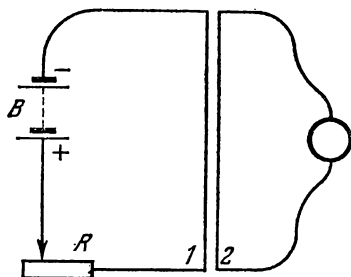


Рис. 274. К упражнению 140.1.

лен индукционный ток при усилении и при ослаблении первичного тока?

140.2. Для индукционного опыта, изображенного на рис. 267, определите, пользуясь правилом Ленца и «правилом левой руки», направление индуцированного тока, предполагая, что магнитное поле направлено снизу вверх, а проводник движется слева направо. Как изменится направление индуцированного тока, если изменить на обратное: а) направление магнит-

ного поля; б) направление движения проводника? Для направления тока в проводнике BC сформулируйте аналогичное «правило правой руки».

140.3. Производится индукционный опыт, изображенный на рис. 269. Знаки полюсов батареи B указаны на рисунке. Определите направление тока в катушке J при выдвижении железного сердечника и при выдвигании его из катушки P .

§ 141. Электродвижущая сила индукции. Основной закон электромагнитной индукции гласит, что индуцированный ток возникает в проводящем контуре при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего площадь, охваченную этим контуром. Однако, производя совершенно одинаковое изменение магнитного потока в различных контурах, отличающихся только материалом, из которого сделаны эти контуры, мы обнаружим, что в них индуцируются токи разл и ч н о й величины. Изготовим, например, две катушки, совершенно одинаковые по величине, форме и числу витков, одну из медной проволоки, а другую из нихромовой проволоки того же сечения и длины, и поместим их в одно и то же магнитное поле, например, внутрь длинного соленоида, одинаково ориентируя катушки по отношению к направлению поля. Выключая

магнитное поле, мы обнаружим в обеих катушках индуцированные токи, но ток в медной катушке будет в 70 раз больше, чем ток в нихромовой. Разнообразя опыты подобного рода, мы убедимся, что *индуцированный ток тем больше, чем меньше электрическое сопротивление катушки, если все остальные условия опыта вполне одинаковы*¹⁾.

Это обстоятельство приводит к мысли, что при неизменных условиях опыта в нашей катушке индуцируется определенная *э л е к т р о д в и ж у щ а я с и л а*, а величина тока, получающаяся благодаря этому, определяется законом Ома и поэтому оказывается обратно пропорциональной величине электрического сопротивления цепи.

Действительно, нетрудно осуществить простой опыт, показывающий, что для индуцированных токов закон Ома сохраняет силу. Присоединим концы катушки, в которой индуцируется ток, к какой-нибудь цепи, сопротивление которой можно изменять, и выполним соответствующие измерения. Включим, например, катушку *P*

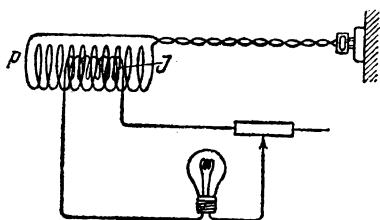


Рис. 275. При увеличении сопротивления индукционного контура (включение реостата) индуцированный ток уменьшается (лампочка горит менее ярко). *J* — индукционная катушка; *P* — соленоид, включенный в сеть переменного тока.

(рис. 275) в сеть городского переменного тока, который, как известно, 100 раз в секунду меняет свое направление и, следовательно, 100 раз в секунду уменьшается до нуля и вновь достигает максимального значения. Так как ток в катушке *P*, а значит, и его магнитное поле непрерывно изменяются, то в катушке *J* будет все время индуцироваться э. д. с., направление и величина которой также будут меняться. В цепь индукционной катушки *J* включим в качестве индикатора тока лампочку накаливания и последовательно с ней реостат. Ток индукции, переменный по величине и направлению, проходя через нить лампочки, будет ее нагревать и может довести до яркого накала. Не меняя ни наших катушек,

¹⁾ Предполагается, что при измерениях величины тока мы можем пренебречь сопротивлением измерительного прибора по сравнению с сопротивлением катушки.

ни их взаимного расположения, увеличим сопротивление индукционной цепи в 2—3 раза, передвигая движок реостата. Мы увидим, что лампочка будет светиться значительно более слабо, красноватым накалом, что указывает на уменьшение тока, идущего через нее.

Заменяв лампочку тепловым амперметром (§ 44), мы можем измерить величину индуцированного тока; измеряя, кроме того, полное сопротивление всей цепи, мы убедимся в том, что и для индуцированных токов сохраняет силу закон Ома (§ 46):

$$I = \frac{U}{R},$$

где I — величина тока, R — полное сопротивление цепи, т. е. сумма сопротивления индукционной катушки и сопротивления остальных частей цепи (реостата, лампочки, амперметра и т. д.), а через U обозначена величина электродвижущей силы индукции, остающаяся неизменной при изменении сопротивления цепи в наших опытах.

С понятием электродвижущей силы, т. е. силы, вызывающей разделение заряженных частиц (электронов и ионов), мы встречались уже раньше при рассмотрении вопроса об условиях возникновения и поддержания электрического тока в цепи (§ 39). Существенное различие между случаями, рассмотренными ранее (гл. VI), и электродвижущей силой индукции заключается в следующем. В случае гальванического элемента, аккумулятора или термоэлемента мы могли установить, что электродвижущая сила возникает в определенных местах цепи тока, именно в пограничном слое между металлом и электролитом или в месте контакта двух различных металлов. В случае же индукции электродвижущая сила не сосредоточена в том или ином участке цепи, но развивается во всей индукционной цепи в целом, т. е. во всех точках цепи, где меняется поток магнитной индукции.

В случае витка, охватывающего линии поля, э. д. с. возникает во всех точках витка и может быть подсчитана для витка в целом. В случае нескольких витков то же происходит в каждом из них: э. д. с. катушки складывается из э. д. с. отдельных витков.

§ 142. Количественный закон электромагнитной индукции. Итак, мы установили, что в процессе индукции возбуж-

дается электродвижущая сила индукции, благодаря чему в проводниках возникает ток, величина которого определяется по закону Ома через величину э. д. с. индукции и сопротивление цепи. Чем же определяется величина э. д. с. индукции?

Если присмотреться ко всем индукционным опытам (§ 138), то легко обнаружить, что величина индуцированного тока в контуре, а следовательно, и величина э. д. с. индукции, оказывается различной в зависимости от того, быстро или медленно мы производим изменение магнитного потока, являющееся необходимым условием возникновения индукции. Чем медленнее происходит процесс изменения магнитного потока, тем меньше э. д. с. индукции и тем меньше индуцированный ток при заданном сопротивлении цепи. Таким образом, осуществляя определенное изменение магнитного потока за различное время, мы получаем различную э. д. с. индукции. Если в момент t_1 магнитный поток имел значение Φ_1 , а к моменту t_2 его значение стало Φ_2 , то за время $\Delta t = t_2 - t_1$ произошло изменение магнитного потока на величину $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$. Отношение $\Delta\Phi/\Delta t$, показывающее изменение магнитного потока за единицу времени, называется скоростью изменения магнитного потока. Измерения, выполняемые при различных условиях опыта (в любом контуре, при любом изменении значения магнитного потока и т. д.), показывают, что э. д. с. индукции зависит только от скорости изменения магнитного потока, а именно:

Электродвижущая сила индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока сквозь индукционный контур:

$$U = k \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad (15,2)$$

причем, как всегда, численное значение коэффициента пропорциональности k зависит от выбора единиц, в которых производятся измерения всех входящих в нашу формулу величин.

Само собой разумеется, что если величина магнитного потока меняется с течением времени не равномерно, то отношение $\Delta\Phi/\Delta t$ дает нам среднюю скорость изменения магнитного потока, аналогичную средней скорости движения (т. I, «Механика»), и в соответствии с этим формула (15,2) дает возможность вычислить среднюю электродвижущую силу индукции.

т р о д в и ж у щ у ю с и л у и н д у к ц и и. Для определения мгновенного значения электродвижущей силы индукции в каждый момент времени нужно — так же, как при определении скорости неравномерного движения, — рассматривать изменение магнитного потока $\Delta\Phi$ за столь малый промежуток времени Δt , чтобы в течение этого промежутка можно было при наших способах измерения считать изменение магнитного потока равномерным. В таких случаях отношение $\Delta\Phi/\Delta t$ будет характеризовать скорость изменения магнитного потока для данного момента, а вычисленное на основании формулы (15,2) значение $\Delta\Phi/\Delta t$ будет значением электродвижущей силы индукции для этого момента. Все эти рассуждения в точности повторяют рассуждения, относящиеся к определению мгновенной и средней скорости в механике.

Что касается коэффициента k в формуле (15,2), то численное его значение, как указывалось, зависит от выбора единиц измерения и должно быть определено из опыта. Если мы будем, как обычно, измерять электродвижущую силу в вольтах, напряженность магнитного поля в эрстедах и площадь в квадратных сантиметрах, то множитель k имеет численное значение, равное одной стомиллионной (10^{-8}). Итак,

$$U = 10^{-8} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (15,3)$$

(где U — в вольтах, Φ — в эрстедах·см², t — в секундах).

В наших рассуждениях мы предполагали, что имеем дело с контуром, состоящим только из одного витка, т. е. с контуром, который один раз охватывает линии поля. В общем случае, когда индукционная катушка имеет n одинаковых витков, каждый из которых испытывает изменение потока $\Delta\Phi$, электродвижущая сила индукции, очевидно в n раз больше, потому что витки катушки соединены друг с другом последовательно и электродвижущие силы, возникающие в каждом из витков, складываются.

Таким образом, электродвижущая сила индукции, возникающая в катушке из n витков, пропорциональна числу витков катушки и скорости изменения магнитного потока сквозь каждый виток катушки:

$$U = k \cdot n \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (15,4)$$

В случае, если витки неодинаковы, так что изменение магнитного потока через отдельные витки равно $\Delta\Phi_1, \Delta\Phi_2, \Delta\Phi_3$ и т. д., то очевидно, что $\Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 + \Delta\Phi_3 + \dots$ есть полное изменение потока, пронизывающего все витки катушки, т. е. изменение потока через катушку в целом. Э. д. с. такой катушки равна

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots = k \cdot \left(\frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t} + \frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t} + \frac{\Delta\Phi_3}{\Delta t} + \dots \right) = k \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

где $\Delta\Phi = \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 + \Delta\Phi_3 + \dots$

Формулы (15,3) и (15,4) дают численную величину э. д. с. индукции. Что же касается направления э. д. с. индукции (направления индуцированного тока), то оно определяется правилом Ленца (§ 139).

Соотношение $U = k \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ или равносильное ему $\Delta\Phi = \frac{1}{k} U \Delta t$ используются в системе СИ для установления единицы магнитного потока Φ . Полагая $k=1$, $U=1$ в, $\Delta t=1$ сек, мы получаем $\Delta\Phi=1$. Эта единица называется вольт-секунда или вебер¹⁾ (вб) и определяется, следовательно, так: *один вебер есть магнитный поток, при убывании которого в течение одной секунды до нуля в индукционном контуре возникает э. д. с. индукции, равная одному вольту*. Сопоставляя это определение с формулой (15,3), трудно установить, что

$$1 \text{ вб} = 10^8 \text{ э. см}^2 = 10^4 \text{ э. м}^2.$$

У п р а ж н е н и я. 142.1. На рис. 276 изображен так называемый «земной индуктор». Это катушка из большого числа витков проволоки, которая может быть приведена в быстрое вращение вокруг оси KK , совпадающей с ее вертикальным диаметром. При вращении этой катушки в магнитном поле Земли в ней возникает индуцированный электрический ток. Разберите следующие три случая: а) индуктор вращается около вертикальной оси KK , б) ось вращения горизонтальна и направлена по магнитному меридиану (с севера на юг), в) ось вращения

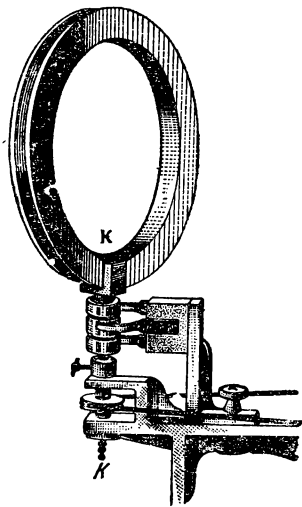


Рис. 276. К упражнению 142.1. Земной индуктор.

¹⁾ По имени Вильгельма Эдуарда Вебера (1804—1891) — немецкого физика.

горизонтальна, но направлена перпендикулярно к магнитному меридиану (с запада на восток). Ответьте на следующие вопросы: 1) Какая составляющая земного магнитного поля обуславливает индукцию в каждом из этих случаев? 2) В каком случае индуцированный ток при прочих равных условиях будет наибольший? 3) Если наклонение в данном месте Земли равно $i=70^\circ$, то в каком из случаев а) или б) индуцированный ток будет больше?

142.2. Катушка земного индуктора содержит 500 витков, площадь каждого витка 1200 см^2 . Индуктор вращается со скоростью 20 оборотов в секунду. Зная, что горизонтальная составляющая земного поля в данном месте равна $0,5 \text{ э}$ и что наклонение $i=60^\circ$, вычислите для каждого из случаев, разобранных в предыдущей задаче, среднее значение индуцированной электродвижущей силы U и максимальное значение потока магнитной индукции Φ через один виток катушки.

142.3. В катушке P без железного сердечника, имеющей длину $l=25 \text{ см}$ и диаметр $d=10 \text{ см}$ и содержащей $n=1000$ витков, ток равномерно увеличивается на 1 а в 1 сек . На эту катушку надета другая катушка J , содержащая 100 витков. Какая электродвижущая сила U будет индуцироваться в ней?

142.4. Катушка, состоящая из 100 витков проволоки с радиусом витка 1 см , помещена между полюсами электромагнита. Концы ее присоединены к измерительному прибору, который показал, что при вынимании катушки из поля или выключении электромагнита в катушке протекает индуцированный заряд $6,28 \cdot 10^{-6} \text{ к}$. Сопротивление катушки 50 ом , сопротивление гальванометра 1550 ом . Вычислите напряженность магнитного поля H в междуполюсном пространстве электромагнита.

142.5. Катушка, имеющая сопротивление 1000 ом и состоящая из 100 витков с площадью в 5 см^2 , была внесена в однородное поле междуполюсного пространства электромагнита так, что линии магнитного поля оказались перпендикулярны к плоскости витков катушки. При этом в ней индуцировался заряд $2 \cdot 10^{-6} \text{ к}$. Вычислите напряженность магнитного поля H в междуполюсном пространстве магнита.

142.6. Какой заряд Q будет индуцирован в катушке предыдущей задачи, если мы повернем ее в междуполюсном пространстве электромагнита так, чтобы плоскость ее витков составила угол 30° с линиями поля?

§ 143. Электромагнитная индукция и силы Лорентца. Явление возникновения э. д. с. индукции в телах, движущихся в магнитном поле, может быть легко понято с точки зрения представления о силах Лорентца (§ 137). Представим себе какое-нибудь тело, например стержень AB , движущийся в магнитном поле H . Для простоты предположим, что направление AB , направление H и направление движения v взаимно перпендикулярны между собой (рис. 277). Движение стержня есть в то же время движение положительных и отрицательных зарядов, входящих в состав молекул этого стержня. И те и другие двигаются в одну сторону, в сторону движения самого стержня AB . Магнитное поле H действует на эти заряды согласно § 137 силами Лорентца, стремясь передвигать положительные заряды в одну сторону, к концу B , а отрицательные в другую, к концу A . В результате заряды раздвинутся, т. е. действие сил Лорентца приводит к возникновению э. д. с., которую мы и называем э. д. с. индукции.

В случае движения металлического стержня положительные ионы, составляющие остов стержня, не могут перемещаться вдоль него, а отрицательные заряды — подвижные электроны — будут скапливаться в избытке у конца A ; конец B будет характеризоваться недостатком электронов. Возникшее напряжение U_{AB} и определяет собою э. д. с. индукции. В случае движения столба э л е к т р о л и т а положительные и отрицательные ионы накапливаются под действием сил Лорентца на противоположных концах столба. В случае же движения д и э л е к т р и к а раздвижение зарядов под действием сил Лорентца приводит к п о л я р и з а ц и и диэлектрика (§ 37).

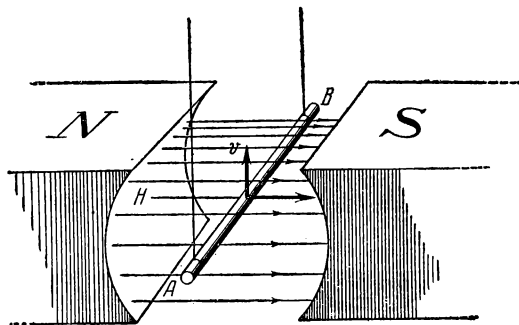


Рис. 277. К объяснению электромагнитной индукции при помощи сил Лорентца. AB — стержень, расположенный перпендикулярно к магнитному полю H и движущийся со скоростью v перпендикулярно к H и к своей оси AB . Между A и B индуцируется э. д. с., направленная от B к A .

Эти представления особенно удобны при исследовании возникновения э. д. с. индукции в незамкнутых контурах, например в стержне, падающем в магнитном поле Земли.

Само собою разумеется, что, пользуясь правилами разложения векторов и указанием (§ 137) относительно направления силы Лорентца, мы без труда разберем и те случаи, когда направление движения и направление поля составляют между собой или с направлением проводника углы, отличные от прямого. В частности, как легко видеть, э. д. с. индукции равна нулю, если проводник движется параллельно направлению поля, т. е. угол между направлением скорости зарядов v и направлением напряженности магнитного поля H равен нулю.

Конечно, для наглядного истолкования возникновения э. д. с. индукции нельзя пользоваться силами Лорентца в тех случаях, когда индукция обусловлена изменением напряженности поля в неподвижных проводниках. Но в случае индукции в движущихся проводниках, когда способ рассмотрения с помощью сил Лорентца применим, он дает не только качественную картину, но и правильное количественное выражение величины э. д. с. индукции.

§ 144. Индуцированные токи в сплошных проводниках (токи Фуко). Рассмотрим еще раз простейший опыт индукции тока в витке проволоки, помещенном в изменяющееся магнитное поле (рис. 278). Виток этот замкнут, причем в цепи нет гальванометра, по отклонению которого мы могли бы судить о наличии в витке индуцированного тока (рис. 278, а). Мы можем, однако, обнаружить этот ток по тому *нагреванию*, которым сопровождается его прохождение по проводнику (§ 56). Если мы, сохраняя прежние *внешние* размеры витка, сделаем его из более толстой проволоки или из металлической ленты (рис. 278, б),

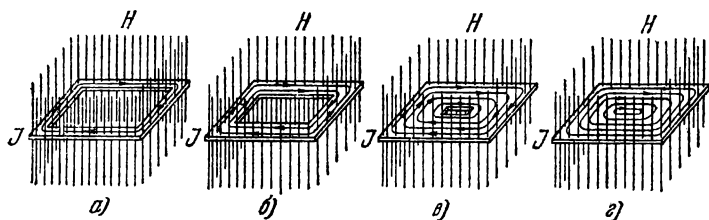


Рис. 278. а) В замкнутом витке провода J , помещенном в переменное магнитное поле H , возникает индуцированный ток, нагревающий провод; б) виток J более толст, его сопротивление меньше и нагревание больше; в) виток заменен пластинкой J из проводника с небольшим отверстием посредине, нагревание его еще больше; г) виток заменен сплошным куском металла J , в нем возникают индуцированные токи (токи Фуко), нагревающие кусок металла J .

то э. д. с. индукции U останется прежней (ибо $\Delta\Phi/\Delta t$ осталось прежней), а *сопротивление* витка уменьшится. Вследствие этого индуцированный ток I возрастет. Так как мощность, выделяемая в проводнике в виде тепла, пропорциональна $I \cdot U$, то, следовательно, при уменьшении сопротивления витка нагревание его увеличится.

На рис. 278, а, б, в, г показано несколько образчиков такого «витка» со все более широкими сторонами; последний представляет собой просто сплошную пластинку проводника, помещенную в меняющееся магнитное поле. Понятно, что вместо тонкой пластинки мы могли бы взять и толстый кусок металла. Как и следует ожидать, опыт показывает, что такой кусок металла, помещенный в переменное магнитное поле, нагревается; иногда это нагревание довольно сильно. Это указывает на то, что *при изменении магнитного потока индуцированные токи возникают и в*

сплошных кусках металла, а не только в проволочных проводниках.

Эти токи обычно называют вихревыми токами, или токами Фуко¹⁾, по имени открывшего их ученого. Их направление и величина зависят от формы куска металла, находящегося в поле, от направления меняющегося магнитного потока, от свойств материала, из которого сделан кусок и, конечно, от скорости изменения магнитного потока. Распределение вихревых токов в металле, вообще говоря, может быть очень сложным.

В кусках достаточно толстых, т. е. имеющих большие размеры в направлении, перпендикулярном к направлению индуцированного тока, вихревые токи вследствие малости сопротивления могут быть очень большими и вызывать очень значительное нагревание. Если, например, поместить внутрь катушки массивный металлический сердечник и пропустить по катушке переменный ток, который 100 раз в секунду меняет свое направление и величину, доходя до нуля и вновь усиливаясь, то этот сердечник нагреется очень сильно. Нагревание это вызывается инд

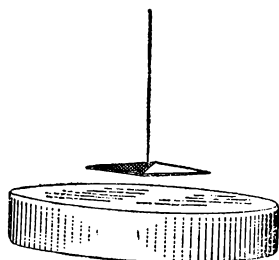


Рис. 279. Качания подвешенной на нити магнитной стрелки быстро успокаиваются (затухают), если вблизи стрелки находится массивный кусок металла (например, медный диск).

уцированными (вихревыми) токами, возникающими вследствие непрерывного изменения магнитного потока, пронизывающего сердечник. Если же этот сердечник сделать из отдельных тонких проволок, изолированных друг от друга слоем лака или окислов, то сопротивление сердечника в направлении его толщины, т. е. сопротивление для вихревых токов, возрастет, и нагревание значительно уменьшится. Этим приемом — разделением сплошных кусков железа на тонкие изолированные друг от друга слои — постоянно пользуются во всех электрических машинах для уменьшения нагревания их индуцированными токами, возникающими в переменном магнитном поле. С другой стороны, токи Фуко иногда используют в так называемых индукционных

¹⁾ Леон Фуко (1819—1868) — французский физик.

печах для сильного нагрева или даже плавления металлов.

Вихревые токи, как и всякие индуцированные токи, подчиняются правилу Ленца, т. е. они направлены так, что взаимодействие их с первичным магнитным полем тормозит то движение, которым вызывается индукция. Простейший опыт, с помощью которого можно проверить правило Ленца в применении к вихревым токам, показан на рис. 279.

Магнитная стрелка подвешена на нитке. Предоставленная самой себе, она установится в положении равновесия, т. е. по магнитному меридиану данного места (приблизительно в направлении север — юг). Если ее отклонить, то она будет довольно долго качаться вокруг этого положения. Как и колебания маятника, колебания нашей стрелки будут затухать очень медленно, если трение в подвесе достаточно мало. Поместим теперь под стрелкой, очень близко к ней, массивную медную

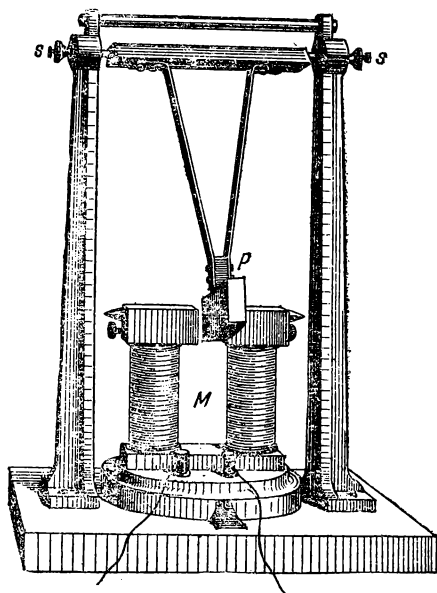


Рис. 280. К упражнению 144.2.

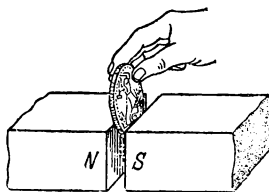


Рис. 281. К упражнению 144.3.

пластинку. Мы увидим, что при этом затухание колебаний магнита происходит значительно быстрее: после одного или двух качаний стрелка устанавливается в положении равновесия. Причина этого ясна. При движении магнита в пластинке индуцируются вихревые токи, взаимодействие которых с магнитным полем по правилу Ленца тормозит движение магнита. Тот запас кинетической энергии, который мы сообщили магниту, толкнув его, быстро превращается вихревыми токами во внутреннюю энергию пластинки, вызывая ее нагревание. Подобное «магнитное успокоение» применяется во многих электроизмерительных приборах.

Взаимодействие токов Фуко с магнитной стрелкой можно наблюдать и в следующем видоизменении описанного опыта. Прикрепим наш медный диск к центробежной машине и заставим его быстро вращаться.

Магнитная стрелка, висящая над диском, поворачивается, следуя за диском, и закручивает нить. И здесь причина ясна: при движении диска относительно магнита в нем индуцируются токи Фуко, взаимодействие которых с магнитом стремится, по правилу Ленца, остановить движение диска или, в силу третьего закона механики, увлечь магнитную стрелку. Не лишено интереса вспомнить, что описываемый опыт был осуществлен Араго в начале XIX века, еще до открытия электромагнитной индукции. Однако он оставался непонятым, пока Фарадей, открыв индукцию, не объяснил его как одно из проявлений электромагнитной индукции.

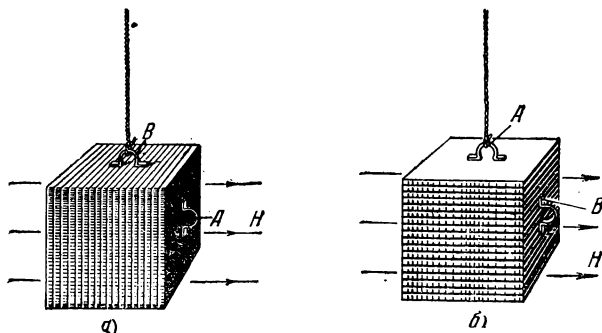


Рис. 282. К упражнению 144.4.

У п р а ж н е н и я . 144.1. Если в пространстве между полюсами сильного электромагнита поместить толстостенный медный цилиндр, наполненный водой, и привести его в быстрое вращение, то цилиндр нагреется настолько, что вода быстро закипит. Объясните этот опыт. За счет какой энергии происходит нагревание цилиндра и воды?

144.2. Массивный медный маятник P качается вокруг оси SS (рис. 280), проходя на своем пути через междуполюсное пространство сильного электромагнита M . При отсутствии тока в обмотках электромагнита маятник, выведенный из положения равновесия, совершает довольно много колебаний, прежде чем остановиться. Если же включить ток, то маятник, дойдя до междуполюсного пространства, резко, как бы толчком тормозится и сразу останавливается. Объясните это явление.

144.3. Почему, если заставить монету падать через междуполюсное пространство сильного электромагнита (рис. 281), то при включенном токе в обмотках монета не падает с обычной скоростью, а медленно опускается, как бы продавливаясь через очень вязкую жидкость.

144.4. Если подвесить на нити между полюсами электромагнита кубик, сложенный из отдельных изолированных медных листов (рис. 282), затем эту нить закрутить и отпустить, то кубик начнет быстро вращаться вокруг вертикальной оси. При включении тока в обмотки электромагнита это вращение тормозится, причем тормозящее действие значительно сильнее тогда, когда кубик подвешен за ушко B (рис. 282, а), чем тогда, когда он подвешен за ушко A (рис. 282, б). Объясните эти опыты. У к а з а н и е. Учтите направления индуцированных токов (токов Фуко) и направление магнитного поля H , показанное на рисунке.

ГЛАВА XVI

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТЕЛ

§ 145. **Магнитная проницаемость железа.** До сих пор мы рассматривали только магнитное поле в пустоте или, что практически почти то же самое, в воздухе. Теперь мы переходим к рассмотрению магнитного поля в различных веществах и, в первую очередь, в железе и сходных с ним сильно намагничивающихся материалах. Вернемся еще раз к индукционному опыту, показанному на рис. 283, *а* и *б*.

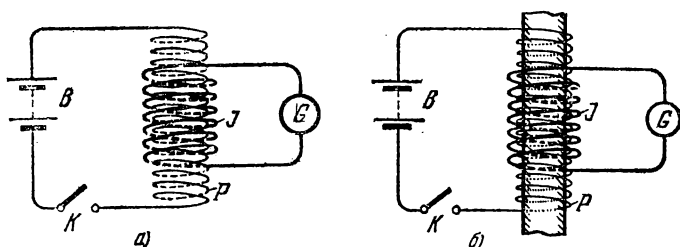


Рис. 283. В катушке J , надетой на соленоид P , индуцируется ток вследствие замыкания и размыкания ключа K в цепи соленоида. Индуцированный ток больше при наличии железного сердечника в соленоиде ($б$), чем без сердечника в нем ($а$). G — гальванометр, B — батарея.

Индукционная катушка J надета на длинный соленоид P , по обмотке которого идет ток определенной величины. Сквозь катушку J проходит, следовательно, определенный магнитный поток Φ . При выключении тока магнитный поток уменьшается до нуля, так что изменение магнитного потока $\Delta\Phi = \Phi$, т. е. равно начальному значению магнитного потока. Это изменение происходит

за некоторый промежуток времени Δt . При этом в катушке J индуцируется э. д. с., равная

$$U = k \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = k \cdot \frac{\Phi}{\Delta t}.$$

Если увеличить ток в соленоиде P в несколько раз, то и начальный магнитный поток возрастет в о с т о л ь к о ж е р а з. Выключая ток, обнаружим, что и э. д. с. индукции возрастает в о с т о л ь к о ж е р а з. Это и понятно, ибо в этом опыте время, за которое поток индукции изменяется от начального значения до нуля, о д н о и т о ж е и, следовательно, с к о р о с т ь и з м е н е н и я магнитного потока тем больше, чем больше его н а ч а л ь н о е значение. Итак, в описанных условиях опыта, когда индукция вызывается в ы к л ю ч е н и е м т о к а первичного соленоида P , в индукционной катушке J возникает э. д. с. индукции, пропорциональная начальному значению магнитного потока. Другими словами, наблюдаемая величина э. д. с. индукции позволяет судить о начальном значении магнитного потока.

Проведем теперь описанный опыт два раза подряд в следующих условиях. Ток в соленоиде P в обоих случаях задаем о д и н а к о в ы м, но при втором опыте введем предварительно в соленоид P ж е л е з н ы й с е р д е ч н и к (рис. 283, б). Мы обнаружим, что во втором случае (при наличии сердечника) индуцированный в катушке ток, а следовательно, и э. д. с. индукции оказываются гораздо б о ь ш и м и, чем в первом опыте (когда железный сердечник отсутствует). Чтобы без железного сердечника получить то же значение э. д. с. индукции, как и при наличии сердечника, нужно было бы во много раз усилить первичный ток в соленоиде P . Но усиление первичного тока в соленоиде P означает, что мы увеличиваем начальное значение магнитного потока внутри соленоиды P , а следовательно, и сквозь катушку J . Таким образом, *внесение железного сердечника сильно увеличивает начальное значение магнитного потока*. Повторяя наш опыт с сердечниками различной толщины, мы убедимся, что увеличение магнитного потока будет тем больше, чем б о ь ш а я часть соленоиды заполняется железом. Наибольшее увеличение наблюдается, когда в е с ь соленоид з а п о л н е н ж е л е з о м, т. е. когда обмотка п л о т н о навита на железный сердечник.

Строго говоря, полное увеличение магнитного потока достигается лишь тогда, когда в се линии магнитного поля проходят в веществе сердечника. Это бывает, например, у соленоида, плотно навитого на замкнутый в виде кольца сердечник (рис. 284, а). Однако, если соленоид достаточно длинен по сравнению со своими поперечными размерами и плотно навит на длинный выступающий сердечник, то индукционная катушка, помещенная в средней части соленоида (рис. 284, б), будет пронизываться практически полным потоком.

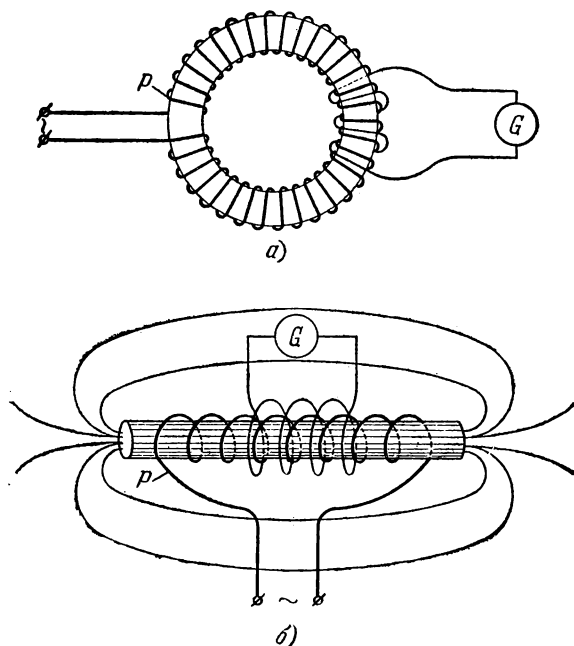


Рис. 284. Наличие железного сердечника увеличивает магнитный поток соленоида: а) наибольшее увеличение магнитного потока достигается у кольцеобразного сердечника; б) большое увеличение магнитного потока получается также у длинного и узкого соленоида с выступающими концами сердечника. Первичная катушка P в обоих случаях должна плотно обвивать соленоид. G — гальванометр.

В этом случае отношение магнитных потоков в соленоиде, навитом на сердечник, и в том же соленоиде без сердечника зависит только от материала сердечника, конечно, при условии, что начальный ток в обмотке имеет одно и то же значение. Для разных сортов железа и стали

это отношение различно. Обозначая его греческой буквой μ (мю), мы можем написать:

$$\Phi = \mu \cdot \Phi_0,$$

где Φ — магнитный поток в катушке с сердечником, а Φ_0 — магнитный поток в катушке без сердечника.

Величину μ , характеризующую магнитные свойства железа, использованного для сердечника, называют его магнитной проницаемостью. Как уже упоминалось, измерения показывают, что наличие железного

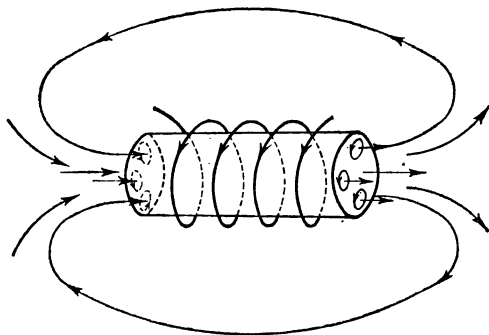


Рис. 285. Под влиянием магнитного поля соленоида амперовы токи в железном сердечнике ориентируются так, что направление их совпадает с током в соленоиде.

сердечника увеличивает магнитный поток весьма значительно, иногда в тысячи раз. Мы можем, следовательно, сказать, что *магнитная проницаемость железа весьма велика* и в некоторых случаях может достигать значения *нескольких тысяч*.

Возрастание магнитного потока при введении в соленоид железа нетрудно понять с точки зрения представлений об амперовых молекулярных токах. Под влиянием магнитного поля соленоида амперовы токи в железе ориентируются, стремясь стать *параллельно* токам внешней обмотки (рис. 285). Этим объясняется намагничивание железа и усиление магнитного поля во *внешнем* пространстве. Этим же объясняется и увеличение магнитного потока сквозь соленоид при введении в него сердечника: к магнит-

ному потоку, создаваемому током в обмотке соленоида, добавляется магнитный поток, создаваемый совокупностью ориентиовавшихся амперовых токов.

Мы видели, что с помощью индукционных опытов можно по увеличению э. д. с. индукции судить об увеличении магнитного потока сквозь соленоид с железом. Что же касается напряженности магнитного поля внутри железа, то непосредственное измерение ее весьма затруднительно, и поэтому мы в этой книге не будем касаться вопроса о напряженности поля внутри железа или других веществ. Для характеристики различных веществ мы ограничимся указанием величины магнитной проницаемости μ , определенной так, как это было сделано выше.

§ 146. Магнитная проницаемость различных тел. Тела парамагнитные и диамагнитные. Если в описанных выше опытах вместо сердечника из железа брать сердечники из других материалов, то также можно обнаружить изменение магнитного потока. Естественнее всего ждать, что наиболее заметный эффект дадут материалы, подобные по своим магнитным свойствам железу, т. е. никель, кобальт и некоторые магнитные сплавы. Действительно, при введении в катушку сердечника из этих материалов увеличение магнитного потока оказывается довольно значительным. Иными словами, можно сказать, что магнитная проницаемость их велика; у никеля, например, величина μ может достигать значения 50, у кобальта 100 и т. п. Все эти материалы с большими значениями μ объединяют в одну группу ферромагнитных материалов.

Однако и все остальные «немагнитные» материалы также оказывают некоторое влияние на величину магнитного потока, хотя влияние это значительно меньше, чем у материалов ферромагнитных. С помощью очень тщательных измерений можно это изменение обнаружить и определить величину магнитной проницаемости различных материалов. При этом, однако, нужно иметь в виду, что в опыте, описанном выше, мы сравнивали магнитный поток в катушке, внутренность которой заполнена железом, с потоком в катушке, внутри которой имеется воздух. Пока речь шла о таких сильно магнитных материалах, как железо, никель, кобальт, это не имело значения, так как наличие воздуха очень мало влияет на величину магнитного потока. Но при исследовании магнитных свойств других тел, в частности самого воздуха, мы должны, конечно, вести сравнение с катушкой, внутри которой воздуха нет

(вакуум). Таким образом, за величину магнитной проницаемости мы принимаем отношение магнитных потоков в исследуемом веществе и в вакууме ($\mu = \Phi/\Phi_0$). Иными словами, за единицу мы принимаем магнитную проницаемость для вакуума (если $\Phi = \Phi_0$, то $\mu = 1$).

Измерения показывают, что магнитная проницаемость всех веществ отличается от единицы, хотя в большинстве случаев это отличие очень мало. Но особенно замечательным оказывается тот факт, что у одних тел величина μ больше единицы, а у других она меньше единицы, т. е. заполнение катушки одними веществами увеличивает магнитный поток, а заполнение катушки другими веществами уменьшает этот поток. Первые из этих веществ называются парамагнитными ($\mu > 1$), а вторые — диамагнитными ($\mu < 1$). Как показывает таблица 7, отличие величины μ от единицы как у парамагнитных, так и у диамагнитных веществ невелико.

Нужно особенно подчеркнуть, что для парамагнитных и диамагнитных тел величина проницаемости μ не зависит от напряженности внешнего, намагничивающего поля, т. е. представляет собой постоянную величину, характеризующую данное вещество. Как мы увидим ниже, в § 150, это не имеет места для железа и других сходных с ним (ферромагнитных) тел.

Таблица 7

Значения магнитной проницаемости μ для некоторых парамагнитных и диамагнитных веществ

Парамагнитные вещества	μ	Диамагнитные вещества	μ
Азот (газообразный)	1,000013	Водород (газообразный)	0,999937
Воздух (газообразный)	1,000038	Вода	0,999991
Кислород (газообразный)	1,000017	Стекло	0,999987
Кислород (жидкий) . .	1,0034	Цинк	0,999991
Эбонит	1,000014	Серебро	0,999981
Алюминий	1,000023	Золото	0,999963
Вольфрам	1,000175	Медь	0,999912
Платина	1,000253	Висмут	0,999824

Влияние парамагнитных и диамагнитных веществ на величину магнитного потока мы объясняем так же, как и

влияние веществ ферромагнитных, тем, что к магнитному потоку, создаваемому током в обмотке катушки, присоединяется поток, исходящий из элементарных амперовых токов. *Парамагнитные тела увеличивают магнитный поток катушки. Это увеличение потока при заполнении катушки парамагнитным веществом указывает на то, что и в парамагнитных веществах под действием внешнего магнитного поля элементарные токи ориентируются так, что направление их совпадает с направлением тока обмотки* (рис. 285). Небольшое отличие μ от единицы указывает лишь на то, что в случае парамагнитных веществ

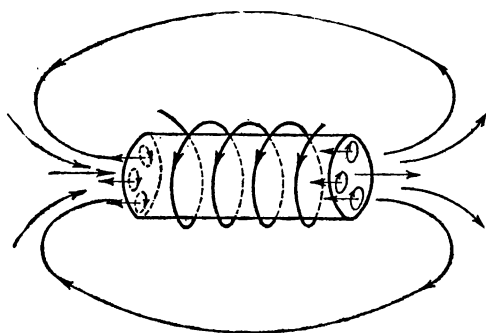


Рис. 286. Д и а м а г н и т н ы е вещества внутри катушки ослабляют магнитное поле соленоида. Элементарные токи в них направлены противоположно току в соленоиде.

этот добавочный магнитный поток очень невелик, т. е. что парамагнитные вещества намагничиваются очень слабо.

Уменьшение магнитного потока при заполнении катушки диамагнитным веществом означает, что в этом случае магнитный поток от элементарных токов направлен противоположно магнитному потоку катушки, т. е. что в *диамагнитных веществах под действием внешнего магнитного поля возникают элементарные токи, направленные противоположно токам обмотки* (рис. 286). Малость отклонений μ от единицы и в этом случае указывает на то, что дополнительный поток этих элементарных токов невелик.

§ 147. Движение парамагнитных и диамагнитных тел в магнитном поле. Опыты Фарадея. Притяжение железных предметов к магнитам является наиболее простым и бросающимся в глаза проявлением магнитного поля и исторически послужило основой всего развития учения о магнетизме. Оно сводится к воздействию магнитного поля на ориентированные молекулярные токи намагнитившегося железа. Так же, но только значительно слабее должно действовать магнитное поле и на парамагнитные тела, потому

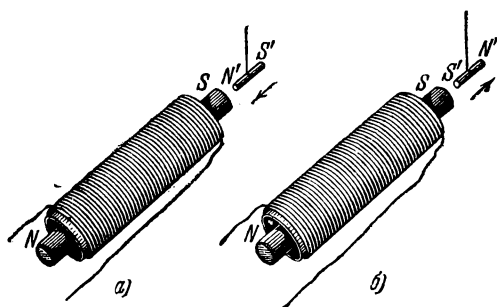


Рис. 287. а) При намагничивании парамагнитного или ферромагнитного тела на ближайшем к магниту конце возникает полюс, разноименный с полюсом намагничивающего магнита. Парамагнитное тело притягивается к магниту. б) В тех же условиях на ближайшем к магниту конце диамагнитного тела возникает полюс одноименный. Диамагнитное тело отталкивается от магнита.

что, как мы могли судить по опытам, описанным в предыдущем параграфе, и в парамагнитных телах ориентация элементарных токов происходит так же, как в ферромагнитных: магнитный поток элементарных токов усиливает, хотя и незначительно, магнитный поток ориентирующего поля и, следовательно, *парамагнитные тела притягиваются к магниту* (рис. 287, а).

В отличие от тел парамагнитных *диамагнитные тела уменьшают магнитный поток катушки*. Это означает, что в диамагнитном теле под действием внешнего поля возникают элементарные круговые токи такого направления, что их магнитное поле противоположно направле-

нию внешнего магнитного поля. Следовательно, и действие внешнего магнитного поля на диамагнитные тела противоположно по направлению действию его на тела ферро- и парамагнитные, т. е. *диамагнитные тела отталкиваются от магнита* (рис. 287, б).

Мы можем выразить этот факт и несколько иначе. Когда мы подносим к магниту какое-нибудь железное тело, то оно намагничивается так, что на той стороне его, которая обращена к магниту, возникает полюс, *разноименный* с полюсом магнита; то же имеет место и в случае *парамагнитного* тела (рис. 287, а). Напротив, в случае *диамагнитного* тела на стороне, ближайшей к полюсу намагничивающего магнита, возникает полюс, *одноименный* с этим полюсом магнита (рис. 287, б). Рис. 285 и 286 поясняют, почему парамагнитные тела притягиваются к магниту, а диамагнитные отталкиваются от него.

Именно такие действия и были обнаружены Фарадеем. В 1845 г., используя сильный электромагнит, Фарадей установил способность всех тел намагничиваться и открыл, что одни тела притягиваются к магниту, а другие отталкиваются от него. Он предложил для первых название парамагнитных, для вторых название диамагнитных. Индукционные опыты с пара- и диамагнитными телами, подобные описанным в § 145, были произведены значительно позже, когда магнитные свойства диамагнитных и парамагнитных тел были уже установлены на основании исследований Фарадея.

По силе притяжения или отталкивания можно судить и *количественно* о способности тела намагничиваться, т. е. можно определить величину магнитной проницаемости μ для данного вещества. Этот метод измерения величины μ , основанный на изучении притяжения или отталкивания маленького тела из данного вещества, теоретически более сложен, чем описанный нами в § 145 метод, основанный на измерении э. д. с. индукции. Но зато он гораздо чувствительнее и, кроме того, пригоден для измерения μ в маленьком образчике вещества, тогда как для измерения μ по индукционному способу нужно заполнить изучаемым веществом всю внутренность катушки. В тех случаях, когда удается измерить μ и тем и другим способом, получаются согласующиеся результаты.

Упражнения. 147.1. Полюсы сильного электромагнита на рис. 288 срезаны непараллельно друг другу, так что внизу расстояние между ними значительно меньше, чем наверху. Между ними подвешивается на нити шарик из различных испытуемых материалов. Верхний конец нити прикреплен к спиральной пружинке, растяжение которой позволяет измерить силу, действующую со стороны магнитного поля на

шарик (пружинные весы). Оказывается, что если шарик изготовлен из алюминия, вольфрама или платины, то эта сила направлена вниз (пружинка растягивается), а в случае серебра, золота, меди или висмута она направлена вверх (пружинка сокращается). Объясните этот опыт.

147.2. При исследовании магнитной проницаемости жидких тел часто поступают так. Жидкость наливают в коленчатую трубку и одно из колен помещают между полюсами сильного электромагнита (рис. 289).

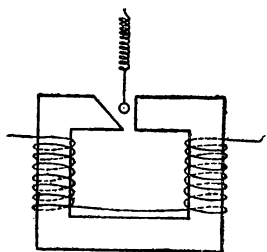


Рис. 288. К упражнению 147.1.

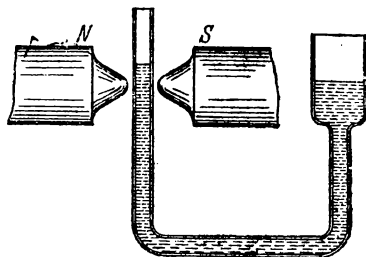


Рис. 289. К упражнению 147.2.

Жидкость в этом колене поднимается или опускается в зависимости от того, является ли она парамагнитной или диамагнитной. Объясните это явление.

§ 148. Молекулярная теория магнетизма. Теория, объясняющая различие в магнитных свойствах веществ на основе изучения строения отдельных частиц этих веществ — их атомов или молекул, — получила название молекулярной теории магнетизма. Эта теория очень сложна и во многом еще не завершена. Поэтому здесь мы не можем разбирать ее сколько-нибудь подробно. Укажем лишь на основные причины различия между свойствами парамагнитных и диамагнитных тел.

Каждое тело, и парамагнитное и диамагнитное, представляется нам в целом немагнитным до тех пор, пока на него не действует внешнее магнитное поле. Но обуславливается это в телах парамагнитных и в телах диамагнитных разными причинами. Диамагнитными являются тела, каждая частица которых — атом или молекула — находясь вне магнитного поля, не обладает магнитными свойствами. Только внешнее магнитное поле превращает их в элементарные магниты (вызывает элементарные токи), определенным образом направленные. Напротив, частицы парамагнитных веществ уже сами по себе, еще до того, как на них начало действовать внешнее поле, представляют собой элементарные магниты (элементарные токи). Здесь роль внешнего магнитного поля сводится к определенной ориентации, у п о р я д о ч е н и ю расположения этих магнитиков. Пока поле не действовало, все они были расположены беспорядочно, хаотически, и вещество в целом представлялось нам немагнитным. В магнитном же поле эти элементарные магниты выстраиваются в большей или меньшей мере параллельными цепочками и вещество в целом намагничивается.

В чем же состоит различие между строением частиц диамагнитных и парамагнитных веществ? В атомах всех тел есть большое число движущихся электронов. Каждый из них и представляет собой амперов элементарный круговой ток. Но в атомах диамагнитных веществ до внесения их в магнитное поле магнитные действия этих отдельных токов взаимно компенсируют друг друга, так что атом в целом не является элементарным магнитом. Когда мы вносим такое вещество в магнитное поле, то на каждый движущийся электрон действует сила Лорентца, и совокупное действие всех этих сил, как показывает расчет, приводит к тому, что в атоме индуцируется определенный ток, т. е. атом приобретает свойства элементарного магнетика. Так как эти токи являются индуцированными, то направление их, согласно правилу Ленца, должно быть противоположно направлению тока в катушке, создающего внешнее магнитное поле, т. е. магнитный поток от этих токов должен ослабить поток внешнего поля, и диамагнитное тело отталкивается от магнита.

В атомах парамагнитных веществ магнитные действия отдельных электронов не полностью компенсируют друг друга, так что атом в целом и сам по себе является элементарным магнитом. Действие внешнего магнитного поля упорядочивает расположение этих элементарных токов (магнетиков), причем токи ориентируются так, что их направление преимущественно совпадает с направлением тока катушки, создающего внешнее магнитное поле. Поэтому магнитный поток от элементарных токов в этом случае усиливает поток катушки, и парамагнитное тело притягивается к магниту.

Строго говоря, диамагнетизм есть общее свойство всех веществ. Внешнее магнитное поле производит и на атомы парамагнитных веществ такое же индуцирующее действие, как на атомы диамагнитных веществ. Но в парамагнитных веществах это действие перекрывается более сильным ориентирующим действием внешнего магнитного поля, которое упорядочивает собственные элементарные токи атомов.

Из сказанного ясно, что свойства парамагнитных тел можно было бы объяснить и с помощью гипотезы Кулона об элементарных магнетиках (§ 116). Однако явления диамагнетизма показывают неприемлемость этой гипотезы, ибо внешнее поле не может ориентировать элементарные магнетики навстречу полю, что нужно было допустить для объяснения диамагнетизма. Только теория молекуларных токов в позволяет, как мы видели, с помощью явленной индукции объяснить диамагнитные свойства вещества наряду с парамагнитными.

Мы видим, таким образом, что диамагнетизм и парамагнетизм объясняются различиями в строении самих атомов или молекул вещества.

§ 149. Магнитная защита. Само собой разумеется, что намагничивание ферромагнитных, парамагнитных и диамагнитных тел происходит не только тогда, когда мы помещаем их внутрь соленоида, но и вообще всегда, когда вещество помещается в магнитное поле. Во всех этих случаях к магнитному полю, которое существовало до

внесения нашего тела, добавляется магнитное поле, обусловленное намагничиванием вещества, в результате чего магнитное поле изменяется. Из сказанного в предыдущих параграфах ясно, что наиболее сильные изменения поля происходят при внесении в него ферромагнитных тел, в частности железа¹⁾. Изменение магнитного поля вокруг ферромагнитных тел очень удобно наблюдать, пользуясь картиной силовых линий, получаемой при помощи железных опилок. На рис. 290 изображены, например, изменения, наблюдающиеся при внесении куска железа прямоугольной формы в магнитное поле, которое раньше было однородным. Как видим, поле перестает быть однородным и приобретает сложный характер; в одних местах оно усиливается, в других — ослабляется.

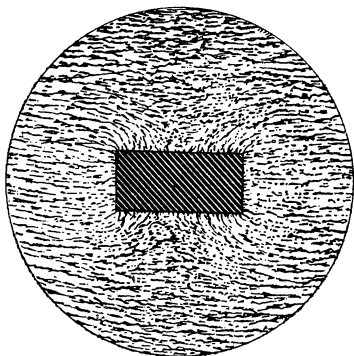


Рис. 290. Изменение магнитного поля при внесении в него куска железа.

Упражнения. 149.1. Когда на современных судах устанавливают и выверяют компасы, то вводят поправки к показаниям компаса, зависящие от формы и расположения частей судна и от положения компаса на нем. Объясните, почему это необходимо. Зависят ли поправки от сорта стали, примененной при постройке судна?

149.2. Почему суда, снаряжаемые экспедициями для исследования магнитного поля Земли, строят не стальные, а деревянные и для скрепления обшивки применяют медные винты?

Очень интересна и практически важна картина, которая наблюдается при внесении в магнитное поле замкнутого железного сосуда, например шаровой формы. Как видно из рис. 291, в результате сложения внешнего магнитного поля с полем намагнитившегося железа поле во внутренней области шара почти исчезает. Этим пользуются для

¹⁾ Поэтому вопрос о сложении полей постоянных магнитов в действительности не так прост, как было изложено в § 122; внесение второго стального магнита не только добавляет его поле к полю первого магнита, но и искажает это поле. При сложении полей ток в (в отсутствие железных сердечников) изложенное в § 122 не нуждается в оговорках.

создания магнитной защиты или магнитной экранировки, т. е. для защиты тех или иных приборов от действия внешнего магнитного поля.

Картина, которую мы наблюдаем при создании магнитной защиты, внешне напоминает создание электростатиче-

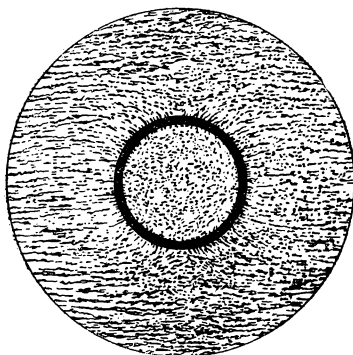


Рис. 291. Полый железный шар внесен в однородное магнитное тело.

ской защиты при помощи проводящей оболочки. Однако между этими явлениями есть глубокое принципиальное различие. В случае электростатической защиты металлические стенки могут быть сколь угодно тонки. Достаточно, например, посеребрить поверхность стеклянного сосуда, помещенного в электрическом поле, чтобы внутри сосуда не оказалось электрического поля, которое обрывается на поверхности металла. В слу-

чае же магнитного поля тонкие железные стенки не являются защитой для внутреннего пространства: магнитные поля проходят сквозь железо, и внутри сосуда оказывается некоторое магнитное поле. Лишь при достаточно толстых железных стенках ослабление поля внутри полости может сделаться настолько сильным, что магнитная защита приобретает практическое значение, хотя и в этом случае поле внутри не уничтожается целиком. И в этом случае ослабление поля не есть результат обрыва его на поверхности железа; магнитные силовые линии отнюдь не обрываются, но по-прежнему остаются замкнутыми, проходя сквозь железо.

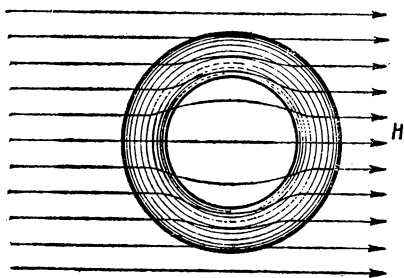


Рис. 292. Магнитные силовые линии сосредоточены в железном кольце, внесенном в магнитное поле.

Изображая графически распределение силовых линий в толще железа и в полости, получим картину рис. 292, которая и показывает, что ослабление поля внутри полости есть результат изменения направления силовых линий, а не их обрыва.

§ 150. Особенности ферромагнитных тел. Бросающейся в глаза особенностью ферромагнитных тел является их способность к сильному намагничиванию, вследствие которой магнитная проницаемость этих тел имеет очень большие значения. У железа, например, величина μ достигает значений, которые в тысячи раз превосходят значения μ у парамагнитных и диамагнитных веществ. Намагничивание ферромагнитных тел было изучено в опытах А. Г. Столетова и других ученых. Эти опыты показали, сверх того, что, в отличие от парамагнитных и диамагнитных веществ, *магнитная проницаемость ферромагнитных веществ сильно зависит от напряженности магнитного поля*, при которой производят ее измерение. Так, например, в слабых полях магнитная проницаемость μ железа достигает значений 5—6 тысяч, а в сильных полях значения μ падают до нескольких сот и ниже.

Намагничивание тела, помещенного в магнитное поле, например внутрь соленоида с током, вызывает изменение магнитного потока. Поэтому величину намагничивания материала можно характеризовать разностью между тем магнитным потоком, который дает соленоид с сечением в 1 см^2 , заполненный данным веществом, и тем потоком, который дает при том же токе этот соленоид без сердечника в воздухе (или, точнее, в вакууме). Если пустой соленоид дает поток Φ_0 , а заполненный — поток Φ , то, согласно § 145, $\Phi = \mu \Phi_0$. Таким образом, величина

$$I = \Phi - \Phi_0 = (\mu - 1) \cdot \Phi_0$$

представляет собой тот добавочный магнитный поток, который создается намагниченным веществом. Эту величину мы и будем называть намагничиванием данного вещества. *Намагничивание зависит от магнитной проницаемости вещества μ и от величины потока Φ_0 , в котором производится намагничивание.*

Обращаем внимание на то, что мы выбираем соленоид с определенной площадью сечения (1 см^2), ибо величина потока зависит от площади сечения соленоида. В § 145, когда нас интересовало

отношение потоков Φ/Φ_0 , это обстоятельство не имело значения, ибо величина площади сечения входит и в числитель и в знаменатель этого отношения. Но за меру намагничивания мы выбрали ρ а з н о с т ь этих потоков; поэтому сечение соленоида должно быть вполне определенное и мы условимся брать его равным 1 см^2 .

Изучение зависимости намагничивания железа и других ферромагнитных материалов от напряженности внешнего магнитного поля обнаруживает ряд особенностей этих веществ, имеющих важное практическое значение. Возьмем кусок ненамагниченного железа, поместим его в магнитное поле и будем измерять намагничивание железа I , постепенно увеличивая напряженность внешнего магнитного поля H : Намагничивание I возрастает сначала резко; затем все медленнее и, наконец, при значениях H около нескольких сот эрстед намагничивание перестает возрастать: все элементарные токи уже ориентированы, железо достигло магнитного насыщения. Графически зависимость величины I от H в описываемом опыте изображается кривой OA на рис. 293. Горизонтальная часть этой кривой вблизи A соответствует магнитному насыщению.

Достигнув насыщения, начнем ослаблять внешнее магнитное поле. При этом намагничивание железа уменьшается, но убывание это идет медленнее, чем раньше шло его возрастание. Зависимость между величинами I и H в этом случае изображается ветвью кривой AC на рис. 293. Мы видим, таким образом, что одному и тому же значению H могут соответствовать различные значения намагничивания (точки x , x' и x'' на рис. 293) в зависимости от того, подходим ли мы к этому значению со стороны малых или со стороны больших значений H . Намагничивание железа зависит, стало быть, не только от того, в каком поле данный кусок находится, но и от предыдущей истории этого куска. Это явление получило название магнитного гистерезиса.

Когда внешнее магнитное поле становится равным нулю, железо продолжает сохранять некоторое остаточное намагничивание (§ 122), величина которого характеризуется отрезком OC нашего графика. В этом и заключается причина того, что из железа или стали можно изготовлять постоянные магниты.

Для дальнейшего размагничивания железа нужно приложить внешнее магнитное поле, направленное в противополо-

в о п о л о ж н у ю сторону. Ход изменения намагничивания I при возрастании напряженности этого противоположно направленного поля изображается ветвью CDE кривой. Лишь когда напряженность этого поля достигнет определенного значения (в нашем опыте значения, изображаемого отрезком OD), железо будет полностью размагничено (точка D). Таким образом, величина напряженности размагничивающего поля (отрезок OD) является мерой того, насколько прочно удерживается состояние намагничивания железа. Ее называют коэрцитивной силой. При уменьшении напряженности поля обратного направления и затем при возрастании напряженности поля первоначального направления ход изменения намагничивания железа изображается ветвью $EC'A$.

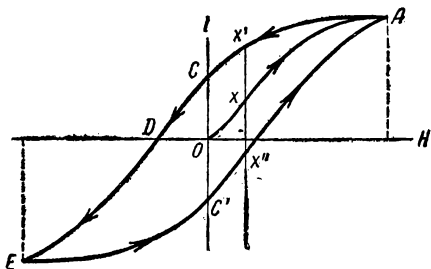


Рис. 293. Кривая намагничивания железа: зависимость намагничивания I от напряженности внешнего магнитного поля H . Стрелки указывают направление процесса.

При новом повторении всего цикла размагничивания, перемагничивания и повторного намагничивания железа в первоначальном направлении форма этой кривой повторяется¹⁾. Из рис. 293 видно, что эта кривая, изображающая ход зависимости намагничивания железа I от напряженности внешнего поля H , имеет вид петли. Ее называют петлей гистерезиса для данного сорта железа или стали.

Форма петли гистерезиса является важнейшей характеристикой магнитных свойств того или иного ферромагнитного материала. В частности, зная ее, мы можем определить такие важные характеристики этого материала, как его магнитное насыщение, остаточное намагничивание и коэрцитивную силу. На рис. 294 показана форма петли гистерезиса для различ-

¹⁾ Ветвь OA изображает ход намагничивания исходного ненамагниченного материала и не повторяется при повторных циклах. Для того чтобы вновь воспроизвести ветвь OA , необходимо привести материал в первоначальное ненамагниченное состояние. Для этого достаточно, например, сильно нагреть его.

ных сортов железа и стали. По форме этой петли можно выбрать материал, который наилучшим образом подходит для той или иной практической задачи. Так, для изготовления постоянных магнитов необходим материал с большой коэрцитивной силой (сталь и особенно специальные сорта кабылтовой стали); для электрических машин и особенно для трансформаторов выгодны материалы с очень малой

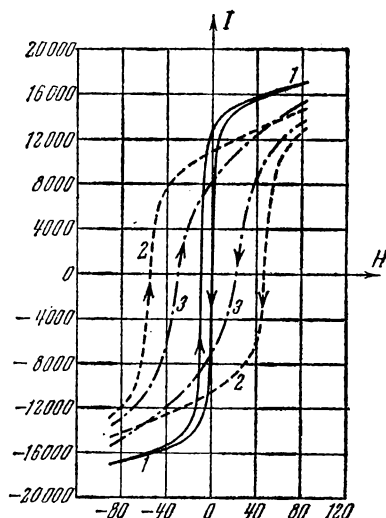


Рис. 294. Кривые намагничивания для различных сортов железа и стали: 1 — мягкое железо; 2 — закаленная сталь; 3 — незакаленная сталь.

площадью петли гистерезиса, ибо они, как оказывается, меньше всего нагреваются при перемагничивании¹⁾; для некоторых специальных приборов важны материалы, магнитное насыщение которых достигается при малых полях и т. д.

В отличие от тел парамагнитных и диамагнитных (см. стр. 392) для ферромагнетиков величина $\mu = \frac{\Phi}{\Phi_0}$ не остается постоянной, а зависит от напряженности внешнего намагничивающего поля H . Эта зависимость для магнитного сплава (пермаллоя) и для мягкого железа

показана на рис. 295. Как мы видим, величина μ имеет малые начальные значения в слабых полях, затем нарастает до максимального значения и при дальнейшем увеличении поля в катушке снова уменьшается.

Важно отметить, что при достижении определенной температуры магнитная проницаемость ферромаг-

¹⁾ Речь идет не о том нагревании под действием вихревых токов Фуко, которое испытывают в се металлы, помещенные в переменное магнитное поле, но о нагревании ферромагнитных тел, обусловленном их перемагничиванием и связанном со своеобразным внутренним трением в перемагничиваемом веществе.

нитных тел резко падает до значения, близкого к 1. Эта температура, характерная для каждого ферромагнитного вещества, носит название точки Кюри¹⁾. При температурах выше точки Кюри все ферромагнитные тела становятся парамагнитными. У железа точка Кюри равна 767° С, у никеля 360° С, у кобальта около 1130° С.

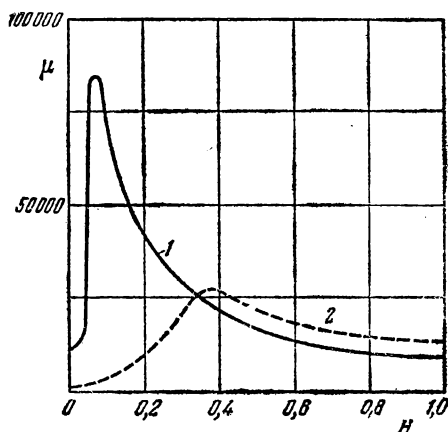


Рис. 295. Зависимость μ от H у магнитного сплава пермаллоя (1) и у мягкого железа (2).

У некоторых ферромагнитных сплавов точка Кюри лежит вблизи 100° С.

Упражнение 150.1. Какой из ферромагнитных материалов, приведенных на рис. 294, наиболее пригоден для постоянных магнитов? Какой из них наиболее пригоден для электромагнитов с быстрой регулировкой подъемной силы?

150.2. Можно ли электромагнитным краном переносить раскаленные стальные болванки?

§ 151. Основы теории ферромагнетизма. В отличие от диамагнетизма и парамагнетизма, которые являются свойствами отдельных атомов или молекул вещества, ферромагнитные свойства вещества объясняются особенностями его кристаллической структуры. Атомы железа, если взять их, например, в парооб-

¹⁾ Пьер Кюри (1859—1906) — французский физик.

разном состоянии, сами по себе диамагнитны или лишь слабо парамагнитны. *Ферромагнетизм есть свойство железа в твердом состоянии, т. е. свойство кристаллов железа.*

В этом нас убеждает ряд фактов. Прежде всего на это указывает зависимость магнитных свойств железа и других ферромагнитных материалов от обработки, изменяющей их кристаллическое строение (закалка, отжиг). Далее оказывается, что из парамагнитных и диамагнитных металлов можно изготовить сплавы, обладающие высокими ферромагнитными свойствами. Таков, например, сплав Гойслера, почти не уступающий по своим магнитным свойствам железу, хотя он состоит из таких слабо магнитных металлов, как медь (60%), марганец (25%) и алюминий (15%). С другой стороны, некоторые сплавы из ферромагнитных материалов, например сплав из 75% железа и 25% никеля, почти не магнитны. Наконец, самым веским подтверждением является то, что при достижении определенной температуры (точка Кюри) все ферромагнитные вещества теряют свои ферромагнитные свойства.

Ферромагнитные вещества отличаются от парамагнитных не только весьма большим значением магнитной проницаемости μ и ее зависимостью от напряженности поля, но и весьма своеобразной связью между намагничиванием и напряженностью намагничивающего поля. Эта особенность находит свое выражение в явлении гистерезиса со всеми его следствиями: наличием остаточного намагничивания и коэрцитивной силы.

В чем причина гистерезиса? Вид кривых рис. 293 и 294,— различие между ходом нарастания намагничивания ферромагнетика при увеличении поля H и ходом его размагничивания при уменьшении H ,— показывает, что при изменении намагничивания ферромагнетика, т. е. при увеличении или уменьшении напряженности внешнего поля, ориентация и дезориентация элементарных магнитов не сразу следует за полем, а происходит с известным отставанием. Подробное изучение процессов намагничивания и размагничивания железа и других ферромагнитных веществ показало, что ферромагнитные свойства вещества определяются не магнитными свойствами отдельных атомов или молекул, которые сами по себе парамагнитны, а намагничиванием целых областей, называемых доменами¹⁾,— небольших участков вещества, содержащих очень большое количество атомов. Взаимодействие магнитных моментов отдельных атомов ферромагнетика приводит к созданию чрезвычайно сильных внутренних магнитных полей, действующих в пределах каждой такой области и выстраивающих, в пределах этой области, все атомные магнитики параллельно друг другу, как показано на рис. 296. Таким образом, даже при отсутствии внешнего поля ферромагнитное вещество состоит из ряда отдельных областей, каждая из которых самопроизвольно намагничена до

¹⁾ Поэтому вся теория часто называется «домённой».

на с а щ е н и я. Но направление намагничивания для разных областей различно, так что вследствие хаотичности распределения этих областей тело в целом оказывается в отсутствии внешнего поля ненамагниченным.*

Под влиянием внешнего поля происходит перестройка и перегруппировка таких «областей самопроизвольного намагничивания», в результате которой получают преимущество области, намагничивание которых параллельно внешнему полю, и вещество в целом оказывается намагниченным.

Один из примеров такой перестройки областей самопроизвольного намагничивания показан на рис. 296. Здесь схематически изображены две смежные области, направления намагничивания которых перпендикулярны друг к другу. При наложении поля H часть атомов области B , в которой намагничивание перпендикулярно к полю, на границе ее с областью A , в которой намагничивание параллельно полю, поворачивается, так что направление их магнитного момента становится параллельным полю. В результате область A , намагниченная параллельно внешнему полю, расширяется за счет тех областей, в которых направление намагничивания образует большие углы с направлением поля, и возникает преимущественное намагничивание тела по направлению внешнего поля. В очень сильных внешних полях возможны и повороты направления ориентации всех атомов в пределах целой области.

При снятии (уменьшении) внешнего поля происходит обратный процесс распада и дезориентации этих областей, т. е. размагничивание тела.

Ввиду больших по сравнению с атомами размеров «областей самопроизвольного намагничивания» как процесс ориентации их, так и обратный процесс дезориентации происходит с гораздо большими затруднениями, чем установление ориентации или дезориентации отдельных молекул или атомов, имеющее место в парамагнитных и диамагнитных телах. Этим и объясняется отставание намагничивания и размагничивания от изменения внешнего поля, т. е. гистерезис ферромагнитных тел.

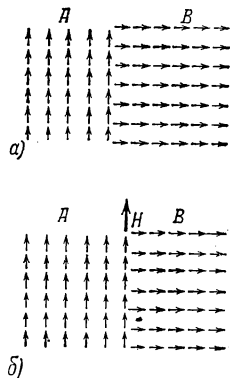


Рис. 296. Схема, иллюстрирующая ориентацию молекулярных магнитов в «областях самопроизвольного намагничивания» A и B . а) Внешнее магнитное поле отсутствует; б) под действием внешнего магнитного поля H области A и B перестраиваются.

ГЛАВА XVII

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

§ 152. Постоянная и переменная электродвижущая сила. В тех генераторах электрического тока, с которыми мы знакомимся до сих пор — электростатических машинах (§ 8), гальванических элементах (§ 75), аккумуляторах (§ 79) и термоэлементах (§ 83), — э. д. с. с течением времени не меняла своего направления: положительный электрод всегда оставался положительным, отрицательный — отрицательным, и ток во внешней цепи постоянно шел в одном и том же направлении: от положительного электрода к отрицательному. Такой ток называют **п р я м ы м**, или **п о с т о я н н ы м**. До тех пор, пока не происходило никаких внутренних изменений в самом генераторе, т. е. пока не сказывались, например, явления поляризации электродов в гальванических элементах, или не менялась скорость вращения электростатической машины, или не менялась температура между спаями термоэлемента, — оставалась постоянной и величина э. д. с., а стало быть, и напряжение на зажимах генератора и величина тока в цепи.

Напротив, в генераторах, установленных на наших электростанциях и дающих ток, которым мы пользуемся для освещения, приведения в действие электродвигателей (моторов) и для других целей, всегда возникает **п е р е м е н н а я** э. д. с., непрерывно изменяющаяся по величине и много раз в секунду меняющая свое направление. С некоторыми деталями устройства этих генераторов мы познакомимся в следующей главе, но для понимания того, каким образом в них создается переменная э. д. с., нам необходимо уже сейчас выяснить основной принцип их устройства.

В современной технике применяются почти исключительно индукционные генераторы, т. е. машины, в которых э. д. с. возникает в результате процесса электромагнитной индукции. Основная схема устройства такого генератора, на которой видны все принципиально важные его детали, показана на рис. 297. Между полюсами сильного магнита NS , т. е. в магнитном поле, вращается проволоочный виток, концы которого припаяны к кольцам A и B , вращающимся вместе с рамкой; к этим кольцам прижимаются пружинящие пластинки P и Q (так называемые

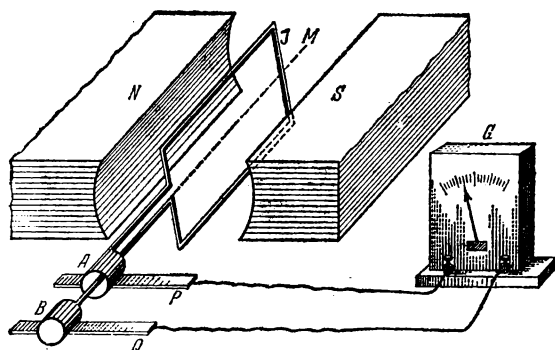


Рис. 297. Модель индукционного генератора. При вращении рамки J в магнитном поле в ней возникают индуцированная э. д. с. и ток, измеряемый гальванометром G ; M — ось вращения.

щ е т к и), от которых идут провода к внешней цепи. При вращении витка в магнитном поле пронизывающий его магнитный поток все время изменяется, и следовательно, в витке возникает индуцированная э. д. с. Таким образом, процесс, происходящий во всех промышленных генераторах тока, это — повторение в гигантских масштабах основного индукционного опыта Фарадея, который мы рассмотрели в § 139.

Рассмотрим теперь несколько подробнее, какова будет возникающая в нашем витке индуцированная э. д. с. Для простоты будем считать магнитное поле, в котором вращается рамка, однородным. Магнитный поток через наш виток Φ , как мы знаем (§ 139), есть произведение напряженности магнитного поля на площадь витка и на синус угла ϕ

между плоскостью витка и направлением поля:

$$\Phi = H \cdot S \cdot \sin \varphi.$$

Если виток вращается равномерно и совершает полный оборот за время T , то за одну секунду наша рамка поворачивается на угол $\frac{2\pi}{T}$ радианов. Поэтому, если мы будем время отсчитывать от того момента, когда наша рамка стояла параллельно линиям поля, то значение угла φ в некоторый момент времени t будет равно $\varphi = \frac{2\pi}{T} t$. Обозначая частоту вращения рамки, т. е. число ее оборотов в секунду буквой f , а угловую скорость (т. I, «Механика») буквой ω , мы можем написать, что

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{и} \quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}.$$

Стало быть,

$$\varphi = \omega t.$$

Подставив это выражение в формулу для величины магнитного потока, мы увидим, что закон его изменения с течением времени имеет вид:

$$\Phi = H \cdot S \cdot \sin \omega t. \quad (17,1)$$

График, изображающий зависимость магнитного потока через наш виток от времени, представляет собой, следовательно, синусоиду (рис. 298, а). Магнитный поток меняет свой знак, как мы видим, два раза за каждый оборот рамки, обращаясь в нуль в те моменты, когда она параллельна направлению поля, и достигая максимальных значений (того или иного знака) в моменты, когда она перпендикулярна к полю.

Индукцируемая в рамке э. д. с. определяется не значением самого магнитного потока, а скоростью его изменения, т. е. величиной $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ (§ 142). Нетрудно видеть, что и эта величина не остается постоянной, а все время изменяется при вращении рамки. На рис. 298, а показаны значения изменения магнитного потока $\Delta \Phi$ за одинаковые промежутки времени Δt для момента $t=0$, когда $\Phi=0$, и для момента около $t=\frac{T}{4}$, когда Φ имеет максимальное значение. Первое значение $\Delta \Phi$ гораздо больше

второго, и следовательно, мгновенное значение индуцированной э. д. с. в момент $t=0$ имеет максимальное значение, а по мере вращения рамки убывает, достигая значения нуль к моменту $\frac{T}{4}$. При дальнейшем повороте рамки э. д. с. меняет свой знак. Действительно, по правилу Ленца (§ 140)

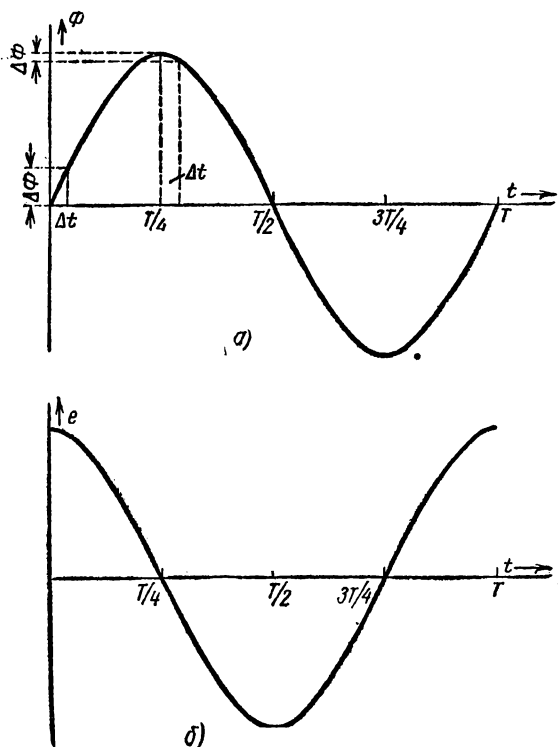


Рис. 298. Графическое изображение изменения с течением времени мгновенных значений: а) магнитного потока Φ , б) индуцированной э. д. с. e в опыте, изображенном на рис. 297.

индуцированная э. д. с. всегда направлена так, чтобы магнитное поле создаваемого ею тока тормозило процесс, вызывающий индукцию. Поэтому в течение первой четверти периода, когда магнитный поток через рамку **в о з р а с т а е т**, поле индукционного тока должно **о с л а б л я т ь**

внешнее поле H , а в течение следующей четверти периода, когда магнитное поле убывает, оно должно усиливать это поле. Отсюда ясно, что в моменты прохождения э. д. с. через нуль должно происходить изменение ее знака.

На рис. 298, б графически показана зависимость мгновенных значений индуцированной э. д. с. от времени. Можно показать, что эта кривая, как и график магнитного потока, представляет собой синусоиду, но только смещенную на четверть периода по отношению к синусоиде, изображающей поток.

Действительно, для момента t поток равняется $\Phi = H \cdot S \cdot \sin \omega t$, для момента $t + \Delta t$ поток равняется $\Phi' = H \cdot S \cdot \sin \omega (t + \Delta t)$. Следовательно, за время Δt изменение потока $\Delta \Phi = \Phi' - \Phi = H \cdot S \cdot [\sin \omega (t + \Delta t) - \sin \omega t]$. Согласно известной теореме тригонометрии это выражение можно представить в виде:

$$\Delta \Phi = 2H \cdot S \cdot \cos \left[\omega \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right] \cdot \sin \frac{\omega \Delta t}{2}.$$

Если Δt очень мало, то $\sin \frac{\omega \Delta t}{2} = \frac{\omega \Delta t}{2}$, а $\cos \left[\omega \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right] = \cos \omega t$. Итак, изменение потока за малое время Δt равно $\Delta \Phi = H \cdot S \cdot \omega \cdot \cos \omega t \cdot \Delta t$. Следовательно, электродвижущая сила, равная $-\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$, есть

$$E = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\omega \cdot H \cdot S \cdot \cos \omega t = H \cdot S \cdot \omega \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

т. е. действительно выражается синусоидой той же частоты, но сдвинутой на $\frac{\pi}{2}$ (четверть периода).

Само собой разумеется, что по такому же закону синусоиды изменяется и мгновенное значение напряжения u на зажимах машины или между двумя любыми точками сети. Графики изменения этой величины имеют такой же вид, как и приведенные на рис. 298 графики индуцированной э. д. с. Говорят, что такого рода кривые воспроизводят «форму» переменного напряжения. Ток, возникающий под влиянием переменного напряжения, также будет переменным, и «форма» его подобна «форме» напряжения.

Не только в нашей модели, но и в машинах, применяемых в электротехнике, мы в подавляющем большинстве случаев имеем дело с напряжениями и токами, которые можно считать синусоидальными. Закон

изменения мгновенных значений этих величин с временем выражается формулами:

$$u = U_m \cdot \sin \omega t, \quad i = I_m \cdot \sin \omega t, \quad (17,2)$$

причем через U_m и I_m обозначены максимальные значения напряжения и тока.

§ 153. Опытное исследование формы переменного тока. Осциллограф. В том, что ток, получаемый нами от электростанций, является действительно переменным, т. е. много раз в секунду меняет свое направление, нетрудно убедиться с помощью такого простого опыта. Включим в сеть обычную электрическую лампочку и осторожно поднесем к ней постоянный магнит так, чтобы нить лампочки была перпендикулярна к линиям его магнитного поля. Мы увидим, что при этом нить лампочки расплывается в широкую полосу. Это показывает, что нить в поле магнита быстро колеблется, отклоняясь то в одну сторону, то в другую. Но мы знаем, что в постоянном магнитном поле ток о п р е д е л е н н о г о направления отклоняется в о д н у сторону. Следовательно, наш опыт показывает, что ток в нити лампы меняет свое направление много раз в секунду.

Этот простой опыт показывает нам, что ток в сети — переменный, но не дает еще возможности проследить за законом изменения мгновенных значений величины тока, т. е. изучить его форму. Если бы в опыте на рис. 297 мы вращали катушку достаточно медленно, то увидели бы, что гальванометр G во внешней цепи витка отклоняется то в одну сторону, то в другую. Следя за отклонениями его стрелки, мы могли бы составить себе некоторое представление и о форме этого тока. Однако технический переменный ток меняет свое направление настолько часто, что обычные гальванометры уже не успевают следить за его изменениями, потому что подвижная часть их (рамка) обладает слишком большой инерцией. Для изучения формы технического переменного тока и токов еще большей частоты нужны приборы более «послушные». Такие приборы, предназначенные для исследования быстропеременных токов и напряжений, называются о с ц и л л о г р а ф а м и.

Устройство простого осциллографа показано на рис. 299. По существу — это обычный зеркальный гальванометр, но только рамочка его, поворачивающаяся в магнитном поле, и зеркальце, с помощью которого мы следим за отклоне-

ниями рамки, сделаны чрезвычайно легкими. Рамка осциллографа часто представляет собой просто петлю из очень тонкой проволоки¹⁾, подвешенную на упругих растяжках в поле магнита¹⁾. Когда мы пропускаем через эту рамку переменный ток, то она, а вместе с ней и зеркальце начинают быстро колебаться; отраженное от зеркальца световое пятно («зайчик») быстро двигается по экрану то в одну сторону, то в другую, выписывая на нем прямую линию, перпендикулярную к оси вращения зеркальца.

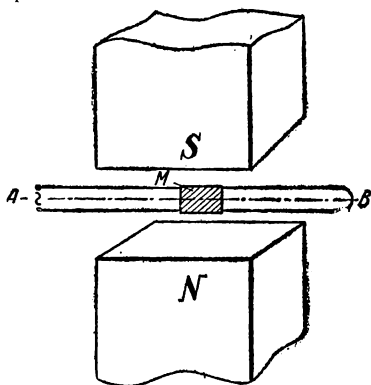


Рис. 299. Схема устройства петлевого осциллографа. Петля осциллографа, обтекаемая переменным током, колеблется вокруг оси AB , отмеченной пунктирной линией; зеркальце M , приклеенное к петле, поворачивается вокруг AB .

Для того чтобы с помощью этого прибора получить кривую, изображающую форму тока, луч света, отраженный от зеркальца, направляют не прямо на экран, а заставляют сначала отразиться от зеркала, которое быстро вращается вокруг оси, совпадающей с направлением движения зайчика. Вместо простого вращающегося зеркала удобно взять барабан с зеркальными гранями, благодаря чему луч света имеет возможность за время одного оборота барабана отразиться поочередно от каждой из его зеркаль-

ных граней. Такое расположение приборов показано на рис. 300. Здесь ось зеркальца горизонтальна, а барабан вращается вокруг вертикальной (перпендикулярной к плоскости чертежа) оси. Повороты зеркальца смещают положение зайчика на экране вверх и вниз, а вращение барабана смещает его влево или вправо. Ясно, что при сложении этих движений зайчик будет выписывать на экране некоторую кривую. При этом смещение зайчика по вертикали пропорционально мгновенному значению величины тока через прибор, а смещение его по горизонтали пропорционально времени,

¹⁾ Поэтому такой осциллограф носит название «петлевого» или «шлейфного».

так как барабан вращается равномерно. Таким образом, полученная нами кривая и изображает форму переменного тока. Опыт показывает, что для технического тока эта кривая действительно очень близка к синусоиде. Такой же вид имеют и кривые, изображающие форму технического переменного напряжения.

Описанное расположение приборов применяется преимущественно в демонстрационных опытах для того, чтобы наглядно показать «форму» переменного тока. На практике при исследованиях переменного тока обычно барабан T делают цилиндрическим и надевают на него фотографическую бумагу, на которой луч прямо выписывает соответствующую кривую.

Еще более широкое распространение получили в настоящее время так называемые электроннолучевые осциллографы¹⁾. Главной частью этих приборов является уже знакомая нам электроннолучевая трубка (рис. 191). На горизонтальные пластины трубки BB' подается напряжение, пропорциональное величине исследуемого тока. Таким образом, отклонение луча по вертикали, или смещение по вертикали яркого пятнышка на экране трубки в каждый момент времени пропорционально мгновенному значению величины тока. На вертикальные же пластины AA' с помощью специального устройства подают напряжение, которое равномерно нарастает от нуля до некоторого максимального значения, затем очень резко, практически «мгновенно», падает до нуля, снова равномерно нарастает и т. д. Форма такого «пилообразного» напряжения показана на рис. 301. При наложении такого напряжения пятнышко на экране осциллографа движется по горизонтали, затем

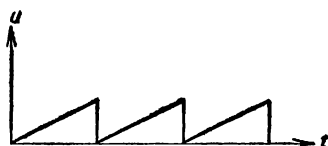


Рис. 301. «Пилообразная» форма напряжения, накладываемого на вертикальные пластинки электроннолучевого осциллографа для осуществления развертки по оси времени.

«сразу» возвращается в исходное положение, снова пробегает тот же горизонтальный отрезок и т. д. Очевидно, что при одновременном действии исследуемого напряжения, наложенного на горизонтальные пластины осциллографа BB' , и «пилообразного» напряжения на его верти-

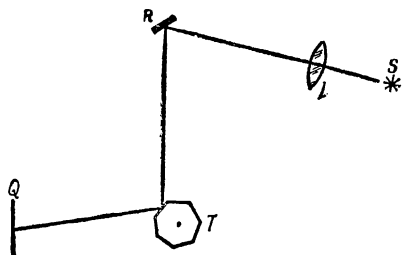


Рис. 300. Установка для наблюдения зайчика, отбрасываемого зеркальцем R осциллографа: S — источник света; L — направляющая линза; T — вращающийся зеркальный барабан; Q — экран.

¹⁾ Иногда эти приборы называют также катодными осциллографами, но название это уже устарело и лучше им не пользоваться.

кальных пластинах AA' светящаяся точка на экране будет вычерчивать кривую, дающую «форму» исследуемого напряжения или тока. Электронно-лучевой осциллограф является одним из важнейших средств исследования переменных токов и напряжений. Он чрезвычайно широко применяется в самых различных лабораториях, а также на ряде предприятий.

§ 154. Амплитуда, частота и фаза синусоидального переменного тока и напряжения. Рассмотрим несколько подробнее кривую, изображающую зависимость мгновенного значения технического переменного тока или напряжения от времени (рис. 302). Наше внимание прежде всего обращает на себя тот факт, что этот ток (или напряжение) изменяется периодически, т. е. каждое мгновенное

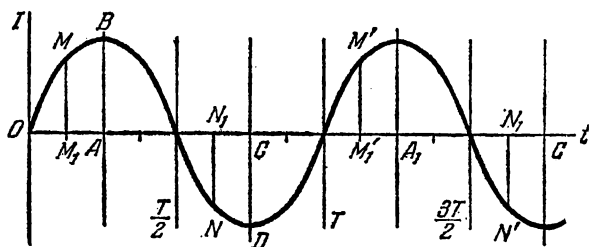


Рис. 302. Зависимость величины тока от времени у городского переменного тока.

значение этих величин, например, значение, соответствующее точке M (или точке N), повторяется в точках M' , M'' , ... (или N' , N'' , ...) через один и тот же промежуток времени. Другими словами, величина тока (или напряжения) пробегает за этот промежуток времени все возможные значения, возвращаясь к исходному, т. е. совершает полное колебание. Промежуток времени, в течение которого величина тока (или напряжения) совершает полное колебание и принимает прежнее по величине и знаку мгновенное значение, называется периодом переменного тока. Его принято обозначать буквой T . Для сетей СССР и большинства других стран $T = 1/50$ сек, а так как изменение направления тока происходит два раза в течение каждого периода, то технический ток меняет свое направление 100 раз в секунду.

Максимальное значение, которое может иметь переменный ток (или напряжение) в том или другом направлении, называется амплитудой этой величины. На рис. 302 амплитуда изображается отрезками AB , CD , ... Амплитуду

обозначают I_m или U_m , а мгновенные значения токов и напряжений — i и u .

Число полных колебаний (циклов) синусоидального тока или напряжения за 1 сек часто называют частотой соответствующей величины и обозначают буквой f . Очевидно,

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{и} \quad T = \frac{1}{f}. \quad (17,3)$$

При $T = 1/50$ сек частота технического тока $f = 50$ колебаний в секунду¹⁾. За единицу измерения частоты принимают частоту в одно колебание в секунду. Эту единицу называют 1 герц (сокращенное обозначение: *гц*). Таким образом, технический переменный ток имеет частоту 50 гц.

Вместо частоты f часто вводят также величину $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$, которую называют циклической, или круговой частотой тока (напряжения). Она представляет собой, очевидно, число полных колебаний (циклов) данной величины за 2π секунд.

Пока мы имеем дело только с одним синусоидальным переменным током или переменным напряжением, частота и амплитуда являются полными и исчерпывающими характеристиками этих величин, потому что начальный момент отсчета времени мы можем выбрать произвольно. Но когда нам приходится сопоставлять друг с другом две или несколько величин такого рода, мы должны учитывать и тот факт, что они могут достигать максимального своего значения не в один и тот же момент времени.

Две кривые на рис. 303 изображают для примера форму двух синусоидальных переменных токов с одной и той же частотой и амплитудой, но кривые эти смещены по оси абсцисс (оси времени) на отрезок, равный четверти периода. Начальная точка отсчета времени выбрана так, что для первой кривой мгновенное значение нуль достигается в моменты $0, \frac{T}{2}, T, \frac{3}{2}T, \dots$, а амплитудное — в моменты $\frac{T}{4}, \frac{3}{4}T, \frac{5}{4}T, \dots$. Вторая же кривая проходит через нулевые значения в моменты $\frac{T}{4}, \frac{3}{4}T, \frac{5}{4}T, \dots$, а через амплитуд-

¹⁾ Отметим, что понятие частоты имеет смысл только для переменных величин, меняющихся по синусоидальному закону. Мы вернемся к этому вопросу в т. III, в учении о колебаниях.

ные — в моменты $\frac{T}{2}$, T , $\frac{3}{2}T$, ... В подобных случаях говорят, что эти два тока (или две другие синусоидальные величины) сдвинуты друг относительно друга по фазе, или, иначе, что между ними существует некоторый сдвиг

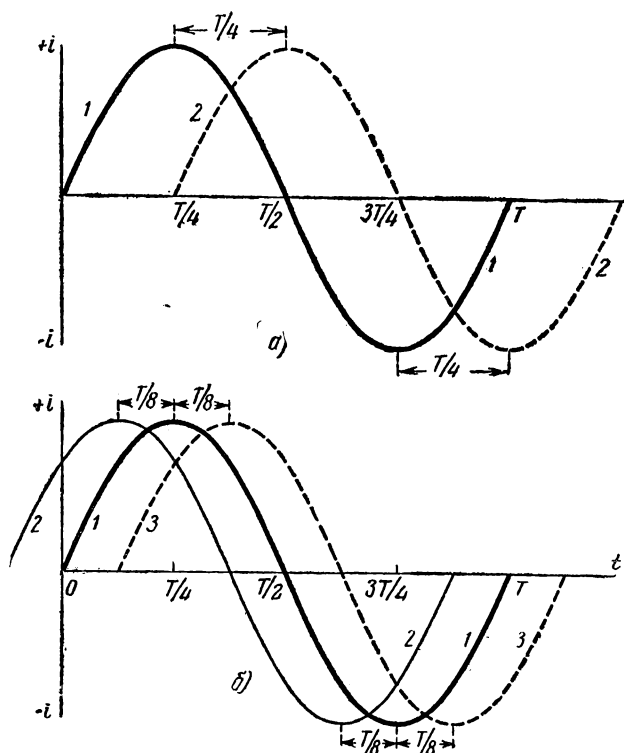


Рис. 303. а) «Форма» двух синусоидальных токов, смещенных по фазе на четверть периода друг относительно друга. б) Токи, форма которых изображается кривыми 2 и 3, смещены по фазе относительно кривой 1 на одну восьмую часть периода.

ф а з (или р а з н о с т ь ф а з), равный в данном примере четверти периода. Так как кривая 1 проходит через амплитудное значение, так же как и через любое другое соответствующее значение, р а н ь ш е, чем вторая, то говорят, что она о п е р е ж а е т кривую 2 по фазе или, иначе, что кривая 2 отстает по фазе от кривой 1.

У п р а ж н е н и е 154.1. На рис. 303, б обе кривые 2 и 3 сдвинуты относительно кривой 1 по фазе на одну восьмую периода. Определите, какая из этих кривых отстает по фазе от кривой 1 и какая опережает ее. Какова разность фаз между кривыми 2 и 3?

Во всех случаях, где нам приходится сопоставлять друг с другом синусоидальные величины или рассматривать их совместное действие (складывать или перемножать их), вопрос о соотношении фаз между этими величинами имеет очень важное значение. Таким образом, в общем случае, когда мы имеем несколько синусоидальных токов или напряжений, мы должны характеризовать каждый из них тремя величинами: частотой, амплитудой и фазой или, точнее, сдвигом фазы между данным током (или напряжением) и каким-нибудь другим, относительно которого мы рассматриваем сдвиг фаз всех остальных.

Соотношения между фазами различных синусоидальных переменных токов очень удобно изучать при помощи петлевого осциллографа, имеющего в отличие от прибора, описанного в § 153, не одну, а две отдельные рамки (петли), помещенные в общее магнитное поле (рис. 304). Развертка формы обоих токов, проходящих по этим петлям, по оси времени осуществляется одним и тем же вращающимся барабаном, так что точки двух получающихся на экране кривых, расположенные друг над другом, изображают мгновенные значения сравниваемых токов, соответствующие одному и тому же моменту времени.

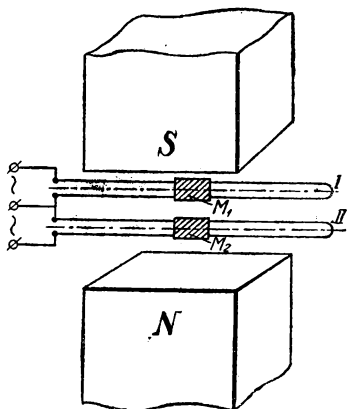


Рис. 304. Двухпетлевый осциллограф для одновременной записи формы двух переменных токов, проходящих через петли I и II .

Точное математическое определение фазы синусоидальной переменной величины (тока и напряжения) таково. Мгновенное значение этой величины в какой-нибудь момент времени t определяется значением величины ωt , стоящей под знаком функции \sin в формуле (17,2). Если мы выбрали уже начальный момент отсчета времени так, чтобы для первого тока мгновенное значение проходило через нуль в моменты $t=0$,

$\frac{T}{2}$, T , ..., то, вообще говоря, другой ток будет проходить через нуль в моменты $t=t_1, t_1+\frac{T}{2}, t_1+T, \dots$, и закон его изменения со временем будет иметь вид:

$$i = I_m \sin \omega (t - t_1) = I_m \sin (\omega t - \varphi), \quad (17,4)$$

где буквой φ обозначено произведение ωt_1 . φ а з о й тока (или напряжения) в общем случае называют значение величины, стоящей под знаком функции \sin в формуле (17,4), а величина $\varphi = \omega t_1 = 2\pi \frac{t_1}{T}$ определяет собой разность фаз сравниваемых токов (или напряжений). Если эта величина положительна, то первый ток опережает по фазе второй ток, а если она отрицательна, то первый ток отстает по фазе от второго. Как видим, фаза измеряется в градусах или в радианах.

§ 155. Величина переменного тока. Мы видели, что мгновенное значение переменного тока все время изменяется, колеблясь между нулем и максимальным значением. Тем не менее, мы характеризуем величину переменного тока, как и величину постоянного тока, определенным числом ампер. Мы говорим, например, что в одной лампочке идет ток в $\frac{1}{4}$ ампера, а в другой, более мощной, — ток в $\frac{1}{2}$ ампера и т. п. Какой же смысл мы вкладываем в это утверждение? Что означает выражение «величина переменного тока»?

Можно было бы характеризовать величину переменного тока его амплитудой. Принципиально это вполне возможно, но практически очень неудобно, потому что трудно построить приборы, непосредственно измеряющие амплитуду переменного тока. Удобнее использовать для характеристики переменного тока какое-нибудь свойство его, не зависящее от направления тока. Таким свойством является, например, способность тока нагревать проводник, по которому он проходит. Это нагревание не зависит от направления тока, оно производится переменным током при прохождении как в одном направлении, так и в обратном ему.

Представим себе переменный ток, проходящий по некоторому проводнику с сопротивлением R . В течение каждой секунды ток выделяет в проводнике определенное количество тепла, скажем Q калорий. Пропустим через тот же проводник постоянный ток, подобрав величину его так, чтобы он выделял в проводнике ежесекундно то же число Q калорий. По своему действию, или

эффективности, оба тока равны и поэтому сила постоянного тока характеризует эффективную силу переменного тока, обозначаемую $I_{эфф}$.

Сила постоянного тока выделяющего в проводнике то же количество тепла, что и наш переменный ток, называется эффективной силой переменного тока.

Пусть сила этого постоянного тока равна $I_{эфф}$ ампер. Тогда, как мы знаем (§ 56),

$$Q = I_{эфф}^2 \cdot R \cdot 0,24 \text{ кал.} \quad (17,5)$$

Силу переменного тока принято всегда характеризовать его эффективным значением. Когда мы говорим, что переменный ток равен, скажем, 2 а , то мы хотим сказать, что тепловое действие этого тока такое же, как тепловое действие постоянного тока в 2 а . В дальнейшем, говоря о силе переменного тока, мы всегда будем иметь в виду именно эффективное, или действующее, значение величин этого тока.

В случае синусоидального тока эффективная величина тока весьма просто связана с амплитудой этого тока. Если эффективная сила тока равна $I_{эфф} \text{ а}$, а амплитуда его $I_m \text{ а}$, то расчет показывает, что

$$I_{эфф} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,71 \cdot I_m. \quad (17,6)$$

Таким образом, измерив эффективную силу тока, мы можем в случае синусоидального тока легко вычислить по формуле (17,6) и его амплитуду.

Упражнения. 155.1. В проводнике сопротивлением 50 ом , по которому шел переменный ток, за $2,5$ часа выделилось 400 кал тепла. Какова эффективная сила тока и какова амплитуда тока?

155.2. В проводнике с сопротивлением 10 ом переменный ток выделяет в секунду 240 кал . Какова эффективная сила тока?

155.3. Амплитуда синусоидального переменного тока равна 5 а . Какова его эффективная сила?

155.4. Эффективная сила переменного синусоидального тока $14,2 \text{ а}$. Какова амплитуда этого тока?

§ 156. Амперметры и вольтметры переменного тока. Описанные в § 136 амперметры и вольтметры магнитоэлектрической системы пригодны, очевидно, только для измерения величины и направления постоянного тока. Измерять при их помощи величину переменного тока затруднительно, потому что при каждой перемене направления тока меняет-

ся и направление вращающего момента, поворачивающего стрелку прибора. Только снабдив прибор очень легкой подвижной системой, мы могли бы использовать его для измерений переменного тока. Так по существу устроен осциллограф (§ 153).

Гораздо удобнее для измерений переменного тока другие типы измерительных приборов, в которых направление отклонения стрелки не зависит от направления тока. Эти приборы и применяются при измерениях переменного тока. К их числу принадлежат прежде всего тепловые приборы, описанные в § 44. У них поворот стрелки вызывается удлинением нити, которая нагревается проходящим по ней током. Это нагревание не зависит от направления тока, и из самого определения действующей величины тока (§ 155) ясно, что отклонение стрелки такого прибора при прохождении через него переменного тока измеряет именно эффективное значение этого тока.

Применяются приборы и других систем, например, электромагнитные (§ 143).

Имея любой амперметр, пригодный для измерения переменного тока, мы можем превратить его в вольтметр и измерять напряжение переменного тока. Для этого достаточно снабдить прибор большим добавочным сопротивлением и переградуировать его на вольты (§ 53). Напряжение, измеряемое таким образом, также называют эффективным, или действующим, напряжением; его обозначают $U_{эфф}$.

В случае синусоидального тока эффективное напряжение $U_{эфф}$ связано с амплитудой напряжения U_m формулой, аналогичной формуле (17,6):

$$U_{эфф} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,71 U_m. \quad (17,7)$$

§ 157. Самоиндукция. Для понимания ряда очень важных и своеобразных процессов, происходящих в цепях переменного тока, нам нужно прежде всего познакомиться с особой формой процесса индукции, которая получила название самоиндукции.

Вспомним наш основной индукционный опыт. Катушка P (рис. 263) создает внутри индукционной катушки J магнитный поток. При всяком изменении этого потока в катушке J возникает индуцированный ток. Как мы видели (§ 139), индуцированный ток возникает во всяком контуре,

внутри которого изменяется магнитный поток. Но и сама катушка P находится в таком же положении. Сквозь ее витки также проходит магнитный поток, обусловливаемый магнитным полем этой же самой катушки P . Поэтому при всяком изменении магнитного поля, создаваемого током в этой катушке, т. е. при всяком изменении тока в катушке, в ней самой должны возникать и индуцированная э. д. с., и индуцированный электрический ток. Катушка P является при этом одновременно и катушкой, создающей поле, и катушкой индукционной. Индукцию в этом случае принято называть **с а м о и н д у к ц и е й**.

Обнаружить на опыте существование явления самоиндукции нетрудно. Возьмем катушку J с несколькими сотнями витков, надетую на замкнутый железный сердечник (рис. 305). К зажимам катушки a, a присоединена шестивольтовая лампочка L . Катушку можно с помощью ключа K присоединить к аккумулятору с напряжением в 1,5—2 вольта. Таким образом, когда ключ K замкнут, то к аккумулятору присоединены параллельно катушка и лампочка. Когда же ключ разомкнут, то мы имеем только одну замкнутую цепь, состоящую из витков катушки и лампочки.

Так как наша лампочка рассчитана на напряжение значительно большее, чем напряжение, даваемое аккумулятором, то пока ключ замкнут, она горит очень слабо, темно-красным накалом. В момент же размыкания ключа K она на мгновение вспыхивает очень ярким белым светом. Почему это происходит? После размыкания ключа K ток в катушке уменьшается, т. е. магнитное поле ослабевает. При этом происходит процесс самоиндукции, благодаря которому создается кратковременная, но довольно значительная э. д. с., под действием которой через катушку и лампочку протекает в течение очень короткого времени большой ток, заставляющий лампочку ярко вспыхнуть.

Для того чтобы установить направление индуцированного в процессе самоиндукции тока, заменим в опыте рис. 305 лампочку вольтметром (рис. 306), стрелка которого

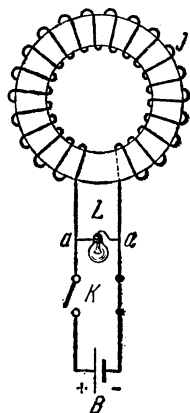


Рис. 305. Наблюдение явления самоиндукции: J — катушка; L — лампочка; K — ключ; B — аккумулятор.

отклоняется в одну сторону при прохождении тока одного направления и в другую при прохождении тока противоположного направления¹⁾. Пусть, например, при замкнутом ключе, когда ток течет в катушке в направлении MN , а в вольтметре от A к B , стрелка вольтметра отклонена вправо. При размыкании ключа обнаружится, что стрелка резко отбрасывается влево, т. е. в вольтметре ток течет от B до A , а следовательно, в катушке, образующей с вольтметром замкнутый контур $MNBAM$, ток продолжает течь в направлении MN . Таким образом, при размыкании ключа ток в MN исчезает не сразу, а продолжает идти в

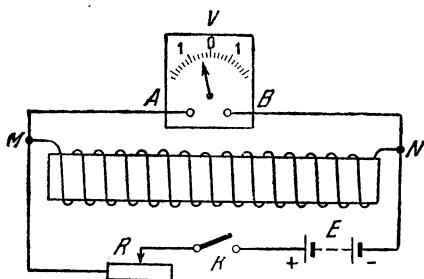


Рис. 306. Исследование направления тока самоиндукции: MN — соленоид; E — батарея; K — ключ; R — реостат; V — вольтметр.

прежнем направлении, постепенно ослабляясь. Так как ключ K разомкнут, то ясно, что этот продолжающийся ток поддерживается электродвижущей силой индукции. То же имело бы место, если бы мы вместо выключения тока пытались его ослаблять (например, увеличивая сопротивление R): уменьшение тока протекает благодаря самоиндукции

замедленно, ибо ток самоиндукции течет в том же направлении, как и первичный ток. Наоборот, при усилении питающего тока э. д. с. самоиндукции будет направлена навстречу увеличивающемуся току, замедляя его нарастание. Таким образом, в согласии с общим правилом, установленным в § 140, ток самоиндукции направлен так, что он препятствует изменению величины тока, вызывающему процесс индукции.

Рассмотрим теперь явление самоиндукции с несколько иной точки зрения. Откуда берется энергия, поглощаемая лампочкой в момент ее вспышки и превращаемая в ней в

¹⁾ При постановке опыта полезно затормозить стрелку так, чтобы при длительном прохождении тока она не могла отклоняться вправо, а при размыкании могла свободно давать отброс влево. Иначе неясно, не продолжает ли стрелка свое движение вправо по инерции.

тепло и свет? Ведь вспышка происходит тогда, когда ключ K уже разомкнут. Следовательно, энергия не может браться от аккумулятора. Вспышка лампочки происходит при исчезновении тока в катушке, т. е. при исчезновении магнитного поля этой катушки. Мы приходим, таким образом, к заключению, что энергия, поглощаемая лампочкой в момент размыкания тока, была раньше запасена в виде энергии магнитного поля. Когда мы подключаем катушку к аккумулятору, мы создавали магнитное поле, на что тратился определенный запас энергии, заимствованный от аккумулятора. Когда мы выключаем ток, магнитное поле исчезает, и запасенная в нем энергия в процессе самоиндукции превращается в энергию электрического тока в лампочке.

У п р а ж н е н и я. 157.1. Почему при включении тока в обмотке электромагнита полная сила тока устанавливается не сразу?

157.2. Почему при быстром выключении электромагнита ток на мгновение резко возрастает (иногда в такой мере, что может причинить вред, и поэтому выключают ток обычно постепенно, вводя реостат)?

В § 38 мы видели, что электрическое поле обладает определенным запасом энергии, равным той работе, которая была затрачена на разделение зарядов и создание этого поля.

Описанные выше явления самоиндукции наглядно показывают, что и *магнитное поле обладает некоторым запасом энергии*. Эта энергия затрачивается при создании магнитного поля. Ее можно получить обратно при исчезновении магнитного поля.

У п р а ж н е н и я. 157.3. При замыкании тока от одного или нескольких аккумуляторов искра не получается, а при размыкании этого тока получается. Почему? Усилится ли искра при размыкании тока большей величины в цепи? При каком устройстве цепи можно увеличить этот эффект?

157.4. К батарее аккумулятора присоединены параллельно две цепи. Одна содержит лампы накаливания, другая — большой электромагнит. Величина тока в обеих цепях одна и та же. При размыкании какой цепи будет наблюдаться более сильная искра? Почему?

§ 158. Индуктивность катушки. При самоиндукции, как и при всяком процессе индукции, *индуцированная в нашей катушке электродвижущая сила пропорциональна скорости изменения магнитного потока через витки катушки (§ 142)*. В е л и ч и н а же этого магнитного потока пропорциональна величине тока в цепи.

Если в некоторый момент t_1 ток в цепи имеет величину i_1 , то магнитный поток Φ_1 будет пропорционален i_1 , т. е.

$$\Phi_1 = L \cdot i_1, \quad (17,8)$$

где L — множитель пропорциональности, зависящий от числа витков, размера и формы катушек и, следовательно, имеющих различные значения для различных катушек. Пусть через небольшой промежуток времени, к моменту t_2 сила тока в цепи стала равна i_2 и, следовательно, в этот момент магнитный поток $\Phi_2 = Li_2$.

Таким образом, за время $t_2 - t_1$ величина магнитного потока изменилась на $\Phi_2 - \Phi_1 = L \cdot (i_2 - i_1)$. Обозначив, как и прежде, небольшие разности $(\Phi_2 - \Phi_1)$, $(i_2 - i_1)$, $(t_2 - t_1)$ соответственно через $\Delta\Phi$, Δi , Δt , найдем (§ 142) э. д. с. индукции с помощью соотношения

$$E_{\text{инд}} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = L_{\text{инд}} \frac{\Delta i}{\Delta t}. \quad (17,9)$$

Характеризующий нашу катушку множитель L называется индуктивностью катушки. Если катушка наша такова, что при изменении тока на 1 а ($\Delta i = 1$ а) в течение 1 сек ($\Delta t = 1$ сек) в цепи возникает электродвижущая сила в 1 в ($E_{\text{инд}} = 1$ в), то индуктивность подобной катушки принимают за единицу для измерения индуктивности. Эта единица получила название генри (сокращенно гн)¹⁾. Таким образом, если измерять индуктивность катушки в генри, ток в амперах, а время в секундах, то электродвижущая сила самоиндукции выразится с помощью формулы (17,9) в вольтах. Если, например, индуктивность катушки равна 5 гн и ток в ней изменяется на 1 а за $\frac{1}{50}$ часть секунды, то средняя индуцированная электродвижущая сила

$$E_{\text{инд}} = 5 \cdot \frac{1}{\frac{1}{50}} = 250 \text{ в.}$$

Генри является единицей индуктивности и в системе СИ, причем, согласно определению единиц генри и вебер (§ 142), если в формуле (17,8) измерять индуктивность в генри, а ток в амперах, то значение Φ получится в веберах.

¹⁾ Название установлено в честь Джозефа Генри (1797—1878) — американского физика.

Нетрудно видеть, что индуктивность катушки тем больше, чем больше площадь ее сечения и чем больше она содержит витков, ибо оба эти условия увеличивают магнитный поток через катушку при одном и том же токе в ней. Очень сильно возрастает магнитный поток через катушку, если в нее вставить железный сердечник (§ 145). Поэтому катушка с железным сердечником обладает гораздо большей индуктивностью, чем такая же по размерам катушка без сердечника.

Явление индукции, а следовательно, и самоиндукции происходит не только в катушках, но и в проводниках любой формы, в том числе и в прямых линейных проводниках. Поэтому любой проводник характеризуется определенным значением индуктивности. Однако для большинства проводников, не имеющих формы катушки, индуктивность настолько мала, что обычно на самоиндукцию в таких проводниках можно не обращать внимания. Только при очень быстрых изменениях величины тока, когда отношение $\Delta i / \Delta t$ становится очень большим, приходится считаться с электродвижущей силой самоиндукции, возникающей даже в таких линейных проводниках.

Упражнения. 158.1. Чему равняется индуктивность катушки, у которой индуцируется э. д. с., равная 50 в, при изменении тока на 0,02 а за 0,01 сек?

158.2. Как уменьшить индуктивность катушки при условии, что ее длина и поперечное сечение останутся неизменными?

158.3. Зависит ли индуктивность катушки с железным сердечником от величины тока в ней?

§ 159. Прохождение переменного тока через конденсаторы и катушки с большой индуктивностью. Быстрое изменение величины и направления, характеризующее переменный ток, приводит к ряду важнейших особенностей, отличающих действие переменного тока от тока постоянного. Некоторые из этих особенностей отчетливо выступают при следующих опытах.

1) **Прохождение переменного тока через конденсатор.** Пусть в нашем распоряжении имеется источник постоянного тока с напряжением в 12 в (аккумуляторная батарея) и источник переменного тока с напряжением также в 12 в. Присоединив к любому из этих источников маленькую лампу накаливания, мы увидим, что обе лампы горят одинаково ярко (рис. 307, а). Включим теперь в цепь как первой, так и второй лампы конденсатор большой емкости (рис. 307, б). Мы обнаружим, что в случае постоянного тока лампочка не накаливается вовсе, а в случае переменного тока накал ее остается почти таким

же, как раньше. Отсутствие накала в цепи постоянного тока легко понять: между обкладками конденсатора имеется изолирующая прослойка, так что цепь разомкнута. Накал же лампочки в цепи переменного тока кажется весьма поразительным.

Однако, если вдуматься, то в нем нет ничего загадочного. Мы имеем здесь только частое повторение хорошо знакомого нам процесса зарядки и разрядки конденсатора. Когда мы присоединяем (рис. 307, а) конденсатор AB к источнику напряжения (повернув рычаг

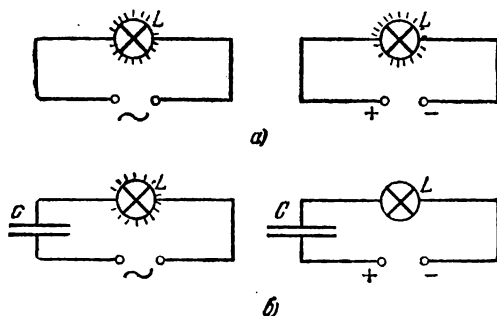


Рис. 307. Прохождение переменного тока через конденсатор. а) Лампочки L , включенные в цепь тока постоянного (справа) или переменного (слева), накаливаются одинаково. б) В цепь последовательно с лампочками включен конденсатор C . Постоянный ток прекращается, переменный ток продолжает идти и накаливает лампочку.

переключателя налево), то по проводам идет ток до тех пор, пока заряды, накопившиеся на обкладках конденсатора, не создадут разность потенциалов, уравнивающую напряжение источника. В конденсаторе при этом создается электрическое поле, в котором сосредоточен определенный запас энергии. Когда же мы соединим обкладки заряженного конденсатора проводником, отъединив источник напряжения (повернув рычаг переключателя направо), то заряд будет по проводнику стекать с одной обкладки на другую, и в проводнике, включающем лампочку, пройдет кратковременный ток. Поле в конденсаторе исчезает, и запасенная в нем энергия тратится на накал лампочки.

То, что происходит при прохождении переменного тока через конденсатор, очень наглядно поясняет опыт,

изображенный на рис. 308, б. Поворачивая рычаг переключателя K направо, мы соединяем конденсатор с батареей, причем обкладка A заряжается положительно, а обкладка B — отрицательно. При среднем положении переключателя, когда цепь разомкнута, конденсатор разряжается через лампочку L . При повороте ручки переключателя налево конденсатор снова заряжается, но на этот раз обкладка A заряжается отрицательно, а обкладка B положительно. Двигая быстро рычаг переключателя то в одну сторону, то в другую, мы увидим, что при каждой смене контакта лампа на мгновение вспыхивает, т. е. через нее проходит кратковременный ток. Если производить переключения достаточно быстро, то вспышки лампочки следуют настолько быстро друг за другом, что она будет гореть непрерывно; при этом через нее течет ток, часто меняющий свое направление. В конденсаторе при этом все время будет меняться электрическое поле: оно будет то создаваться, то исчезать, то вновь создаваться с обратным направлением. То же происходит, очевидно, и тогда, когда мы включаем конденсатор в цепь переменного тока (рис. 308, в).

2) Прохождение переменного тока через катушку с большой индуктивностью. Включим в цепь рис. 308 вместо конденсаторов катушку из медной проволоки с большим числом витков, внутрь которых помещен железный сердечник (рис. 309). Такие катушки обладают, как известно, большой индуктивностью (§ 145). Сопротивление же обмотки такой катушки

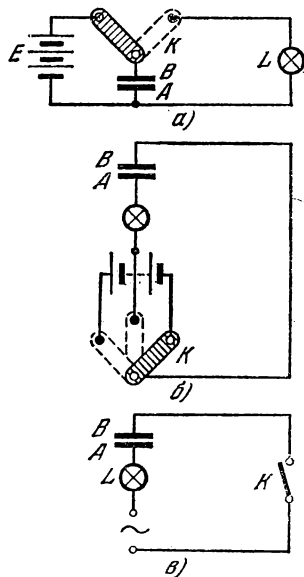


Рис. 308. При каждой перезарядке конденсатора AB лампочка L вспыхивает. а) Конденсатор AB заряжается от батареи, когда ключ K повернут налево, и разряжается через лампочку L , когда ключ K повернут направо; б) быстрая перезарядка и разрядка конденсатора AB при поворотах ключа K , причем лампочка вспыхивает; в) конденсатор AB и лампочка L в цепи переменного тока.

при постоянном токе будет невелико, так как она сделана из довольно толстой проволоки. При включении такой катушки в цепь обнаружим, что в случае постоянного тока (рис. 309, а) лампочка горит ярко, в случае же переменного тока (рис. 309, б) накала почти незаметно. Опыт с постоянным током понятен: так как сопротивление катушки мало, то присутствие ее почти не изменяет величины тока, и лампочка горит ярко. Почему же катушка ослабляет переменный ток? Будем постепенно вытягивать из катушки железный сердечник. Мы обнаружим, что лампочка накаливается

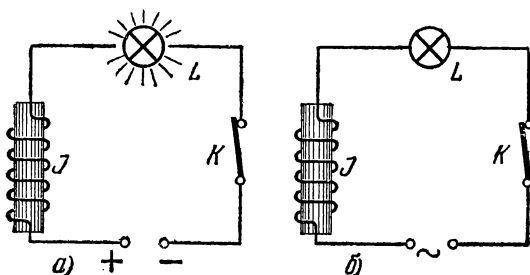


Рис. 309. Лампочка L включена в цепь тока а) постоянного, б) переменного. Последовательно с лампочкой включена катушка J . При постоянном токе лампочка горит ярко, при переменном — тускло.

все сильнее и сильнее, т. е. что по мере выдвижения сердечника ток в цепи возрастает. При полном удалении сердечника накал лампочки может дойти почти до нормального значения, если число витков катушки не очень большое. Но выдвижение сердечника уменьшает индуктивность катушки. Таким образом, мы видим, что катушка с малым сопротивлением, но с большой индуктивностью, включенная в цепь переменного тока, может значительно ослабить этот ток.

Влияние катушки с большой индуктивностью на величину переменного тока также легко объяснить. Переменный ток представляет собой ток, величина которого быстро меняется, то увеличиваясь, то уменьшаясь. При этих изменениях в цепи возникает электродвижущая сила самоиндукции, величина которой зависит от величины индуктивности нашей цепи. Направление этой э. д. с. (как мы

видели в § 140) таково, что ее действие препятствует изменению величины тока, т. е. уменьшает амплитуду тока, а следовательно, и его эффективное значение. Пока индуктивность проводов мала, эта добавочная э. д. с. тоже мала и действие ее практически незаметно. Но при наличии большой индуктивности эта добавочная э. д. с. может очень значительно влиять на величину переменного тока.

§ 160. Закон Ома для переменного тока. Емкостное и индуктивное сопротивление. В § 46 мы установили основной закон постоянного тока — закон Ома $I = \frac{U}{R}$.

Сила тока I , проходящего по некоторому участку цепи, пропорциональна напряжению U между концами этого участка, т. е. отношение $\frac{U}{I}$ сохраняет постоянное значение (не зависит от величины U или I). Этот закон сохраняет силу и для переменного тока. И в этом случае, если мы будем увеличивать напряжение между двумя точками цепи в 2, 3, 4... раза, то во столько же раз будет возрастать и ток в цепи. Как и прежде, отношение $\frac{U}{I}$ мы будем называть сопротивлением данного участка цепи, но для отличия от сопротивления при постоянном токе мы будем называть его «полным сопротивлением» данного участка и будем обозначать эту величину буквой Z . Таким образом, $Z = \frac{U}{I}$. Запишем закон Ома для переменного тока в виде

$$I = \frac{U}{Z}, \quad (17, 10)$$

причем Z есть постоянная для данной цепи величина, не зависящая от I и от U .

Мы видели в предыдущем параграфе, что величина переменного тока определяется при заданном напряжении не только тем сопротивлением R , которым обладает данная цепь при постоянном токе, но и наличием в этой цепи конденсаторов или катушек с индуктивностью. Поэтому, вообще говоря, величины R и Z различны, т. е. одна и та же цепь будет иметь различное сопротивление для постоянного и для переменного тока.

Поясним сказанное несколькими примерами. Если мы включим конденсатор в цепь постоянного тока, то цепь будет разомкнута, ток в ней I будет равен нулю и, следова-

тельно, сопротивление R этой цепи при постоянном токе бесконечно велико: $R = \infty$. Включим теперь конденсатор с емкостью, скажем, в 10 мкф последовательно с амперметром в городскую сеть переменного тока с частотой $f = 50$ гц и напряжением 127 в. Амперметр обнаружит, что в цепи протекает переменный ток 0,4 а. Следовательно, полное сопротивление цепи переменному току, обусловленное в нашем примере емкостью конденсатора,

$$Z = \frac{127}{0,4} \approx 318 \text{ ом.}$$

Другой пример. Положим, что в цепь включена катушка из 1000 витков медной проволоки диаметром в 0,4 мм, навитых на цилиндрический железный сердечник с диаметром 10 см и длиной 50 см. Индуктивность такой катушки $L = 2,5$ гн. Нетрудно вычислить, что длина проволоки в обмотке катушки равна 314 м и сопротивление ее при постоянном токе $R = 38$ ом (см. табл. 2 на стр. 129). Поэтому, если бы мы включили эту катушку в сеть постоянного тока с напряжением 127 в, то ток через нее был бы равен $I = \frac{127}{38} = 3,3$ а. Но если ту же катушку мы включим последовательно с амперметром в цепь переменного тока с напряжением в 127 в, то окажется, что величина тока равна всего лишь 0,161 а. Таким образом, полное сопротивление нашей катушки для переменного тока с частотой 50 гц равно

$$Z = \frac{127}{0,161} = 789 \text{ ом.}$$

Во избежание недоразумений мы будем называть обычное сопротивление, которое имеет какая-нибудь цепь для постоянного тока, омическим (или активным) сопротивлением и будем обозначать его $R_{\text{ом}}$, а сопротивление, вносимое наличием в цепи конденсатора или катушки с заметной индуктивностью, мы будем называть реактивным — соответственно емкостным или индуктивным сопротивлением и обозначать $R_{\text{емк}}$ и $R_{\text{инд}}$. Название «омическое» для обычного сопротивления не очень удачно, так как и емкостное и индуктивное, и полное сопротивление тоже измеряются в омах. Но название это довольно широко распространено и, если ясно отдавать себе отчет в сути дела, то оно не может привести к недоразумениям.

Емкостное сопротивление конденсатора тем меньше, чем больше его емкость и чем больше частота переменного тока, т. е. чем короче период. Действительно, чем больше емкость конденсатора, тем больший электрический заряд накапливается на его обкладках в процессе зарядки, а чем больше частота (меньше период), тем за более короткое время этот заряд будет проходить по проводам, т. е. тем больший средний ток будет пропускаться нашим конденсатором. Итак, *при увеличении C и ω величина тока возрастает, а сопротивление уменьшается.*

Расчет и опыт показывают, что для синусоидального переменного тока

$$R_{\text{емк}} = \frac{1}{\omega C}. \quad (17,11)$$

У п р а ж н е н и е 160.1. В сеть переменного тока с частотой 50 гц включен конденсатор емкостью 20 мкф. Напряжение сети 127 в. Какой ток пройдет через конденсатор?

Индуктивное сопротивление катушки, напротив, возрастает с увеличением частоты тока и индуктивности катушки. Действительно, э. д. с. самоиндукции, уменьшающая ток в цепи, равна $L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$. Чем больше частота тока, тем быстрее происходят его изменения, т. е. тем больше отношение $\frac{\Delta i}{\Delta t}$. Таким образом, с ростом частоты тока и индуктивности катушки увеличивается и индуцируемая в ней э. д. с., стремящаяся противодействовать изменениям первичного поля. Ток при этом уменьшается, т. е. сопротивление цепи переменному току возрастает.

Расчет и опыт дают для синусоидального переменного тока

$$R_{\text{инд}} = \omega L. \quad (17,12)$$

У п р а ж н е н и е 160.2. Какой величины ток пройдет через катушку с индуктивностью 4 гн, если ее включить в сеть с напряжением $U=220$ в и частотой $n=50$ гц?

Полное сопротивление сети переменному току Z в случае, когда цепь содержит и омическое сопротивление $R_{\text{ом}}$, и индуктивное сопротивление $R_{\text{инд}}$ (или емкостное сопротивление $R_{\text{емк}}$, или то и другое), составляется из этих величин, но, вообще говоря, оно не равно простой сумме этих сопротивлений.

§ 161. Сложение токов при параллельном включении сопротивлений в цепь переменного тока. Включим в сеть переменного тока две параллельные ветви, содержащие сопротивления R' и R'' и амперметры A_1 и A_2 , измеряющие токи I_1 и I_2 в этих цепях (рис. 310). Третий амперметр A

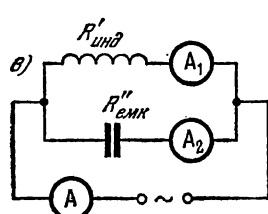
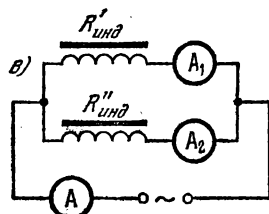
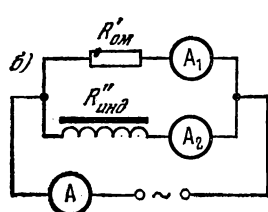
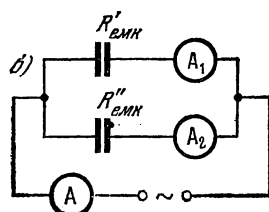
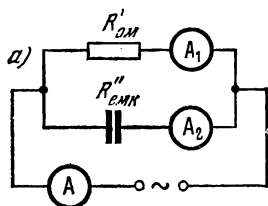
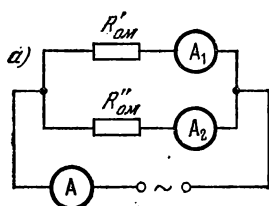


Рис. 310. Когда сопротивления в параллельных ветвях в цепи переменного тока одинаковы по своей природе, то $I = I_1 + I_2$.

Рис. 311. Когда сопротивления в параллельных ветвях переменного тока различны по своей природе, то $I_1 + I_2 > I > I_1 - I_2$.

измеряет ток в неразветвленной цепи. Положим сначала, что оба сопротивления R' и R'' являются чисто омическими, например представляют собой лампочки накаливания или реостаты, индуктивным сопротивлением которых можно пренебречь по сравнению с их омическим сопротивлением (рис. 310, а). Тогда, так же, как и в случае постоянного тока,

мы убедимся в том, что показание амперметра A равно сумме показаний амперметров A_1 и A_2 , т. е. $I = I_1 + I_2$. Если сопротивления R' и R'' представляют собой реостаты, то, меняя их сопротивления, мы можем как угодно менять каждый из токов I_1 и I_2 , но равенство $I = I_1 + I_2$ всегда будет сохраняться. То же будет иметь место и в том случае, если мы заменим оба реостата конденсаторами, т. е. если оба сопротивления R' и R'' будут чисто емкостными (рис. 310, б), или в том случае, если оба сопротивления R' и R'' являются чисто индуктивными, т. е. реостаты заменены катушками с железным сердечником, индуктивное сопротивление которых настолько больше омического, что последним можно пренебречь (рис. 310, в).

Таким образом, *если сопротивления параллельных ветвей одинаковы по своей природе, то ток в неразветвленной цепи равен сумме токов в отдельных ветвях*. Это справедливо, конечно, и в том случае, когда имеются не две ветви, а любое число их.

Заменим теперь в одной из ветвей омическое сопротивление чисто емкостным (конденсатором) или чисто индуктивным (катушкой с большой индуктивностью и малым омическим сопротивлением), рис. 311, а и б. Опыт дает в этом случае результат, кажущийся на первый взгляд странным и парадоксальным: ток в неразветвленной цепи I оказывается меньшим, чем сумма токов в обеих ветвях: $I < I_1 + I_2$.

Если, например, в случаях, показанных на рис. 311, а и б, ток в одной ветви равен 3 а , а в другой — 4 а , то амперметр в неразветвленной цепи покажет не ток в 7 а , как мы ожидали бы, а ток только в 5 а .

Ток I будет меньше суммы токов I_1 и I_2 и тогда, когда сопротивление одной ветви емкостное, а другой — индуктивное (рис. 311, в).

Таким образом, *если сопротивления параллельных ветвей различны по своей природе, то $I < I_1 + I_2$* .

Чтобы разобраться в этих явлениях, заменим амперметры на рис. 310 и 311 осциллографами и запишем форму кривой тока в каждой из параллельных ветвей¹⁾. Оказывается, что токи в каждой из ветвей не совпадают по

¹⁾ В этих опытах очень удобно пользоваться осциллографом (§ 153) с двумя петлями (§ 154). Одну из петель включают в цепь тока I , другую — в цепь одного из токов I_1 или I_2 .

ф а з е ни друг с другом, ни с током в неразветвленной цепи. В частности, *ток в цепи с чисто омическим сопротивлением опережает на четверть периода ток в цепи с чисто емкостным сопротивлением и отстает по фазе на четверть периода от тока в цепи с чисто индуктивным сопротивлением.*

В этом случае кривые, изображающие форму тока в неразветвленной цепи и в какой-нибудь из ветвей, расположены друг относительно друга так, как кривые 1 и 2 на рис. 303. В общем же случае, в зависимости от соотношения между омическим и емкостным или индуктивным сопротивлением каждой из ветвей, сдвиг фазы между током в этой ветви и неразветвленным током может иметь любое значение от нуля до $\pm 90^\circ$. Следовательно, *при смешанном сопротивлении разность фаз между токами в параллельных ветвях цепи может иметь любое значение между нулем и $\pm 180^\circ$.*

Это несовпадение фаз токов в параллельных ветвях с сопротивлениями, различными по своей природе, и является причиной тех явлений, о которых было сказано в начале этого параграфа. Действительно, для мгновенных значений токов, т. е. для тех значений, которые эти токи имеют в один и тот же момент времени, соблюдается известное правило: $i = i_1 + i_2$. Но для амплитуд (или действующих значений) этих токов это правило не соблюдается, потому что результат сложения двух синусоидальных токов или иных двух величин, изменяющихся по закону синуса, зависит от разности фаз между складываемыми величинами.

В самом деле, предположим для простоты, что амплитуды обоих складываемых токов равны, а разность фаз между ними равна нулю. Тогда в каждый момент времени мгновенное значение суммы двух токов будет равно просто удвоенному значению мгновенного значения одного из складываемых токов, т. е. форма результирующего тока будет представлять собой синусоиду с тем же периодом и фазой, но с удвоенной амплитудой. Если амплитуды складываемых токов различны (рис. 312, а), то, как нетрудно видеть, сумма их представляет собой синусоиду с амплитудой, равной сумме амплитуд складываемых токов. Это имеет место, когда разность фаз между складываемыми токами равна нулю, например, когда сопротивления в обеих параллельных ветвях одинаковы по своей природе.

Рассмотрим теперь другой крайний случай, когда складываемые токи, имея равные амплитуды, противоположны по фазе, т. е. разность фаз между ними равна 180° , или π . В этом случае в каждый момент времени мгновенные значения складываемых токов равны по величине, но противоположны по направлению. Поэтому сумма их (алгебраическая) будет постоянно равна нулю. Таким образом, при сдвиге фаз на 180° между токами в

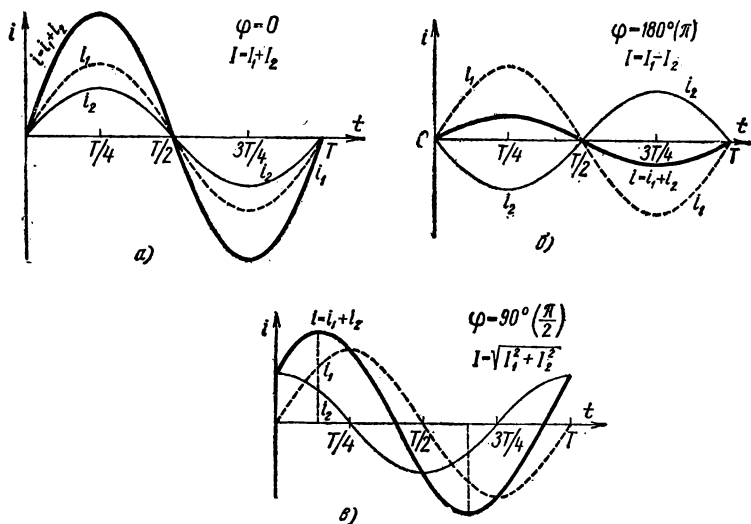


Рис. 312. Сложение двух синусоидальных переменных токов: а) складываемые токи совпадают по фазе ($\varphi=0$); б) токи противоположны по фазе, т. е. сдвинуты во времени на половину периода ($\varphi=180^\circ$ или π); в) токи сдвинуты во времени на четверть периода ($\varphi=90^\circ$ или $\pi/2$).

обеих ветвях, несмотря на наличие равных токов в каждой из параллельных ветвей, в неразветвленной цепи тока не будет. Если амплитуды обоих смещенных на 180° токов различны, то мы получим, как видно из рис. 312, б, результирующий ток с той же частотой, но с амплитудой, равной разности амплитуд складываемых токов; по фазе этот ток совпадает с током, имеющим большую амплитуду. Практически, этот случай имеет место тогда, когда в

одной из ветвей имеется чисто емкостное, а в другой — чисто индуктивное сопротивление.

В общем случае при сложении двух синусоидальных токов одной и той же частоты с продольным сдвигом фаз мы получаем всегда синусоидальный ток той же частоты с амплитудой, величина которой в зависимости от разности фаз φ имеет промежуточное значение между разностью амплитуд складываемых токов и их суммой. Для примера на рис. 312, в показано графическое сложение двух токов с разностью фаз $\varphi = 90^\circ$. С помощью циркуля легко можно убедиться в том, что каждая ордината результирующей кривой i , действительно, представляет собой алгебраическую сумму ординат кривых i_1 и i_2 с одинаковой абсциссой, т. е. для того же момента времени.

§ 162. Сложение напряжений при последовательном соединении сопротивлений в цепи переменного тока. Включим в цепь переменного тока последовательно два сопротивления R_1 и R_2 и подключим параллельно каждому из

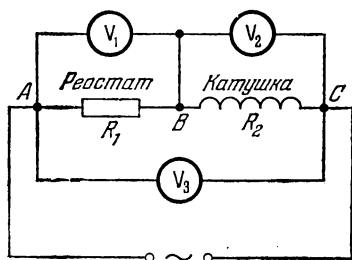


Рис. 313. Сумма напряжений на резисторе AB и индуктивном (или емкостном) сопротивлении BC не равна напряжению между концами участка цепи AC , содержащего оба эти сопротивления.

них вольтметр, измеряющий напряжения между концами соответствующего участка цепи. Вольтметр V_1 измеряет напряжение U_{AB} между точками A и B , а вольтметр V_2 — напряжение U_{BC} между точками B и C . Третий вольтметр V_3 измеряет напряжение U_{AC} между крайними точками A и C (рис. 313).

Опыт показывает, что в случае, когда оба сопротивления одинаковы по своей природе, т. е. оба являются чисто омическими, или чисто индуктивными, или чисто емкостными, то, как и в случае постоянного тока, напряжение на всем участке AC равно сумме напряжений на участках AB и BC :

$$U_{AC} = U_{AB} + U_{BC}.$$

В общем же случае, когда сопротивления R_1 и R_2 различны по природе, напряжение на всем участке

AC всегда меньше суммы напряжений на участках AB и BC :

$$U_{AC} < U_{AB} + U_{BC}. \quad (17,13)$$

Если, например, мы включим в сеть с напряжением в 120 *в* последовательно лампу с омическим сопротивлением 60 *ом* и катушку с индуктивным сопротивлением 80 *ом*, то окажется, что напряжение на лампе равно 72 *в*, а напряжение на катушке равно 96 *в*; сумма их напряжений равна $U_{AB} + U_{BC} = 168$ *в*, хотя $U_{AC} = 120$ *в*.

Причина этого в том же сдвиге фаз между напряжениями U_{AB} и U_{BC} , какой мы наблюдали между токами в параллельных ветвях цепи (§ 161). Действительно, заменив вольтметры V_1 и V_2 (рис. 313) осциллографами, можно убедиться в том, что напряжения U_{AB} и U_{BC} не совпадают по фазе. Если сопротивление R_1 омическое, а R_2 — емкостное, то напряжение U_{AB} опережает напряжение U_{BC} на четверть периода, а если сопротивление R_2 — чисто индуктивное, то напряжение U_{AB} отстает по фазе от напряжения U_{BC} на такую же величину. Кривые, изображающие форму напряжений U_{AB} и U_{BC} , были бы расположены в этом случае так же, как соответствующие кривые на рис. 312, *в*.

Для мгновенных значений напряжений всегда имеет место соотношение

$$u = u_1 + u_2,$$

но результат сложения двух синусоидальных напряжений, т. е. амплитуда и фаза результирующего напряжения, будет зависеть от разности фаз между складываемыми напряжениями так же, как и в случае токов.

§ 163. Сдвиг фазы между током и напряжением. Проведем следующий опыт. Возьмем описанный в § 154 осциллограф с двумя петлями и включим его в сеть так (рис. 314, *а*), чтобы одна его петля (I) была включена в цепь последовательно с конденсатором C , а другая (II) параллельно этому конденсатору. Очевидно, что кривая, получаемая от первой петли, изображает форму тока, проходящего через конденсатор, а вторая петля дает нам форму напряжения между обкладками конденсатора (точками A и B), потому что в этой петле осциллограф тока в каждый момент времени пропорционален напряжению U_{AB} . Опыт показывает, что в этом

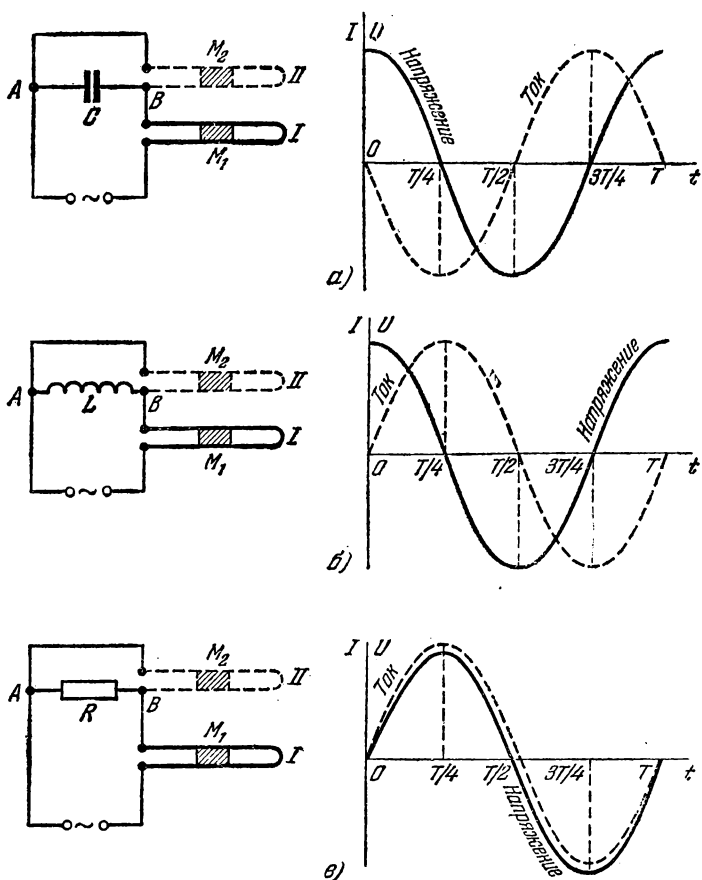


Рис. 314. Опыт для обнаружения сдвига фаз между током и напряжением. Слева — схема опыта, справа — результаты. а) Случай емкостного сопротивления; б) случай индуктивного сопротивления; в) случай омического сопротивления. I и II — петли осциллографа; M_1 и M_2 — зеркала.

случае кривые тока и напряжения смещены по фазе, причем ток опережает напряжение на четверть периода, или на $\frac{\pi}{2}$. Если бы в этом опыте мы заменили конденсатор катушкой с большой индуктивностью (рис. 314, б), то оказалось бы, что ток отстает по фазе от напряжения на четверть периода ($\frac{\pi}{2}$). Наконец, таким же образом можно было бы показать, что в случае омического сопротивления напряжение U_{AB} и ток I совпадают по фазе (рис. 314, в).

В общем случае, когда участок цепи AB представляет собой не чисто омическое и не чисто емкостное (или индуктивное) сопротивление, то напряжение U_{AB} между концами этого участка смещено относительно тока через него на некоторый угол, величина которого лежит между $+\frac{\pi}{2}$ и $-\frac{\pi}{2}$ и определяется соотношением между омическим и емкостным (или индуктивным) сопротивлением этого участка цепи.

В чем заключается физическая причина наблюдаемых сдвигов фазы между током и напряжением?

Если в цепь не входят конденсаторы и катушки самоиндукции, т. е. емкостным и индуктивным сопротивлением цепи можно пренебречь по сравнению с омическим, то ток следует за напряжением, проходя одновременно с ним через максимумы и нулевые значения, как это показано на рис. 314, в.

Если цепь имеет заметную индуктивность L , то при прохождении по ней переменного тока в цепи возникает э. д. с. самоиндукции. Эта э. д. с. по правилу Ленца направлена так, что она стремится препятствовать тем изменениям магнитного поля (а следовательно, и изменениям тока, создающего это поле), которые вызывают э. д. с. индукции. При нарастании тока э. д. с. самоиндукции препятствует этому нарастанию, и потому ток позже достигает максимума, чем в отсутствие самоиндукции. При убывании тока э. д. с. самоиндукции стремится поддерживать ток и, следовательно, нулевые значения тока будут достигнуты в более поздний момент, чем при отсутствии самоиндукции. Таким образом, при наличии самоиндукции ток отстает по фазе от тока в отсут-

ствие самоиндукции, а следовательно, о т с т а е т по фазе и от своего напряжения.

Если омическим сопротивлением цепи $R_{\text{ом}}$ можно пренебречь по сравнению с ее индуктивным сопротивлением $R_{\text{инд}} = L \cdot \omega$, то отставание тока от напряжения по времени (сдвиг фазы) равно $\frac{T}{4}$, т. е. максимум U совпадает с $I=0$, как это показано на рис. 314, б. Действительно, в этом случае падение напряжения на омическом сопротивлении, равное $R \cdot I$, есть нуль, ибо $R=0$ и, следовательно, все внешнее напряжение U уравнивается э. д. с. индукции, которая противоположна ему по направлению и равна по величине $L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} = U$. Таким образом, максимум U совпадает с максимумом $\frac{\Delta I}{\Delta t}$, т. е. наступает в тот момент, когда I меняется быстрее всего, а это бывает, когда $I=0$. Наоборот, в момент, когда I проходит через максимальное значение, изменение величины тока наименьшее ($\frac{\Delta I}{\Delta t} = 0$), т. е. в этот момент $U=0$.

Если же омическое сопротивление цепи $R_{\text{ом}}$ не настолько мало, чтобы им можно было пренебречь, то часть внешнего напряжения $R \cdot I$ падает на сопротивлении $R_{\text{ом}}$, а остальная часть уравнивается э. д. с. самоиндукции: $U = R \cdot I + L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$. В этом случае максимум I отстоит от максимума U по времени меньше, чем на $\frac{T}{4}$ (сдвиг фазы меньше $\frac{\pi}{2}$), как это изображено на рис. 315. Расчет показывает, что в этом случае отставание по фазе φ может быть вычислено по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_{\text{инд}}}{R_{\text{ом}}} = \frac{L \omega}{R_{\text{ом}}} \quad (17,14)$$

При $R=0$ имеем $\operatorname{tg} \varphi = \infty$, $\varphi = \frac{\pi}{2}$, как это объяснено выше.

Если цепь состоит из конденсатора емкости C , а омическим сопротивлением можно пренебречь, то обкладки конденсатора, присоединенные к источнику напряжения U , заряжаются, и между ними возникает напряжение V . Напряжение на конденсаторе V следует за U практически мгновенно¹⁾, т. е. достигает максимума одновременно с U и обращается в нуль, когда $U=0$.

¹⁾ Мы знаем (§ 43), что напряжение распространяется вдоль цепи с огромной скоростью $c=3 \cdot 10^{10}$ см/сек (скорость света). Так как длина

Зависимость между током I и напряжением U в этом случае показана на рис. 316, а. На рис. 316, б схематически изображен процесс перезарядки конденсатора, связанный с появлением переменного тока в цепи.

Когда конденсатор заряжен до максимума (т. е. V , а следовательно, и U имеют максимальное значение), то ток I равен нулю, и вся энергия цепи есть электростатическая энергия заряженного конденсатора

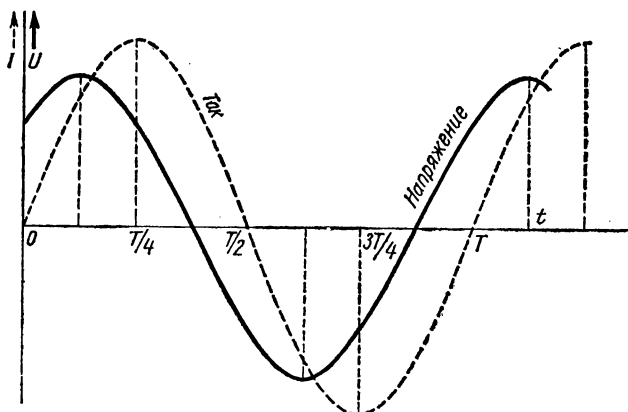


Рис. 315. Сдвиг фазы между током и напряжением для случая цепи, содержащей омическое и индуктивное сопротивление.

(рис. 316, точка А). Далее, при уменьшении U конденсатор начинает разряжаться, и в цепи появляется ток; он направлен от обкладки конденсатора А к В, т. е. навстречу напряжению U . Поэтому на рис. 316 он изображен как отрицательный (точки лежат н и ж е оси АВС...). К моменту $\frac{T}{4}$ (точка В) конденсатор полностью разряжен ($V=0$ и $U=0$), а ток достигает максимального значения; электростатическая энергия равна нулю, и вся энергия сводится к энергии магнитного поля, создаваемого то-

цепи от источника напряжения до обкладок конденсатора невелика, то напряжение на обкладках может отстать от U только на ничтожную долю секунды, т. е. практически следует за U без опоздания.

ком. Далее, напряжение U меняет знак, и ток начинает ослабевать, сохраняя прежнее направление. Когда U (а следовательно, и V) достигнет максимума, вся энергия вновь станет электростатической, и ток равняется нулю (точка C). В дальнейшем U (и V) начинает убывать, конденсатор разряжается, ток нарастает, имея теперь направление от B к A , т. е. положительное; ток доходит до

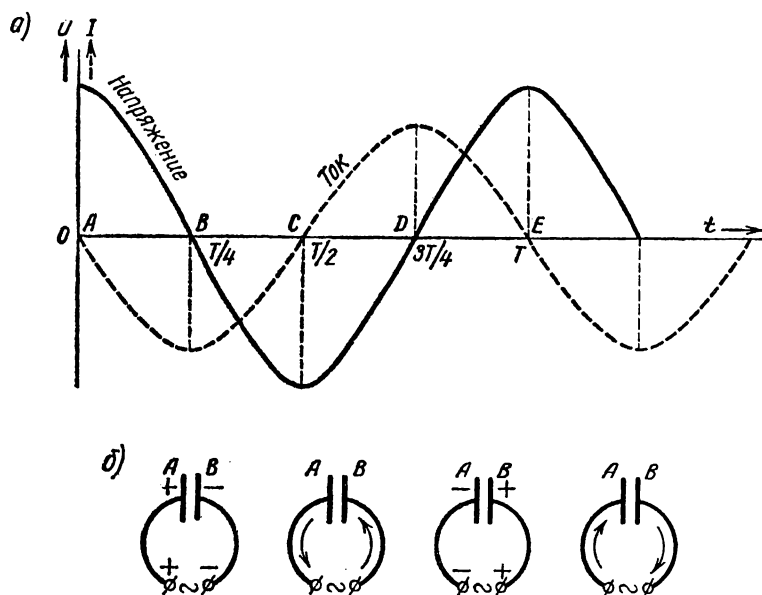


Рис. 316. а) Сдвиг фазы между напряжением и током в случае емкостного сопротивления (конденсатора) при отсутствии омического сопротивления. б) Процесс перезарядки конденсатора AB в цепи переменного тока.

максимума в момент, когда $U=0$ (точка D) и т. д. Из рис. 316 видно, что ток раньше, чем напряжение, достигает максимума и проходит через нуль, т. е. ток опережает напряжение по фазе.

И в этом случае, если омическим сопротивлением $R_{\text{ом}}$ нельзя пренебречь по сравнению с емкостным $R_{\text{емк}} = \frac{1}{\omega C}$, то ток опережает напря-

жение по времени меньше, чем на $\frac{T}{4}$ (сдвиг фазы меньше $\frac{\pi}{2}$, рис. 317). Для этого случая, как показывает расчет, сдвиг фазы φ может быть вычислен по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_{\text{емк}}}{R_{\text{ом}}} = \frac{1}{R \cdot \omega C}. \quad (17,15)$$

При $R=0$ имеем $\operatorname{tg} \varphi = \infty$ и $\varphi = \frac{\pi}{2}$, как это было объяснено выше.

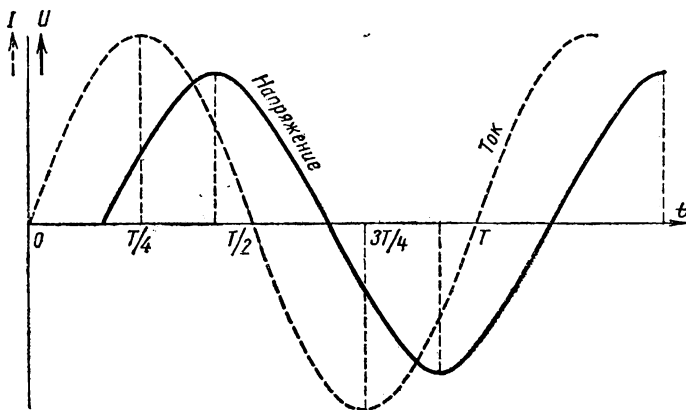


Рис. 317. Сдвиг фазы между током и напряжением в случае цепи, содержащей омическое и емкостное сопротивления.

§ 164. Мощность переменного тока. В § 58 мы разобрали вопрос о мощности постоянного электрического тока. Мы видели, что если напряжение между концами некоторого участка цепи равно U в, а величина тока в этом участке цепи равна I а, то мощность, выделяемая током в этом участке цепи, равна

$$P = I \cdot U \text{ вт} = I^2 \cdot R \text{ вт} \quad (17,16)$$

(R — «омическое» сопротивление участка цепи).

В случае переменного тока дело обстоит несколько сложнее, так как величина переменного тока определяется не только омическим сопротивлением цепи $R_{\text{ом}}$, но и ее индуктивным или емкостным сопротивлением.

Представим себе, например, что какой-нибудь участок цепи имеет только емкостное сопротивление, т. е. содержит только конденсатор. Процесс прохождения тока через конденсатор, как мы видели в § 159, представляет

собой процесс многократно повторяющейся зарядки и разрядки этого конденсатора. В течение той четверти периода, когда конденсатор заряжается, источник расходует некоторую энергию, которая запасается в конденсаторе в виде энергии его электрического поля. Но в следующую четверть периода конденсатор разряжается и отдает обратно в сеть практически всю запасенную в нем энергию. Таким образом, если пренебречь очень малыми обычно потерями энергии на нагревание диэлектрика в конденсаторе, то *прохождение тока через конденсатор не связано с выделением в нем мощности.*

То же будет иметь место и при прохождении тока через катушку, сопротивление которой можно считать чисто индуктивным. В течение той четверти периода, пока ток нарастает, в катушке создается магнитное поле, обладающее определенным запасом энергии. На создание этого поля расходуется энергия источника. Но в следующую четверть периода, когда ток уменьшается, магнитное поле исчезает, и запасенная в нем энергия в процессе самоиндукции вновь возвращается к источнику.

Мы видим, что *наличие емкостного или индуктивного сопротивления цепи* хотя и отражается на величине тока в этой цепи, но *не связано с расходом мощности в ней.* В конденсаторах и катушках с индуктивным сопротивлением энергия то берется «взаймы» у источника, то снова возвращается к нему, но она не уходит из нашей цепи, не тратится на нагревание проводников (джоулево тепло, § 56) или на совершение механической работы и т. п.

У п р а ж н е н и е 164.1. Чтобы не слепить зрителей резким переходом от темноты к свету, во многих театрах и кинематографах свет после окончания акта или сеанса включают не сразу, а постепенно. Лампы сначала начинают светиться тусклым красным светом и разгораются медленно в течение нескольких секунд. Это можно осуществить либо с помощью реостата, либо с помощью катушки сдвигающимся железным сердечником. Какой способ выгоднее?

Таким образом, при наличии в цепи заметного индуктивного и емкостного сопротивления мощность, фактически расходуемая в нашей цепи, всегда меньше чем произведение $I \cdot U$, т. е. равна

$$P = I \cdot U \cdot k, \quad (17,17)$$

где k есть некоторый коэффициент, меньший единицы, называемый *коэффициентом мощности* данной цепи.

Расчет, которого мы приводить не будем, показывает, что для синусоидальных токов этот коэффициент равен $k = \cos \varphi$, где φ есть угол сдвига фазы между током в цепи и напряжением между концами рассматриваемого ее участка. Таким образом

$$P = I \cdot U \cdot \cos \varphi. \quad (17,18)$$

Из формул (17,14) и (17,15) мы видим, что угол φ сдвига фазы между напряжением и током растет по мере увеличения отношения емкостного или индуктивного сопротивления к омическому. Но с ростом угла φ уменьшается значение $\cos \varphi$. Поэтому *коэффициент мощности прибора или машины, потребляющих переменный ток, тем меньше, чем больше его емкостное или индуктивное сопротивление по сравнению с омическим*. Он обращается в нуль для чисто индуктивного или чисто емкостного сопротивления ($\varphi = 90^\circ$, $\cos \varphi = 0$) и равен единице для чисто омического ($\varphi = 0$, $\cos \varphi = 1$).

Мы должны в заключение подчеркнуть то чрезвычайно важное народнохозяйственное значение, которое имеет борьба за всемерное увеличение коэффициента мощности наших цепей. Каждая электрическая машина (генератор), установленная на наших станциях, характеризуется своим предельным «нормальным» током I , при котором нагревание машины вследствие потерь в проводах не превышает допустимых размеров, и своим нормальным напряжением U . Произведение $I \cdot U$ называется «кажущейся» мощностью этой машины. Такую мощность машина могла бы действительно отдавать потребителям, если бы ее нагрузка была чисто омической, т. е. если бы не было сдвига фазы между током и напряжением на зажимах машины. В этом случае $\varphi = 0$ и $\cos \varphi = 1$. Но если в сети имеются заметные емкостные или индуктивные сопротивления, обуславливающие некоторый сдвиг фазы φ между током и напряжением, то $\cos \varphi < 1$, и машина не может отдать в сеть всю свою нормальную мощность. При $\cos \varphi = 0,8$, например, машина с нормальной мощностью в 100 000 *квт* может фактически дать потребителю только 80 000 *квт*. Ясно, насколько это убыточно для народного хозяйства в целом.

Долг каждого рабочего, техника или инженера, имеющего дело с машинами, потребляющими много электрической энергии, заботиться о всемерном повышении коэффициента мощности в тех установках, с которыми он работает.

В следующей главе, разбирая вопрос о работе электродвигателей, мы укажем некоторые конкретные мероприятия, которые нужно для этого проводить.

§ 165. Трансформаторы. При практическом использовании энергии электрического тока очень часто возникает необходимость изменять напряжение, даваемое каким-либо генератором. В одних случаях бывают нужны напряжения в тысячи или даже сотни тысяч вольт, в других необходимы напряжения в несколько вольт или несколько десятков вольт. Осуществить такого рода преобразования постоянного напряжения очень трудно, между тем как *переменное напряжение можно преобразовать* — повышать или понижать — весьма просто и *почти без потерь энергии*. В этом заключается одна из основных причин того, что

техника пользуется в подавляющем большинстве случаев переменным, а не постоянным током.

Приборы, с помощью которых производится преобразование напряжения переменного тока, носят название трансформаторов. Принципиальная схема устройства трансформатора показана на рис. 318. Всякий трансформатор имеет железный сердечник, на который надеты две катушки (обмотки). Концы одной из этих обмоток подключаются к источнику

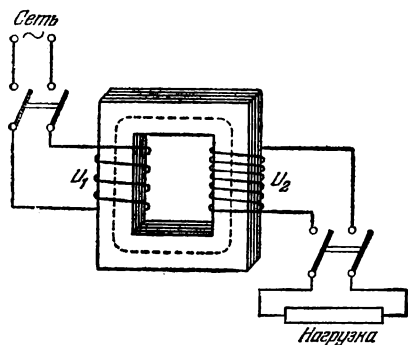


Рис. 318. Схема устройства трансформатора.

переменного тока, например, к городской сети, с напряжением U_1 ; нагрузка, т. е. те приборы, которые потребляют электрическую энергию, подключается к концам второй обмотки, на которых создается переменное напряжение U_2 , отличное от U_1 . Обмотка, подключенная к источнику энергии, называется первичной, а обмотка, к которой подключена нагрузка,

— вторичной. Если напряжение на первичной обмотке (напряжение источника) больше, чем на вторичной, т. е. $U_1 > U_2$, то трансформатор называется понижающим; если же $U_1 < U_2$, то он называется повышающим.

Когда мы подключаем трансформатор к источнику переменного напряжения, например к городской сети, то проходящий по первичной обмотке переменный ток создает переменное магнитное поле, одна из силовых линий которого показана пунктиром на рис. 318. Так как обе обмотки надеты на общий железный сердечник, то почти все силовые линии этого поля проходят через обмотки. Иначе можно сказать, что обе обмотки пронизываются одним и тем же магнитным потоком. При изменении этого потока в каждом витке обмоток как первичной, так и вторичной индуцируется одна и та же э. д. с. e .

Полная же индуцированная э. д. с. E , возникающая в каждой обмотке, равна произведению э. д. с. e на число вит-

ков в соответствующей обмотке. Если первичная обмотка имеет w_1 витков, а вторичная — w_2 витков, то индуцирующиеся в них э. д. с. равны соответственно $E_1 = ew_1$ и $E_2 = ew_2$, т. е.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (17,19)$$

При так называемом холостом ходе трансформатора, т. е. тогда, когда к концам вторичной обмотки не подключена никакая нагрузка и через нее не идет ток, напряжение на концах вторичной обмотки U_2 равно индуцирующейся в ней э. д. с. E_2 (§ 81). Что же касается э. д. с. E_1 , индуцируемой в первичной обмотке, то она по правилу Ленца (§ 140) всегда направлена противоположно приложенному к ней внешнему напряжению U_1 и при холостом ходе почти равна ему.

Действительно, мы видели (§ 163), что напряжение на участке цепи, содержащем омическое сопротивление R и индуктивность L , равно

$$U_1 = R \cdot I + L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Но при холостом ходе трансформатора его индуктивность L настолько велика, что омическим сопротивлением R можно пренебречь по сравнению с индуктивным, т. е. можно считать $R=0$. При этом

$$U_1 \approx L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} = E_1.$$

Таким образом, *отношение напряжений на зажимах обмоток трансформатора при холостом ходе приближенно равно отношению индуцируемых в них э. д. с.*

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (17,20)$$

Это отношение называется коэффициентом трансформации и обозначается обычно буквой k :

$$k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2}. \quad (17,21)$$

Если, например, первичная обмотка имеет 2500 витков, а вторичная — 250 витков, то коэффициент трансформации равен 10. Подключив первичную обмотку к источнику с напряжением $U_1 = 1000$ в, мы на вторичной обмотке получим напряжение $U_2 = 100$ в. Если бы мы, наоборот, использовали в качестве первичной обмотку с меньшим

числом витков и подключили ее к источнику с напряжением $U_1=100$ в, то коэффициент трансформации был бы равен 0,1, и на концах другой обмотки мы получили бы напряжение $U_2=1000$ в. В первом случае наш трансформатор работает как понижающий, во втором — как повышающий.

Упражнения. 165.1. Первичная катушка трансформатора имеет 1000 витков. На тот же сердечник надеты четыре вторичные катушки с числами витков 250, 500, 1500 и 10 000. Какое напряжение будет на зажимах каждой катушки, если на первичную подать 120 в?

165.2. На рис. 319 изображен так называемый автотрансформатор. Это катушка, надетая на железный сердечник и имеющая ряд отводов через определенное число витков. Пусть между зажимами a и b находится 100 витков, между b и c — 200, между c и d — 300 и между d и e — 400. К зажимам a и c подается напряжение 120 в. Какое напряжение будет между зажимами a и b , a и d , a и e , b и c , b и d , b и e , c и d , c и e , d и e ?

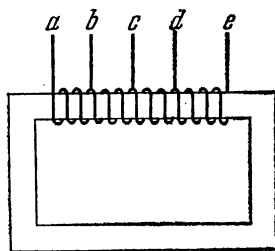


Рис. 319. К упражнению 165.2. Автотрансформатор.

Рассмотрим несколько подробнее, как работает трансформатор. При холостом ходе, когда тока в цепи вторичной обмотки нет и не расходуется, в цепи первичной обмотки действует напряжение, равное разности между приложенным напряжением сети U_1 и противоположно направленной индуцированной э. д. с. E_1 . Напряжение $U_1 - E_1$ создает в цепи первичной обмотки некоторый ток

холостого хода I_0 , мощность которого представляет собой бесполезную потерю: она расходуется на нагревание проводников обмотки проходящим по ней током (потери в меди) и на нагревание сердечника, вызываемое токами Фуко и его многократным перемагничиванием (потери в железе). Однако при правильном расчете трансформатора эти потери невелики, и ток холостого хода составляет лишь несколько процентов от тока в первичной обмотке при полной нагрузке трансформатора, т. е. при той нагрузке, на которую он рассчитан.

Когда мы подключаем к вторичной обмотке нагрузку, в цепи ее идет более или менее большой ток I_2 и выделяется соответствующая мощность. Напряжение U_2 на концах вторичной обмотки уже не будет точно равно E_2 , а будет несколько меньше, но если нагрузка не превышает той нормы, на которую трансформатор рассчитан, то это уменьшение очень незначительно: оно составляет 2—3% от напряжения холостого хода. При этом, очевидно, должен возрасти ток в первичной обмотке I_1 , и вместе с ним мощность, отбираемая трансформатором из сети. Чем больше нагрузка вторичной обмотки (ток I_2), тем больше должен становиться и ток I_1 .

Трансформаторы рассчитываются так, чтобы при нормальной нагрузке их, когда током холостого хода I_0 можно

пренебречь по сравнению с рабочим током I_1 , токи в первичной и вторичной обмотке были приблизительно обратно пропорциональны соответствующим напряжениям:

$$\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{U_1}{U_2}. \quad (17,22)$$

Поэтому, если напряжение U_2 во много раз меньше, чем U_1 , то во вторичной цепи такого понижающего трансформатора можно получить очень большие токи. Такие трансформаторы применяются при электросварке. На рис. 320 для примера показан понижающий трансформатор, вторичная обмотка которого имеет всего один виток. Напряжение U_2 здесь очень мало, но ток во вторичной обмотке настолько велик, что он нагревает до красного каления толстый медный стержень AB .

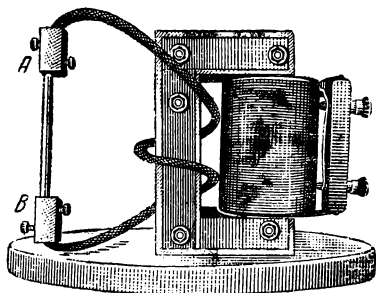


Рис. 320. Понижающий трансформатор, дающий очень большой ток (для сварочного аппарата).

У п р а ж н е н и е 165.3. Во вторичной обмотке трансформатора ток равен $0,22 \text{ а}$, а напряжение на зажимах 2400 в . Каков ток в первичной обмотке, если входное напряжение 120 в ?

Ток холостого хода трансформатора I_0 , как мы уже отмечали, очень мал. Это означает, что сопротивление первичной обмотки очень велико. Это сопротивление обусловлено почти полностью большой индуктивностью первичной обмотки ненагруженного трансформатора; ее омическим сопротивлением R можно пренебречь по сравнению с индуктивным сопротивлением $L\omega$. Когда мы включаем нагрузку, то переменный ток I_2 , проходящий по вторичной обмотке, сам создает в сердечнике переменное магнитное поле и индуцирует в первичной обмотке некоторую дополнительную э. д. с., которая по правилу Ленца направлена противоположно э. д. с. E_1 , т. е. уменьшает ее. При этом действующее в цепи первичной обмотки напряжение $U_1 - E_1$ возрастает, а, стало быть, в о з р а с т а е т и ток через эту обмотку I_1 .

Можно сказать, что действие магнитного поля тока вторичной обмотки I_2 уменьшает индуктивное сопротивление первичной обмотки, что и приводит к возрастанию тока в ней.

Мы видим, что ненагруженный или мало нагруженный трансформатор представляет собой для сети почти чисто индуктивное сопротивление, т. е. коэффициент мощности его ($\cos \varphi$) очень мал. По мере возрастания нагрузки коэффициент мощности возрастает и для трансформатора, нагруженного на ту мощность, на которую он рассчитан, становится близким к единице. Поэтому в целях

улучшения общего коэффициента мощности сети очень важно **р а с п р е д е л я т ь н а г р у з к у** по различным трансформаторам так, чтобы они были по возможности **п о л н о с т ь ю н а г р у ж е н ы**, и не оставлять включенных в первичную сеть трансформаторов без нагрузки или с очень малой нагрузкой.

Трансформатор представляет собой, как мы видим, прибор, передающий энергию из цепи первичной обмотки в цепь вторичной. Эта передача неизбежно связана с некоторыми потерями — расходом энергии на нагревание проводников обмоток, на токи Фуко и на перемагничивание железа.

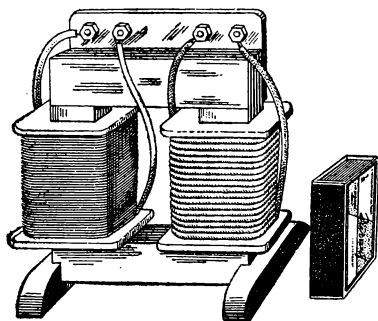


Рис. 321. Трансформатор для небольших мощностей. Для сравнения рядом поставлена спичечная коробка.

Коэффициентом полезного действия трансформатора называют отношение мощности, потребляемой в цепи вторичной обмотки, к мощности, отбираемой из сети. Разность между этими величинами представляет собой бесполезную потерю.

Для уменьшения потерь энергии на нагревание сердечников токами Фуко их изготавливают из отдельных тонких листов стали, изолированных друг от друга (§ 144), а для уменьшения

потерь на нагревание сердечника при его перемагничивании сердечники изготавливают из специальных сортов стали, в которых эти потери малы. Благодаря этому потери обычно весьма малы по сравнению с мощностью, преобразуемой в трансформаторах, и **к. п. д. трансформаторов очень высок.** Он достигает 98—99% для больших трансформаторов и около 95% для мелких.

Трансформаторы для небольших мощностей (десятки ватт), применяющиеся главным образом в лабораториях и для бытовых целей, имеют очень небольшие размеры (рис. 321). Мощные же трансформаторы, преобразующие сотни и тысячи киловатт, представляют собой огромные сооружения. Обычно мощные трансформаторы помещаются в стальной бак, заполненный специальным минеральным маслом (рис. 322). Это улучшает условия охлаждения трансформатора, и, кроме того, масло играет важную роль как

изолирующий материал. Концы обмоток трансформатора выводятся через проходные изоляторы, укрепленные на верхней крышке бака.

Трансформатор был изобретен в 1876 г. П. Н. Яблочковым, который применил его для питания своих «свечей», требующих различного напряжения. Несколько позже самостоятельно пришел к мысли о создании трансформатора

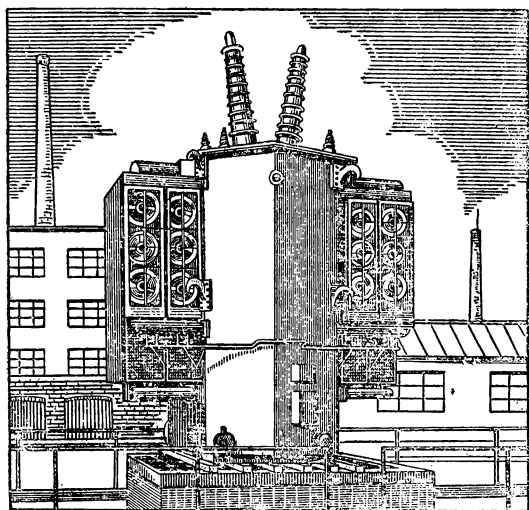


Рис. 322. Мощный трансформатор с масляным охлаждением.

И. Ф. Усагин¹⁾), демонстрировавший свой прибор и его применение в 1882 г.

§ 166. Централизованное производство и распределение электрической энергии. В 70-х годах прошлого века были в основном разработаны конструкции генераторов электрического тока, с которыми мы познакомимся в гл. XVIII. Это дало возможность преобразовывать тепловую энергию паровых машин или энергию падающей воды в электрическую энергию в количествах, ранее неслыханных.

¹⁾ Иван Филиппович Усагин (1855—1919) — физик, лаборант Московского университета.

Однако возможность получения больших количеств электрической энергии сразу же поставила перед техникой другую очень важную и принципиально совершенно новую задачу, именно задачу т р а н с п о р т и р о в а н и я энергии, передачи ее из одного места в другое. До изобретения электрических генераторов эта задача не возникала, потому что она казалась совершенно неразрешимой. В самом деле, если мы имеем водяной или ветряной двигатель или паровую машину, то мы можем передать его механическую энергию только станку, находящемуся в непосредственной близости от двигателя. Эта передача с помощью валов, зубчатых колес, ременных трансмиссий и т. п. сравнительно легко осуществляется на расстояние до нескольких десятков или, в крайнем случае, сотен метров, но нельзя представить себе, чтобы с помощью таких устройств можно было передавать энергию на расстояние нескольких километров или десятков километров.

Энергию же электрического тока можно передавать по проводам на расстояние нескольких тысяч километров. Поэтому как только были созданы первые удовлетворительные модели электрических генераторов, перед техникой возникла проблема централизованного производства энергии и ее передачи по проводам на большое расстояние. Такая постановка задачи — производство энергии в одном месте и потребление ее в другом — является одной из важнейших принципиальных особенностей новой энергетики, основанной на использовании электрической энергии.

Подавляющая часть получаемой в СССР электрической энергии, являющейся энергетической базой всей промышленности, производится на больших электростанциях, мощность которых измеряется сотнями тысяч и миллионами киловатт. Станции эти располагаются либо там, где имеются большие запасы водной энергии (на Днестре, Волге, Ангаре и других полноводных реках), либо там, где есть большие запасы дешевого топлива. Дешевая энергия этих станций распределяется по проволочным сетям на огромные расстояния и потребляется часто в местах, отстоящих от станции на сотни и тысячи километров. При этом большое число мощных станций объединяется в одну энергетическую систему, например Мосэнерго, Ленинградэнерго, Укрэнерго и т. д., и совместно снабжают энергией потребителей огромного района. Завершаются работы по объе-

динению в единую систему всех крупных электростанций европейской части СССР.

При таких условиях совершенно исключительное значение приобретает задача возможного уменьшения потерь в проводах (§ 52). Важнейшим шагом в решении этой фундаментальной электротехнической задачи явилось выяснение вопроса о возможности значительного уменьшения потерь путем повышения напряжения, под которым передается ток. К этому выводу впервые пришел русский электротехник Д. А. Лачинов, опубликовавший соответствующее исследование в 1880 г. Примерно год спустя с такими же заключениями выступил французский исследователь Депрэ. Депрэ же осуществил первую передачу электроэнергии значительной мощности по телеграфным проводам на расстояние 57 км (в 1882 г.).

Для лучшего уяснения идеи Лачинова и Депрэ рассмотрим численный пример.

Положим, что мы имеем в одном месте генератор с мощностью 1000 *квт* и передаем его энергию в другое место. Сравним потери, связанные с ее передачей в двух случаях: когда напряжение, даваемое генератором, равно 5000 *в* и 50 000 *в*. В первом случае ток, даваемый генератором, должен равняться 200 *а* (так как $5000 \text{ в} \cdot 200 \text{ а} = 1000 \text{ квт}$), во втором — 20 *а* (так как $50\,000 \text{ в} \cdot 20 \text{ а} = 1000 \text{ квт}$).

Пусть для передачи служит линия проводов, сопротивление которой равно 20 *ом*. Какая энергия будет истрачена в этих проводах на нагревание? Потери на нагревание равны $I^2 R \text{ вт}$. Следовательно, в первом случае эти потери составляют $200^2 \cdot 20 \text{ вт} = 800\,000 \text{ вт} = 800 \text{ квт}$, а во втором $20^2 \cdot 20 \text{ вт} = 8000 \text{ вт} = 8 \text{ квт}$. Итак, бесполезные потери энергии составляют в первом случае 800 *квт* из 1000, т. е. достигают 80%, а во втором только 0,8%. Увеличив напряжение в 10 раз, мы уменьшим бесполезные потери в 100 раз. В этом и заключается причина того, что в современной электротехнике энергию, получаемую на электростанциях, стремятся передавать в отдаленные места под возможно более высоким напряжением.

Конечно, снизить бесполезные потери можно было бы, уменьшая *R*, т. е. сопротивление проводов. Но для этого пришлось бы их делать возможно более толстыми, ибо длина проводов задана расстоянием до места потребления. Понятно, что значительное увеличение сечения проводов связано с их огромным удорожанием и, следовательно,

неосуществимо. Наоборот, применение высоких напряжений позволяет пользоваться тонкими проводами, т. е. проводами с большим сопротивлением, но зато гораздо более дешевыми.

Однако строить генераторы с напряжением в сотни тысяч вольт крайне затруднительно хотя бы потому, что изоляция машин не выдерживает таких напряжений. Кроме того, нельзя столь высокие напряжения непосредственно подавать потребителю.

Единственный возможный выход заключается в том, чтобы на электрической станции **п о в ы ш а т ь** напряжение, даваемое генератором, передавать энергию под этим высоким напряжением в место потребления и здесь снова **п о н и ж а т ь** напряжение до нужных пределов. Осуществить такое преобразование напряжений в случае **п о с т о я н н о г о** тока чрезвычайно **т р у д н о**. Напротив, в случае **п е р е м е н н о г о** тока такое преобразование осуществляется с помощью трансформатора **л е г к о** и с **о ч е н ь** **м а л ы м и** **п о т е р я м и** энергии.

Мощные электрические станции вырабатывают огромные количества электрической энергии при переменном напряжении в 6—20 тысяч вольт и частоте 50 *гц*. Эта энергия подается в **п о в ы ш а ю щ и е** **т р а н с ф о р м а т о р ы** и попадает в **л и н и и** **п е р е д а ч и** под напряжением в сотни тысяч вольт. По линиям передачи энергия распределяется к местам потребления. Здесь ток принимается прежде всего на **г л а в н у ю** **п о н и з и т е л ь н у ю** **п о д с т а н ц и ю**, где с помощью трансформаторов напряжение его снижается обычно до 35 тысяч вольт. Под этим напряжением ток попадает в провода **р а й о н н о й** **р а с п р е д е л и т е л ь н о й** **с е т и**, соединяющей главную понизительную подстанцию со сравнительно близко расположенными местами потребления. В каждом таком месте устанавливаются **в т о р и ч н ы е** **п о н и з и т е л ь н ы е** **п о д с т а н ц и и**, т. е. трансформаторы, снижающие напряжение до 3, до 6 или до 10 тысяч вольт. Отсюда по проводам **м е с т н о й** **р а с п р е д е л и т е л ь н о й** **с е т и** ток попадает в многочисленные трансформаторные **п у н к т ы**, находящиеся на отдельных заводах или обслуживающие небольшую группу домов, а иногда и один большой дом. Тут напряжение **с н и ж а е т с я** до 127, 220 или 380 *в* и под этим низким напряжением энергия подводится в отдельные квартиры, к станкам и т. п. по так называемой

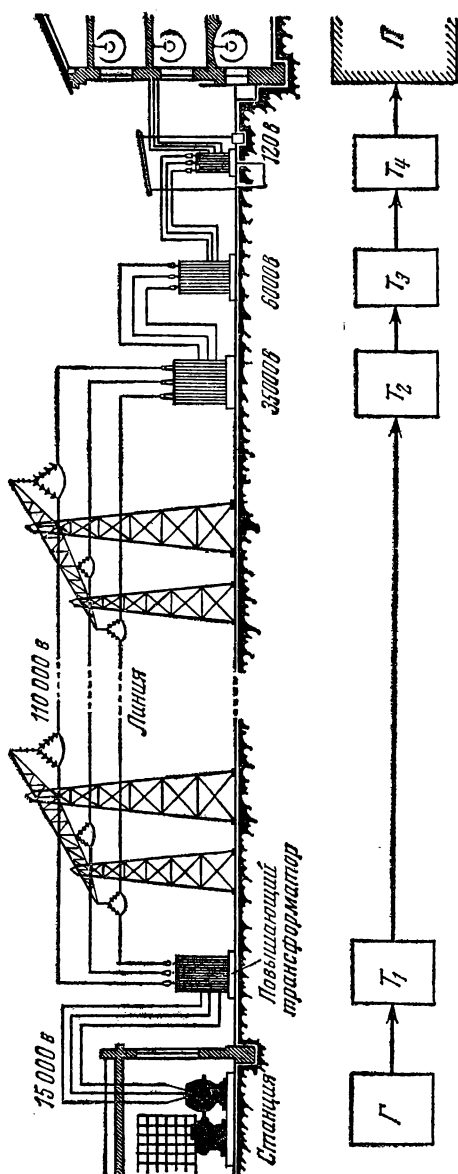


Рис. 323. Схема передачи тока от электростанции до потребителя и распределения его между потребителями.

внутренней сети. Схема такого распределения тока показана на рис. 323.

В настоящее время электрическая энергия передается почти исключительно в виде переменного тока высокого напряжения. Расчет показывает, однако, что передача ее в виде постоянного тока высокого напряжения была бы гораздо выгоднее, так как требовала бы проводов с сечением, а следовательно, и весом, в 1,5 раза меньшим; при дальних передачах (на тысячи километров) это весьма существенно. Использование постоянного тока вместо переменного тормозится тем, что до сих пор не найден способ получения мощных постоянных токов высокого напряжения и не существует простых приемов трансформации напряжения постоянного тока. Это одна из важнейших задач, стоящих перед техникой.

Упражнение 166.1. Электростанция мощностью 5000 *квт* передает энергию по двум медным проводам заводу, находящемуся на расстоянии 25 *км*. Потеря в проводах должна составить 2% от передаваемой мощности. Рассчитайте сечение проводов для случаев, когда энергия передается под напряжением 50 000 *в* и под напряжением 100 000 *в*. Каков будет общий вес проводов в том и другом случае? Удельный вес меди 8,9 *г/см³*.

§ 167. Выпрямление переменного тока. Хотя, как мы уже указывали, в технике применяется преимущественно переменный ток, однако в ряде случаев бывает необходимо иметь постоянный ток. Такой ток необходим, например, для питания радиоприемных и радиопередающих устройств, телевизоров, для зарядки аккумуляторов, для электролитического получения металлов, для приведения в действие двигателей трамваев, троллейбусов и электропоездов ¹⁾ и для многих других целей. Поэтому очень важное техническое значение имеют устройства, позволяющие превращать переменный ток в постоянный, или, как принято говорить, выпрямлять его.

В основе действия всех устройств такого рода — выпрямителей — лежит применение так называемых электрических вентиляй, т. е. приборов, которые пропускают ток в одном направлении и не пропускают его в противоположном направлении. С одним из таких вентиляй мы уже знакомы. Это — двухэлектродная лампа с накаливаемым

¹⁾ Преимущества постоянного тока для электродвигателей будут выяснены в следующей главе.

катодом (§ 106). Если мы включим такую лампу в сеть переменного тока последовательно с тем прибором, для питания которого нам нужен постоянный ток (рис. 324), то ток будет проходить через нашу цепь только в тот полупериод, когда накалившая нить будет катодом, а холодная пластинка — анодом. В следующий полупериод, когда холодная пластинка служит катодом, а раскаленная нить — анодом, ток проходить не может, потому что испускаемые нитью электроны не будут притягиваться полем к пластинке, а, наоборот, будут отталкиваться обратно к нити. Поэтому ток в нашем приборе будет п р я м ы м, т. е. направление его меняться не будет. Форма такого п у л ь с и р у ю щ е г о прямого тока показана на рис. 325. Эта схема выпрямления переменного тока носит название о д н о п о л у п е р и о д н о й.

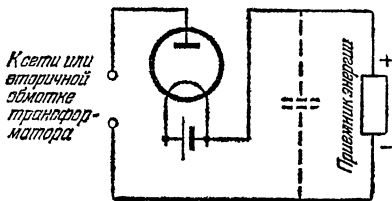


Рис. 324. Схема однополупериодного выпрямителя с применением кенотрона в качестве вентиля.

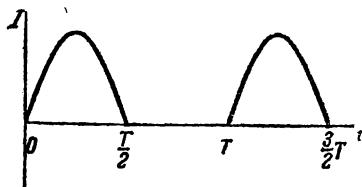


Рис. 325. Форма выпрямленного тока при однополупериодном выпрямлении.

Чтобы сгладить колебания величины тока в цепи, часто применяют более сложную д в у х п о л у п е р и о д н у ю схему выпрямления, показанную на рис. 326. Здесь сетевое напряжение подводят к первичной обмотке трансформатора, а середину вторичной обмотки соединяют с отдельным зажимом. Ясно, что в течение одного полупериода зажим L имеет относительно средней точки M более высокий потенциал, т. е. является по отношению к ней плюсом, а точка N — минусом. В течение следующего полупериода, наоборот, плюсом по отношению к средней точке будет точка N , а минусом — точка L .

Крайние точки трансформатора L и N присоединяют к анодам двух выпрямительных ламп, катоды которых соединены между собой и накаливаются отдельной батареей или отдельной понижающей обмоткой на трансформаторе. Приемник энергии, как это видно из рисунка, включается между

средней точкой трансформатора и катодами обеих выпрямительных ламп. В течение того полупериода, когда точка L положительна по отношению к точке M , а точка N — отри-

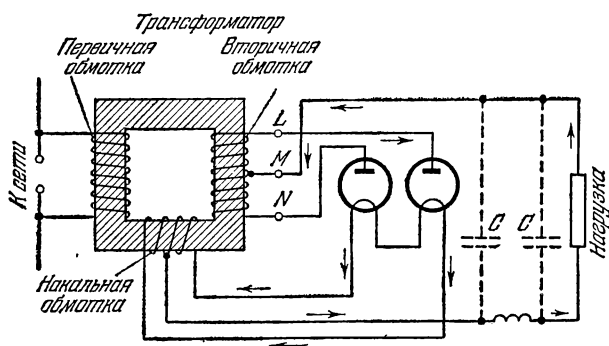


Рис. 326. Схема двухполупериодного выпрямителя с применением фильтра.

цательна, ток проходит только через первую лампу, а вторая заперта, т. е. не пропускает тока. В течение следующего полупериода лампы меняются ролями. Первая лампа заперта, и ток проходит только через вторую. Направления

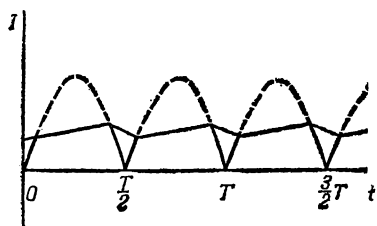


Рис. 327. Форма тока при двухполупериодном выпрямлении.

этих токов отмечены на рис. 326 стрелками. Мы видим, что через нагрузку ток проходит в течение обоих полупериодов в одном и том же направлении. Форма этого тока показана на рис. 327 (синусоиды с пунктирными участками).

Чтобы еще больше сгладить пульсации выпрямленного тока, применяют

так называемые ф и л ь т р ы. Простейшим фильтром является конденсатор достаточно большой емкости, включенный параллельно нагрузке. Этот конденсатор, показанный пунктиром на рис. 324, заряжается в тот полупериод, когда через выпрямительную лампу проходит ток, и разряжается через приемник энергии в течение следующего полупериода, поддерживая в нем, таким образом, ток в течение всего периода.

Еще более совершенным является фильтр, состоящий из катушки с железным сердечником, обладающей большой индуктивностью, и двух конденсаторов. Катушка включается последовательно с приемником энергии, а конденсатор параллельно ему: один — перед катушкой, другой после нее (рис. 326). Э. д. с. самоиндукции в катушке противодействует изменениям тока. Она ослабляет его во время нарастания и поддерживает во время убывания. Форма сглаженного тока показана на рис. 327 сплошной линией (ломаной).

Двухэлектродные вакуумные выпрямительные лампы с накаливаемыми катодами получили в технике название кенотронов (§ 106). Они получили очень широкое распространение в радиоприемниках, телевизорах и других радиоустройствах.

Кенотроны могут пропускать через себя лишь сравнительно слабые токи до нескольких десятков миллиампер. В тех случаях, когда нужно выпрямлять большие токи (до 50 а), вместо кенотронов применяют так называемые газотроны (рис. 328). Это тоже двухэлектродная лампа с накаливаемым катодом и металлическим или угольным анодом, но в отличие от кенотрона, внутри которого воздух по возможности полностью откачан, колба газотрона заполнена парами ртути или инертным газом. Электроны, вылетающие из накаливаемого катода, на своем пути к аноду ионизуют при соударениях атомы ртути. Появляющиеся при этом положительные ионы способствуют увеличению эмиссии с катода, так что ток через газотрон может быть значительно больше, чем через кенотрон.

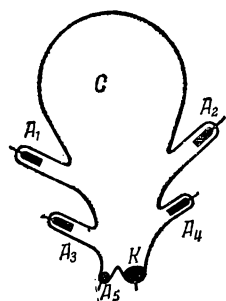


Рис. 329. Устройство ртутного выпрямителя.

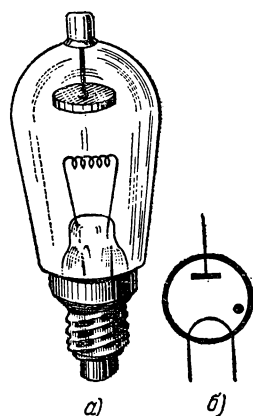


Рис. 328. Газотрон: а) внешний вид; б) условное обозначение.

Наконец, в тех случаях, когда требуется выпрямлять очень большие мощности (до 200 а при напряжении до 50 000 в), в качестве вентильных элементов применяют так

называемые ртутные выпрямители. Они представляют собой стеклянные или металлические большие колбы (рис. 329), в которых происходит дуговой разряд в парах ртути между катодом K (жидкая ртуть) и графитовыми электродами A_1 и A_2 , впаянными в боковые отростки. Дополнительные электроды A_3 и A_4 включены в устройство, обеспечивающее работу выпрямителя при малых нагрузках. Ртуть в дополнительном отростке A_5 служит для зажигания дуги. Дуга в колбе может гореть только тогда, когда жидкая ртуть является катодом. При этом на поверхности ртути образуется ярко светящееся пятно, представляющее собой нагретый участок ртути. С этого участка происходит усиленное испарение ртути, пары которой при высоком давлении заполняют всю колбу. Это же пятно является и источником электронов, которые движутся под действием электрического поля к тому из электродов A_1 и A_2 , который в данное время положителен по отношению к ртути и другому аноду.



Рис. 330. Условный знак для полупроводниковых электрических вентилей.

Такой выпрямитель включается по схеме двухполупериодного выпрямления, и дуга горит в течение одного полупериода между катодом K и анодом A_1 , а в течение другого — между катодом и анодом A_2 . При этом в нагрузке ток идет все время в одном и том же направлении. Такими ртутными выпрямителями оборудованы, в частности, почти все подстанции, питающие электрические железные дороги, трамваи и троллейбусы.

Наряду с описанными электронными или газоразрядными выпрямителями в последнее время получают все более широкое распространение твердые, или полупроводниковые, выпрямители, о которых было сказано в главе IX. Их включают в выпрямительные устройства по тем же схемам одно- и двухполупериодного выпрямления, как газотроны или кенотроны.

На чертежах полупроводниковые вентили принято обозначать условным знаком, изображенным на рис. 330. Направление острия указывает направление пропускания тока. Иными словами, устройство, обозначенное этим знаком, пропускает ток только тогда, когда электрод, изображенный треугольником, является анодом (плюсом), а электрод, изображаемый пластинкой, — катодом (минусом).

ГЛАВА XVIII

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ: ГЕНЕРАТОРЫ, ДВИГАТЕЛИ, ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ

§ 168. Генераторы переменного тока. В начале предыдущей главы мы уже говорили о том, что в современной технике применяются почти исключительно **и н д у к ц и о н н ы е** генераторы электрического тока, т. е. машины, в которых э. д. с. возникает в результате процесса электромагнитной индукции. Поэтому слово «индукционный» обычно опускают и говорят просто об электрических генераторах, имея в виду именно эти индукционные генераторы.

В § 139 мы разобрали простейшую модель индукционного генератора и показали, что э. д. с., возникающая в катушке, вращающейся в магнитном поле, является **п е р е м е н н о й**; поэтому переменным является и ток, получаемый нами от индукционного генератора, если не принять специальных мер для его **в ы п р я м л е н и я**, т. е. для превращения его в постоянный, или **п р я м о й** ток, не меняющий своего направления. Конечно, современные технические генераторы, строящиеся часто на огромные мощности — до 200—400 тысяч киловатт в одной машине, — несравненно сложнее, чем наша модель. Такая машина со всеми дополнительными устройствами для контроля и регулирования ее работы, защиты ее от аварий, распределения тока между потребителями и т. д. представляет собой очень сложное техническое сооружение (рис. 331). Однако все основные части ее, принципиально необходимые для работы любого генератора, как бы сложен он ни был, можно выделить и на нашей простой модели. Такими частями являются: 1) **и н д у к т о р** — магнит или электромагнит, создающий магнитное поле, 2) **я к о р ь** — обмотка, в которой при изменении магнитного потока возникает индуцированная

э. д. с., 3) контактные кольца и скользящие по ним контактные пластинки (щетки), при помощи которых снимается или подводится ток к вращающейся части генератора. Вращающаяся часть называется ротором генератора, а неподвижная часть его — статором.

В нашей модели э. д. с. индукции возникала при вращении якоря в поле индуктора, т. е. якорь был ротором, а индуктор — статором. Но, конечно, можно, наоборот, вращать индуктор, а якорь оставлять неподвижным. Таким

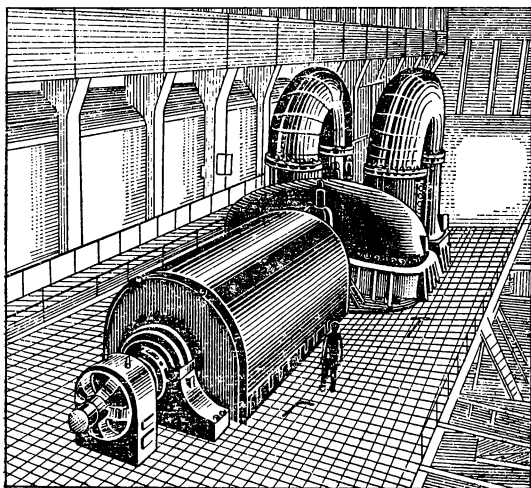


Рис. 331. Современный мощный индукционный генератор.

образом, как ротор, так и статор могут выполнять роль индуктора или роль якоря. И в том и в другом случае ротор должен быть снабжен контактными кольцами и щетками, осуществляющими непрерывный контакт во время его вращения. Ясно, однако, что удобнее проводить через такие скользящие контакты сравнительно небольшой ток, необходимый для намагничивания индуктора. Ток же, генерируемый в якоре большого генератора, достигает огромной величины, и этот ток удобнее снимать с неподвижных катушек, не требующих скользящих контактов. Поэтому в мощных генераторах предпочитают в качестве якоря использовать статор, а в качестве индуктора — ротор.

Для того чтобы получать большие магнитные потоки через обмотки якоря, а следовательно, и большие изменения этих потоков, якорь снабжают железным сердечником, концы которого имеют такую форму, чтобы между полюсами магнита и сердечником оставался лишь небольшой зазор, необходимый для вращения. В качестве индуктора, создающего магнитное поле, в технических генераторах почти всегда применяют электромагниты (рис. 332, а и б). Лишь в очень редких случаях, при конструировании генераторов малой мощности, применяют в качестве индукторов постоянные магниты. Это делается, например,

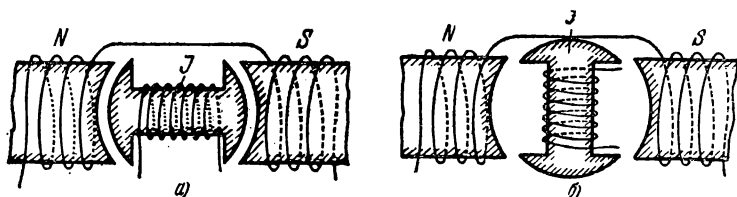


Рис. 332. Катушка J , намотанная на железный сердечник, вращается в поле электромагнита NS . В положении а) магнитный поток через катушку J велик, в положении б) он мал. Поэтому при вращении катушки магнитный поток изменяется и в ней индуцируется переменный ток.

в так называемых магнето — небольших генераторах, применяемых в некоторых типах двигателей внутреннего сгорания для зажигания с помощью искры горючей смеси в цилиндрах двигателя.

На рис. 333 показана схема, а на рис. 334 общий вид генератора переменного тока с вращающимся индуктором и неподвижным якорем. Ротор (индуктор) этого генератора показан отдельно на рис. 335. Как видим, этот ротор представляет собой цилиндр с выступами, на которые надеты катушки. Обмотки на этих катушках, по которым проходит постоянный ток, создающий магнитное поле, соединены так, что на отдельных выступах мы имеем поочередно северные и южные полюсы электромагнитов (рис. 336). Число пар этих полюсов обычно довольно велико: 4, 6, 8, ... и т. д. Делается это вот из каких соображений.

Если бы мы имели в индукторе только одну пару полюсов, то период переменного тока соответствовал бы времени одного полного оборота ротора. Таким образом, для получения переменного тока с частотой 50 периодов в секунду

ротор должен бы был делать 50 оборотов в секунду или 3000 оборотов в минуту, что для больших машин не всегда технически осуществимо. При наличии же большого числа пар полюсов период тока

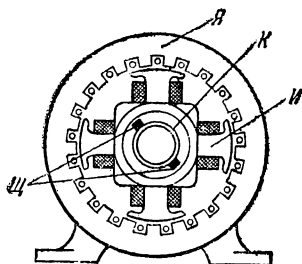


Рис. 333. Схема устройства генератора с неподвижным якорем Я и вращающимся индуктором И; К — контактные кольца, Щ — скользящие по ним щетки.

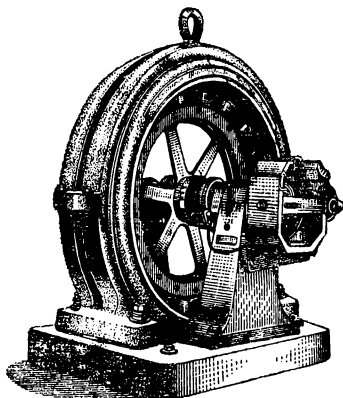


Рис. 334. Общий вид генератора переменного тока с внутренними полюсами. Ротор является индуктором, а статор — якорем.

соответствует времени, необходимому для поворота ротора на часть окружности, занимаемую одной парой полюсов.

Таким образом, например, при наличии 6 пар полюсов нам достаточно вращать ротор со скоростью 500 оборотов

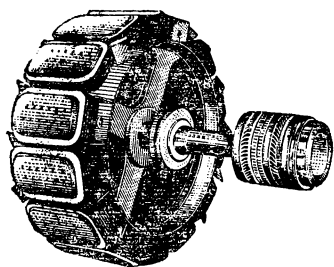


Рис. 335. Ротор (индуктор) генератора переменного тока с внутренними полюсами. На валу ротора справа показан ротор вспомогательной машины, дающей постоянный ток для питания индуктора.

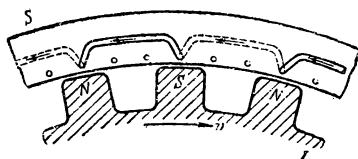


Рис. 336. Индуктор генератора I (ротор), вращающийся со скоростью v , и якорь (статор) S, в обмотке которого индуцируется ток. Схематическое изображение.

в минуту, чтобы получить переменный ток с частотой 3000 периодов в минуту, т. е. 50 периодов в секунду.

Упражнение 168.1. Генератор переменного тока имеет 12 пар полюсов и вращается со скоростью 1500 оборотов в минуту. Какова частота электрического тока? Сколько раз в секунду этот ток меняет свое направление?

Поэтому такие генераторы обычно приводятся в движение сравнительно тихоходными водяными турбинами или двигателями внутреннего сгорания. При работе же с паровыми турбинами, дающими до 1500—3000 оборотов в минуту, применяется несколько иная конструкция ротора (индуктора). Ротор не имеет выступов, а представляет собой

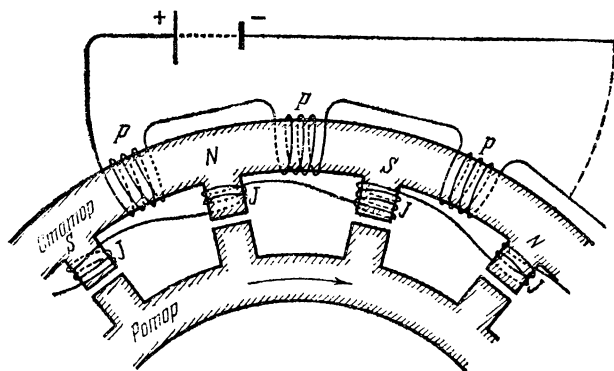


Рис. 337. К упражнению 168.2.

гладкий цилиндр, на наружной поверхности которого в пазах уложена обмотка. При большой скорости вращения это выгоднее, потому что выступы на роторе создают воздушные вихри и увеличивают механические потери.

Форма полюсных наконечников на выступах ротора специально рассчитывается так, чтобы индуцированная в обмотке э. д. с. изменялась со временем по закону синуса, т. е. чтобы форма напряжения и тока, даваемого генератором, была синусоидальной.

Статор генератора — его неподвижная часть — представляет собой железное кольцо, в пазах которого уложены обмотки якоря. Для уменьшения потерь на токи Фуко (§ 144) это кольцо делается не сплошным, а состоящим из отдельных тонких листов железа, изолированных друг от друга.

У п р а ж н е н и е 168.2. На рис. 337 показан схематически разрез генератора, у которого и катушки возбуждения P и катушки индукционные J намотаны, как показано, на статоре (неподвижной части), а ротор имеет вид зубчатого колеса и не несет никаких катушек. Объясните, почему в этом случае возникает в катушках J индуцированный ток?

§ 169. Генераторы постоянного тока. Мы уже указывали в § 167, что хотя в технике применяется преимущественно переменный ток, однако во многих случаях бывает необходим и ток постоянный. Такой ток можно получить, либо преобразуя переменный ток, получаемый от общих сетей,

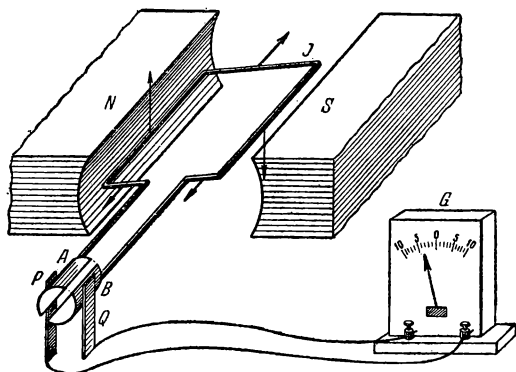


Рис. 338. Схема генератора прямого (постоянного) тока с коллектором простейшего типа, состоящим из двух полуколец A и B . J — вращающийся якорь (рамка); N, S — полюсы магнита; G — прибор для измерения силы тока; P и Q — щетки для съема индуцированного тока.

в постоянный с помощью рассмотренных в § 167 выпрямительных устройств, либо используя специальные генераторы постоянного тока. Часто применение последних оказывается более выгодным и удобным.

Генераторы постоянного тока представляют собой обычные индукционные генераторы, снабженные особым приспособлением — так называемым к о л л е к т о р о м, — дающим возможность превратить переменное напряжение на зажимах (щетках) машины в постоянное.

Принцип устройства коллектора ясен из рис. 338, на котором изображена схема простейшей модели генератора постоянного тока с коллектором. Эта модель отличается от рассмотренной нами выше модели генератора переменного

тока (рис. 297) лишь тем, что здесь концы якоря (обмотки) соединены не с отдельными кольцами, а с двумя полукольцами A и B , разделенными изолирующим материалом и надетыми на общий цилиндр, который вращается на одной оси с рамкой J . К этим вращающимся полукольцам прижимаются пружинящие контакты (щетки) P и Q , с помощью которых индуцированный ток отводится во внешнюю сеть. При каждом полуобороте рамки концы ее, припаянные к полукольцам, переходят с одной щетки на другую. Но направление индуцированного в рамке тока, как было разъяснено в § 152, тоже меняется при каждом полуобороте рамки. Поэтому, если переключения в коллекторе происходят

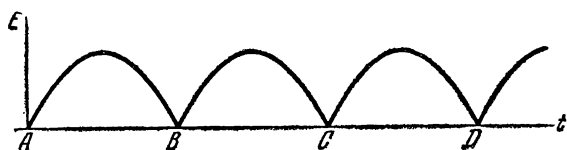


Рис. 339. Зависимость индуцированного напряжения E от времени у генератора постоянного тока с одной парой полуколец на коллекторе. Отрезки AB , BC , CD соответствуют каждому одному полупериоду.

в те же моменты времени, когда меняется направление тока в рамке, то одна из щеток всегда будет являться положительным полюсом машины, а другая — отрицательным, т. е. во внешней цепи будет идти ток, не меняющий своего направления. Можно сказать, что с помощью коллектора мы производим **в ы п р я м л е н и е** переменного тока, индуцируемого в якоре машины.

График напряжения на зажимах такого генератора, якорь которого имеет одну рамку, а коллектор состоит из двух полуколец, как в нашей модели, изображен на рис. 339. Как видим, в этом случае напряжение на зажимах машины хотя и является **п р я м ы м**, т. е. не меняет своего направления, но по величине все время меняется от нуля до максимального значения. Такое напряжение и соответствующий ему ток часто называют **п р я м ы м п у л ь с и р у ю щ и м** током. Нетрудно сообразить, что величина напряжения или тока проходит весь цикл своих изменений за время одного полупериода переменной **э. д. с.** в обмотках машины. Иначе говоря, частота пульсаций вдвое больше частоты переменного тока.

Чтобы сгладить эти пульсации и сделать напряжение не только прямым, но и постоянным по величине, якорь генератора составляют из большого числа отдельных катушек, или секций, сдвинутых на определенный угол друг относительно друга, а коллектор составляют не из двух полуколец, а из соответствующего числа пластин, лежащих на поверхности цилиндра, вращающегося на общем валу с якорем. Концы каждой секции якоря припаиваются к соответствующей паре пластин, разделенных изолирующим материалом. Такой якорь называют якорем барабанного типа (рис. 340).

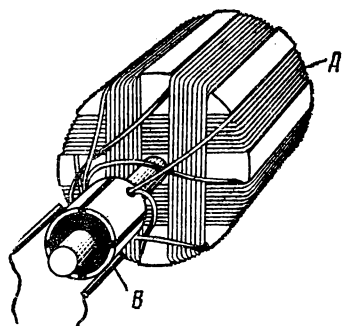


Рис. 340. Якорь барабанного типа современного генератора постоянного тока: А — барабан, на котором расположены витки четырех обмоток; В — коллектор, состоящий из двух пар пластин.

На рис. 341 показан генератор постоянного тока в разобранном виде, а на рис. 342 — схема устройства такого генератора с четырьмя секциями якоря и двумя парами пластин на коллекторе. Общий вид генератора постоянного тока советской марки ПН показан на рис. 343. Генераторы этого типа изготовляются на мощность от 0,37 до 130 *квт* и на напряжения 115, 115/160, 230/320 и 460 *в* при скорости вращения от 970 до 2860 оборотов в минуту.

Из рис. 341 и 342 мы видим, что в отличие от генераторов переменного тока в генераторах постоянного тока вращающаяся часть машины — ее ротор — представляет собой якорь машины (барабанного типа), а индуктор помещен в неподвижной части машины — ее статоре. Статор (станина генератора) выполняется из литой стали или чугуна, и на внутренней его поверхности укрепляются выступы, на которые надеваются обмотки, создающие в машине магнитное поле (рис. 344, а). На рис. 342 показана только одна пара полюсов *N* и *S*; на практике обычно в статоре размещают несколько пар таких полюсов. Все их обмотки соединяют последовательно, и концы выводят на зажимы *m* и *n*, через которые в них подается ток, создающий в машине магнитное поле.

Так как выпрямление происходит лишь на коллекторе машины, а в каждой секции индуцируется переменный ток, то во избежание сильного нагревания токами Фуко сердечник якоря делают не сплошным, а набирают из отдельных стальных листов, на краю которых выштамповываются выемки для активных проводников якоря, а в центре — отверстие для вала со шпонкой (рис. 344, б). Эти листы изолируются друг от друга бумагой или лаком.

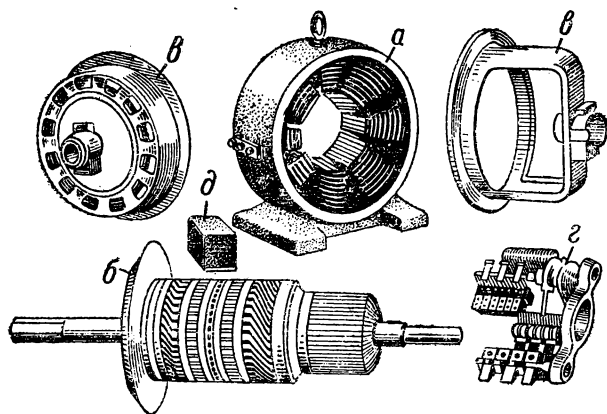


Рис. 341. Генератор постоянного тока в разобранном виде: а — станина; б — якорь; в — подшипниковые шиты; г — щетки с щеткодержателями, укрепленные на так называемой траверзе; д — сердечник полюса.

Упражнение 169.1. Почему статор генератора переменного тока собирается из отдельных стальных листов, а статор генератора постоянного тока представляет собой массивную стальную или чугунную отливку?

Схему соединений отдельных секций обмотки якоря с пластинами коллектора можно уяснить себе из рис. 342. Здесь круг с вырезами изображает задний торец железного сердечника, в пазах которого уложены длинные провода отдельных секций, параллельные оси цилиндра. Провода эти, обычно называемые в электротехнике *активными*, перенумерованы на рисунке цифрами от 1 до 8. На задней торцевой стороне якоря эти провода соединены попарно так называемыми *соединительными* проводами, которые на нашем рисунке изображены пунктирными линиями и отмечены буквами *a, b, c, d*. Как видим, каждые два

активных провода и один соединительный образуют отдельную рамку — с е к ц и ю якоря, свободные концы которой припаяны к паре пластин коллектора.

Первую секцию составляют активные провода *1* и *4* и соединительный провод *a*; концы ее припаяны к пластинам *I* и *II*. К той же пластине *II* припаян свободный конец провода *3*, который вместе с активным проводом *6* и соединительным проводом *b* образует вторую секцию; свободный

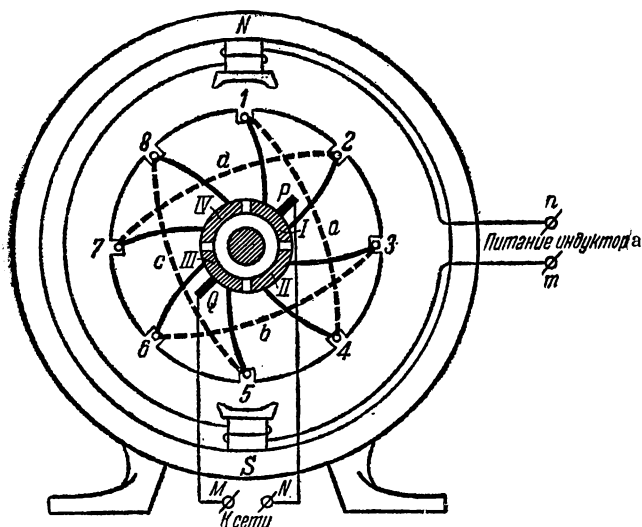


Рис. 342. Схема генератора постоянного тока с четырьмя секциями якоря и четырьмя пластинами на коллекторе.

конец этой секции припаян к коллекторной пластине *III*, и к той же пластине припаян конец третьей секции, состоящей из активных проводов *5* и *8* и соединительного провода *c*. Другой свободный конец третьей секции припаян к коллекторной пластине *IV*. Наконец, четвертую секцию составляют активные провода *7* и *2* и соединительный провод *d*. Концы этой секции припаяны соответственно к пластине *IV* и исходной пластине *I*.

Мы видим, таким образом, что все секции якоря барабанного типа соединены друг с другом так, что они образуют одну замкнутую цепь. Такой якорь называют поэтому к о р т к о з а м к н у т ы м.

Пластины коллектора $I—IV$ и щетки P и Q показаны на рисунке в той же плоскости, но на самом деле они, так же как и провода, соединяющие их с концами секций и изображенные на нашем рисунке сплошными линиями, находятся на противоположной стороне цилиндра.

Разберем теперь несколько подробнее эту схему, чтобы выявить все основные принципиальные особенности конструкции и работы якоря барабанного типа.

Щетки P и Q прижимаются всегда к паре противоположных пластин коллектора. На рис. 345, *а* изображен момент, когда щетка P касается пластины I , а щетка Q — пластины III . Нетрудно видеть, что, выйдя, например, из щетки P , мы можем прийти к щетке Q по двум параллельно включенным между ними путям: либо через секции 1 и 2 , либо через секции 4 и 3 , как это схематически показано на рис. 345, *а*. Через четверть оборота щетки будут касаться пластин II и IV , но опять между ними окажутся две параллельные ветви с секциями 4 и 1 в одной ветви и 2 и 3 — в другой (рис. 345, *б*). То же будет иметь место и в другие моменты вращения якоря.

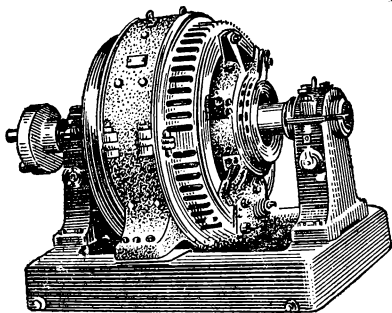


Рис. 343. Внешний вид генератора постоянного тока.

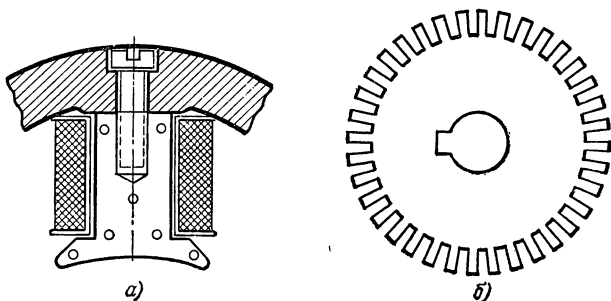


Рис. 344. Детали генератора постоянного тока: *а*) полюсный сердечник с обмоткой возбуждения, *б*) стальной лист якоря с прорезью посредине.

Таким образом, короткозамкнутая цепь якоря в любой момент времени распадается между щетками на две параллельные ветви, в каждую из которых последовательно включена половина секций якоря.

При вращении якоря в поле индуктора в каждой секции индуцируется переменная э. д. с. Направление токов, индуцируемых в некоторый момент времени в различных секциях, отмечено на рис. 345

стрелками. Через половину периода все направления индуцированных э. д. с. и токов изменятся на обратные, но так как в момент изменения их знака щетки меняются местами, то во внешней цепи ток будет всегда иметь одно и то же направление; щетка P всегда является

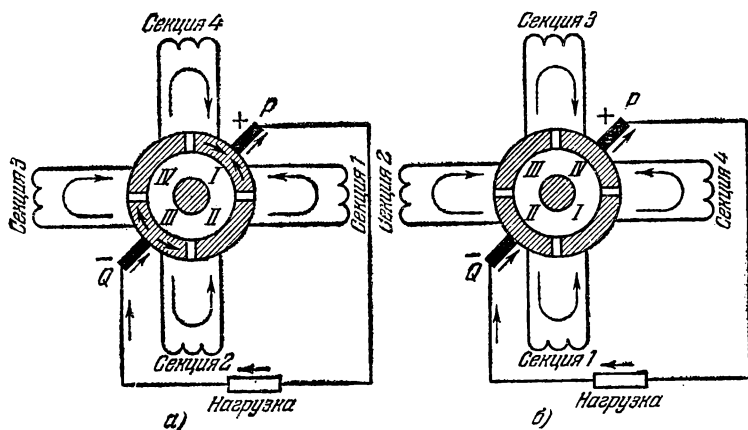


Рис. 345. Схема присоединения секций якоря к щеткам в два момента времени, отстоящие на четверть периода. а) Одна ветвь состоит из секций 1 и 2, а другая — из секций 3 и 4; б) первая ветвь содержит секции 4 и 1, а вторая — секции 2 и 3. Щетка P всегда является положительным, щетка Q — отрицательным полюсом. Во внешней цепи (нагрузке) ток всегда идет от P к Q .

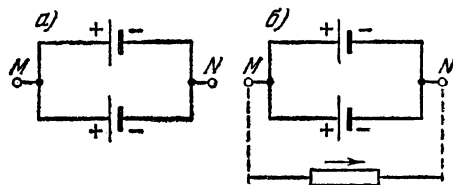


Рис. 346. а) При отсутствии нагрузки в цепи, составленной из двух включенных «навстречу» элементов, тока нет. б) При наличии нагрузки элементы соединены по отношению к ней параллельно. Ток нагрузки разветвляется, и половина его проходит через каждую ветвь. То же происходит в ядре генератора постоянного тока.

положительным, а щетка Q — отрицательным полюсом машины. Таким образом, коллектор выдает переменную э. д. с., возникающую в отдельных секциях якоря.

Из рис. 345 мы видим, что э. д. с., действующие в обеих ветвях, на которые распадается цепь якоря, направлены «навстречу» друг другу.

Поэтому, если бы во внешней цепи не было тока, т. е. к зажимам машины не была бы присоединена никакая нагрузка, то общая э. д. с., действующая в короткозамкнутой цепи якоря, была бы равна нулю, т. е. тока в этой цепи не было бы. Положение было бы таким же, как при включении «навстречу» друг другу двух гальванических элементов без внешней нагрузки (рис. 346, а). Если же мы присоединим к этим двум элементам внешнюю нагрузку (рис. 346, б), то по отношению к внешней сети оба элемента окажутся включенными параллельно, т. е. напряжение на зажимах сети (точках *M* и *N*) будет равно напряжению каждого элемента.

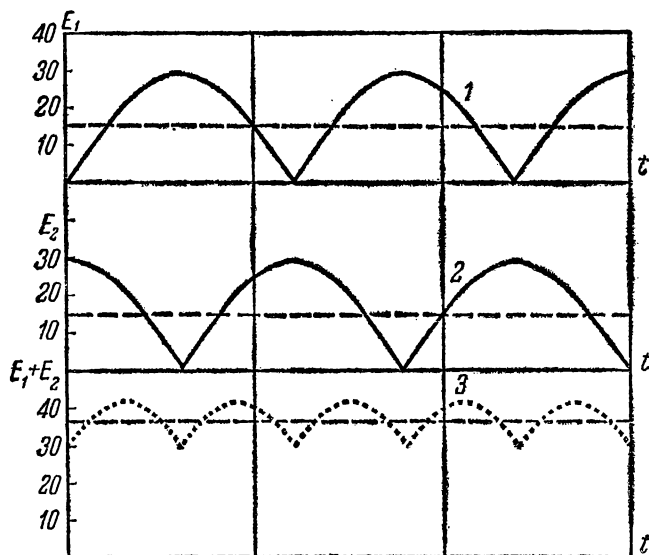


Рис. 347. Кривые 1 и 2 изображают изменение со временем э. д. с., индуцируемых в двух секциях обмотки, соединенных с одной и той же парой пластин коллектора. Кривая 3 получена путем сложения ординат кривых 1 и 2; она изображает результирующую э. д. с., или напряжение на зажимах машины. Пунктирными прямыми показаны средние значения соответствующих э. д. с.

То же, очевидно, будет иметь место и в нашем генераторе, если к его зажимам (точкам *M* и *N* на рис. 346) мы присоединим какую-нибудь нагрузку (лампы, двигатели и т. п.): напряжение на зажимах машины будет равно напряжению, создаваемому в каждой из двух параллельных ветвей, на которые распадается якорь генератора.

Э. д. с., индуцирующиеся в каждой из этих ветвей, складываются из э. д. с. каждой из последовательно соединенных секций, входящих в эту ветвь. Поэтому мгновенное значение результирующей э. д. с. будет равно сумме мгновенных

значений этих отдельных э. д. с. Но при определении формы результирующего напряжения на зажимах машины нужно учитывать два обстоятельства: 1) благодаря наличию коллектора каждое из складываемых напряжений выпрямляется, т. е. имеет форму, изображаемую кривыми 1 или 2 на рис. 347, и 2) напряжения эти сдвинуты по фазе на четверть периода, так как секции, входящие в каждую ветвь, смещены друг относительно друга на четверть окружности, $\frac{\pi}{2}$. Кривая 3 (на рис. 347), полученная путем сложения соответ-

ственных ординат кривых 1 и 2, изображает форму напряжения на зажимах машины. Как видим, пульсации на этой кривой имеют удвоенную частоту и значительно меньше, чем пульсации в каждой секции. Напряжение и ток в цепи уже не только прямые (не меняющие направления), но и почти постоянные.

Чтобы еще более сгладить пульсации и сделать ток практически совершенно постоянным, на практике помещают на якоре машины не четыре отдельные секции, а значительно большее число их: 8, 16, 24,... Такое же число раздельных пластин имеется на коллекторе. Схемы соединения при этом, конечно, значительно усложняются, но принципиально такой якорь ничем не отличается от описанного. Все секции его образуют одну короткозамкнутую цепь, распадающуюся по отношению к щеткам машины на две параллельные ветви, в каждой из которых действуют последовательно соединенные и смещенные по фазе друг относительно друга на определенный угол э. д. с. половинного числа секций. При сложении этих э. д. с. получается почти постоянная э. д. с. с очень малыми пульсациями.

§ 170. Генераторы с независимым возбуждением и динамомашины. Магнитное поле в генераторах создается, как мы говорили в § 168, электромагнитами, через обмотки которых должен проходить постоянный ток. В генераторах переменного тока этот ток для обмоток индуктора получают либо от отдельной аккумуляторной батареи, либо — чаще — от отдельного генератора постоянного тока, укрепленного на одном валу с главной машиной (рис. 335). Такого рода машины, в которых ток для создания магнитного поля берется от отдельного источника, называются машинами с независимым возбуждением.

В генераторах постоянного тока можно использовать для создания постоянного магнитного поля постоянный ток, вырабатываемый самим генератором. Такого типа генераторы называют динамомашинами или машинами с самовозбуждением.

Соединить цепь индуктора, цепь якоря и сеть можно двумя различными способами, которые схематически показаны на рис. 348 и 349. На рис. 348 изображена так называемая динамомашина с последовательным возбуждением, или, как ее иногда называют, с е-

рисная динамомашина. Здесь цепь индуктора, внешняя сеть и цепь якоря соединены последовательно, так что весь ток, индуцируемый при работе машины в якоре, проходит последовательно через индуктор и через сеть. То к через индуктор равен току в сети.

В динамомашине с параллельным возбуждением, называемой также шунтовой динамомашиной, изображенной на рис. 349, зажимы цепи

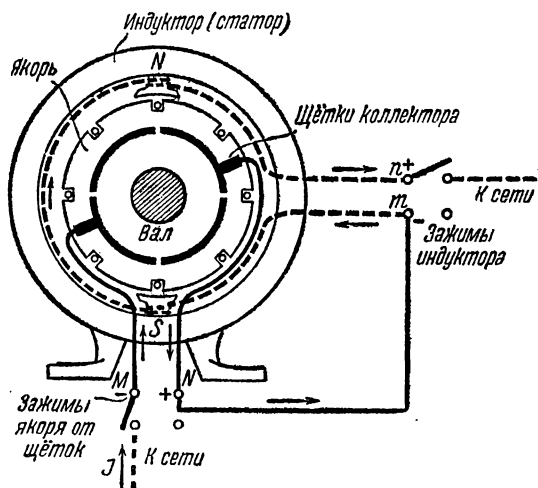


Рис. 348. Схема соединения индуктора, якоря и внешней сети в динамомашине с последовательным возбуждением (серийная динамомашина).

якоря и цепи индуктора соединены параллельно и к ним присоединена сеть (нагрузка). Таким образом, ток, возникающий в цепи якоря, разветвляется: часть его проходит через сеть, а другая часть отводится и проходит через обмотки индуктора, создавая магнитное поле, необходимое для работы машины. В этом случае ток в индукторе составляет лишь часть — обычно небольшую — тока в сети.

Упражнения. 170.1. По внешнему виду легко сразу отличить, имеем ли мы дело с серийной или шунтовой динамомашиной или мотором. В серийных машинах обмотка возбуждения состоит из отно-

сительно небольшого числа витков толстой проволоки; обмотка же шунтовых машин делается из более тонкой проволоки, но содержит значительно большее число витков. Чем это объясняется?

170.2. Можно ли пустить в ход серийную динамомашину без нагрузки, т. е. отключив ее от сети? Можно ли таким же образом запустить шунтовую динамомашину?

Если бы при пуске в ход генератора его электромагниты были совершенно размагничены, т. е. не создавали никакого магнитного поля, то, очевидно, при вращении якоря в нем не

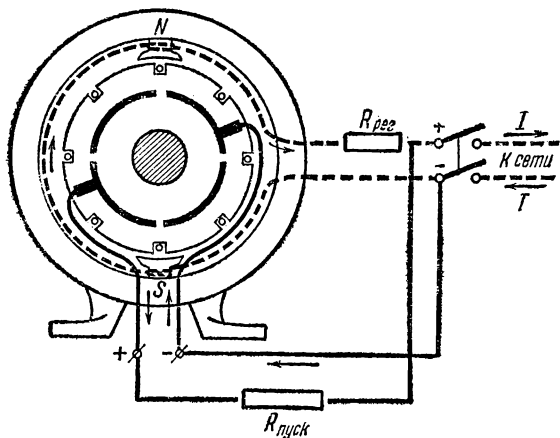


Рис. 349. Схема соединений якоря и индуктора в динамомашине с параллельным возбуждением (шунтовая динамомашинa).
 $R_{\text{рег}}$ — регулировочный реостат в цепи индуктора;
 $R_{\text{пуск}}$ — реостат в цепи якоря.

возникала бы индуцированная электродвижущая сила и откуда было бы взяться току для питания электромагнитов. Но фактически сердечники один раз намагниченных электромагнитов сохраняют всегда некоторое, хотя бы и очень слабое остаточное намагничивание. Таким образом, в машине всегда имеется магнитное поле, хотя до начала работы машины это поле очень слабо. Как только в этом поле начнет вращаться якорь, в нем возникает слабый индуцированный ток. Проходя по обмоткам электромагнита, этот ток усиливает магнитное поле, возрастание которого приводит к усилению индуцированной э. д. с. и тока. При этом еще более усиливается поле, еще возрастает индуцированный ток и т. д.

Таким образом, в первые моменты напряжение на зажимах машины очень мало, но оно быстро возрастает и достигает того значения, на которое машина рассчитана ¹⁾.

У п р а ж н е н и я. 170.3. На динамомашинх постоянного тока всегда указывается, в какую сторону нужно вращать их ротор. Никогда не следует пускать машину в обратную сторону. Почему? Что произойдет, если мы пустим машину в обратную сторону?

170.4. Что следует сделать, если случайно статор динамомашинны размагнитится и она при пуске в ход не будет давать напряжения?

Эксплуатационные свойства машин с последовательным и параллельным возбуждением существенно различны. В машинах первого типа, если мы отключим их от внешней сети, цепь якоря и индуктора оказывается разомкнутой, и ток через них проходить не может. Поэтому не будет иметь места и описанный выше процесс с а м о в о з б у ж д е н и я, т. е. постепенного нарастания \mathcal{E} . д. с., индуцируемой в якоре, следовательно, *динамомашину с последовательным возбуждением нельзя запустить вхолостую, т. е. без внешней нагрузки*. По мере того, как мы увеличиваем эту нагрузку, т. е. уменьшаем сопротивление внешней цепи и, стало быть, увеличиваем ток в ней, возрастает и ток в индукторе, равный току в сети. До тех пор, пока железо в индукторе не достигло состояния магнитного насыщения, будет соответственно возрастать и создаваемый индуктором магнитный поток, а вместе с ним будут возрастать и индуцируемая в якоре \mathcal{E} . д. с. и напряжение на зажимах машины. Когда же железо в индукторе намагнитится до насыщения, то дальнейшее увеличение тока в его обмотках будет вызывать очень малое возрастание магнитного потока, которое уже не в состоянии компенсировать все более возрастающую потерю напряжения на обмотках якоря. Поэтому напряжение на зажимах машины начнет падать; при коротком замыкании внешней сети напряжение упадет до нуля, а ток короткого замыкания будет в несколько раз превосходить нормальный ток, на который рассчитана машина.

Таким образом, зависимость напряжения на зажимах серийной динамомашинны от величины тока, который она

¹⁾ Само собой разумеется, что в машинах с параллельным возбуждением зажимы якоря и индуктора должны быть соединены так, чтобы при вращении якоря в определенном направлении индуцируемый в нем ток у с и л и в а л, а не ослаблял имеющееся в машине остаточное намагничивание. Иначе \mathcal{E} . д. с. индуцируемая в якоре, будет не возрастать, а уменьшаться, стремясь к нулю.

посылает во внешнюю сеть, имеет вид, графически изображаемый кривой на рис. 350. Эта кривая, называемая внешней характеристикой динамомашин, показывает, что с ростом нагрузки напряжение сначала круто растет, достигая нормального значения только при нормальном токе, а затем спадает до нуля. Ясно, что такая резкая зависимость напряжения генератора от величины потребляемого тока практически очень неудобна. Поэтому

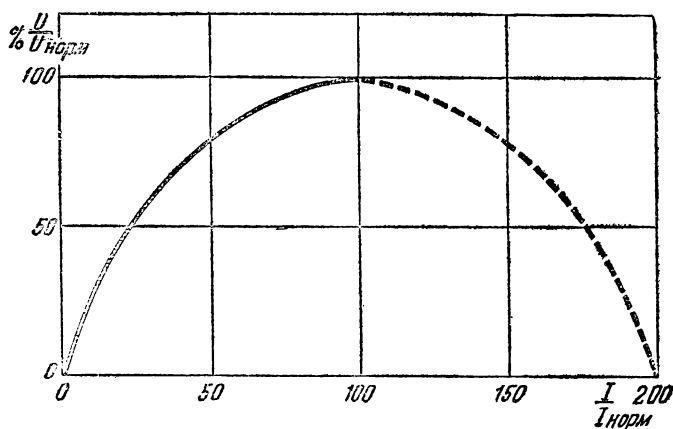


Рис. 350. Внешняя характеристика динамомашин с последовательным возбуждением. По оси ординат и по оси абсцисс за 100% принято нормальное значение напряжения на зажимах машины и нормальная величина тока в сети.

динамомашин с последовательным возбуждением на практике в качестве генераторов постоянного тока применяются чрезвычайно редко.

Внешняя характеристика динамомашин с параллельным возбуждением, изображенная на рис. 351, имеет совершенно иной вид. По мере того, как мы уменьшаем сопротивление сети, т. е. увеличиваем ток в ней, напряжение на зажимах машины падает. Нетрудно понять, чем это обусловлено. Когда уменьшается сопротивление внешней сети (растет нагрузка), то все большая часть тока в якоре ответвляется в сеть и все меньшая — в индуктор, так как отношение величин тока в этих параллельно по отношению к якору включенных цепях обратно пропорционально их сопро-

тивлениям (§ 50). Поэтому с ростом нагрузки уменьшается ток в цепи индуктора, а следовательно, и его магнитный поток и индуцируемая в якоре э. д. с. Однако вначале, пока железо индуктора находится в состоянии насыщения, это падение происходит довольно медленно, и при изменении величины тока от нуля до нормального значения, принятого на рисунке за 100%, не превышает 10—15% от нормального значения напряжения, на которое машина рассчитана. Таким образом, в довольношироком интервале изменений нагрузки напряжение генератора меняется очень мало.

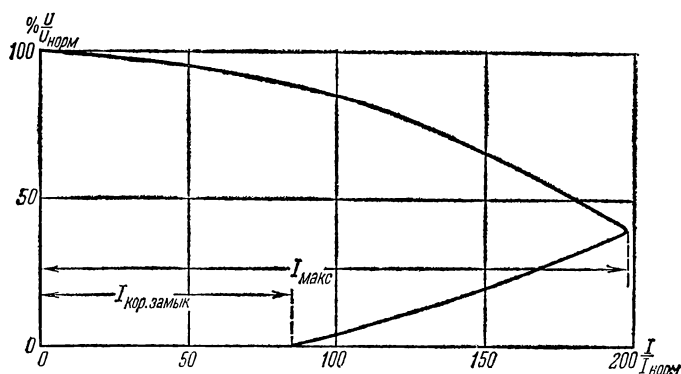


Рис. 351. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением. По оси ординат и на оси абсцисс за 100% приняты нормальные значения напряжения на зажимах машины и тока в сети.

Если в машине с параллельным возбуждением мы будем еще больше уменьшать сопротивление сети, то ток сначала будет продолжать расти, несмотря на уменьшение напряжения на зажимах машины. При некоторой нагрузке, примерно вдвое превышающей нормальную, на которую машина рассчитана, ток достигает максимального значения и потом начинает падать, потому что после того, как железо индуктора выйдет из состояния магнитного насыщения, падение напряжения, вызванное уменьшением тока в обмотках индуктора, происходит очень круто, и влияние этого фактора пересиливает влияние уменьшения сопротивления сети. При коротком замыкании сети ток упадет до относительно небольшого значения ($I_{кор. замык}$ на рис. 351), так что д л я

динамомашины с параллельным возбуждением короткое замыкание не опасно.

Еще большего постоянства напряжения при изменениях величины тока в сети можно добиться в так называемых динамомашинах со смешанным возбуждением, или компаунд-машинах. В этих машинах на полюсных наконечниках индуктора имеется по две обмотки. Одна из них соединена с якорем по схеме последовательного соединения, а другая — по схеме параллельного соединения. Так как при увеличении нагрузки э. д. с., обусловленная первыми обмотками, возрастает, а э. д. с., связанная со вторыми, падает, то при надлежащем расчете можно осуществить почти полное постоянство напряжения на зажимах машины при очень больших изменениях величины тока в сети.

§ 171. Трехфазный ток. В настоящее время во всем мире получила широчайшее распространение так называемая трехфазная система переменного тока, изобретенная и разработанная в конце прошлого века М. О. Доливо-Добровольским¹⁾. Эта система обеспечивает наиболее выгодные условия передачи электрической энергии по проводам и позволяет построить простые по устройству и удобные в работе электродвигатели.

Трехфазной системой электрических цепей называют систему, состоящую из трех цепей, в которых действуют переменные э. д. с. одной и той же частоты, сдвинутые по фазе друг относительно друга на $\frac{1}{3}$ периода ($\varphi = 120^\circ$ или $\frac{2\pi}{3}$). Каждую отдельную цепь такой системы называют коротко ее фазой, а систему трех сдвинутых по фазе переменных токов в таких цепях называют просто **трехфазным током**.

Почти все генераторы, установленные на наших электростанциях, являются генераторами трехфазного тока. По существу каждый такой генератор представляет собой соединение в одной машине трех генераторов переменного тока, сконструированных таким образом, что индуцирую-

¹⁾ М. О. Доливо-Добровольский (1862—1919) — русский электротехник.

щиеся в них э. д. с. сдвинуты друг относительно друга на одну треть периода, как это показано на рис. 352.

Как осуществляется подобный генератор, легко понять из схемы, изображенной на рис. 353. Здесь имеются три самостоятельных якоря катушки, расположенных на статоре машины и смещенных на $1/3$ окружности (120°) друг относительно друга; в центре машины вращается общий для всех трех якорей индуктор, изображенный на схеме в виде постоянного магнита. В каждой катушке индуцируется переменная э. д. с. одной и той же частоты, но при этом моменты прохождения этих э. д. с. через нуль (или через максимум) в каждой из катушек окажутся сдвинутыми на $1/3$ периода друг относительно друга, ибо индуктор проходит мимо каждой катушки на $1/3$ периода позже, чем мимо предыдущей.

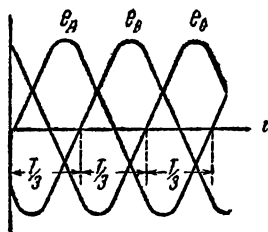


Рис. 352. Графики э. д. с., индуцирующихся в обмотках якоря генератора трехфазного тока.

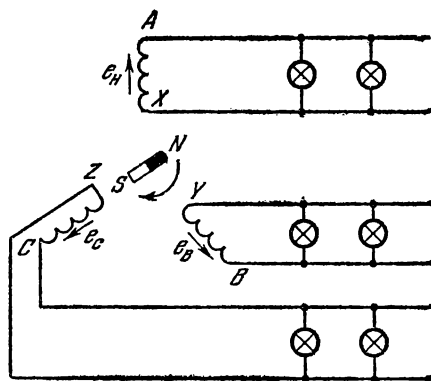


Рис. 353. Три пары независимых проводов, присоединенных к трем якорям генератора трехфазного тока, питают осветительную сеть.

Каждая обмотка трехфазного генератора является самостоятельным генератором тока и источником электрической энергии. Присоединив провода к концам каждой из них, как это показано на рис. 353, мы получили бы три независи-

мые цепи, каждая из которых могла бы питать энергией те или иные приемники, например электрические лампы. В этом случае для передачи всей энергии, которую поглощают приемники, требовалось бы ш е с т ь проводов. Можно, однако, так соединить между собой обмотки генератора трехфазного тока, чтобы обойтись четырьмя и даже тремя проводами, т. е. значительно сэкономить проводку.

Первый из этих способов, называемый соединением звездой, становится понятным из рис. 354. Будем называть зажимы обмоток A, B, C н а ч а л а м и, а зажимы X, Y, Z — к о н ц а м и соответствующих фаз. Соединение звездой

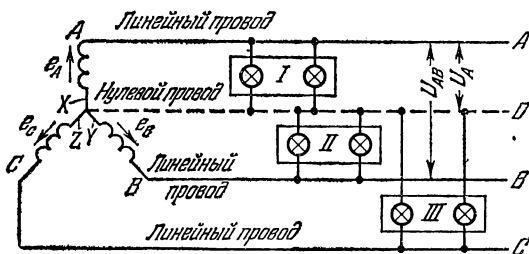


Рис. 354. Четырехпроводная система проводки при соединении обмоток трехфазного генератора звездой. Нагрузки (группы ламп) I, II, III питаются фазными напряжениями U_A, U_B и U_C .

заключается в том, что мы соединяем концы всех обмоток в одну точку генератора, которая называется н у л е в о й т о ч к о й, или н е й т р а л ь ю, и соединяем генератор с приемниками энергии четырьмя проводами: тремя так называемыми л и н е й н ы м и п р о в о д а м и, идущими от начала обмоток A, B, C , и нулевым, или н е й т р а л ь н ы м, проводом, идущим от нулевой точки генератора. Такая система проводки называется ч е т ы р е х п р о в о д н о й.

Напряжения между нулевой точкой и началом каждой фазы называют ф а з н ы м и напряжениями, а напряжения между началами обмоток, т. е. точками A и B, B и C, C и A , называют л и н е й н ы м и, или м е ж д у ф а з н ы м и. Фазные напряжения обычно обозначают U_A, U_B, U_C или в общем виде U_ϕ , а линейные U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} или в общем виде U_λ .

Можно показать, что между амплитудами или действующими значениями фазных и линейных напряжений при со-

единении обмоток генератора звездой существует соотношение

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}} \approx 1,73 \cdot U_{\text{ф}}. \quad (18,1)$$

Таким образом, например, если фазное напряжение генератора $U_{\text{ф}}=127$ в, то при соединении обмоток генератора звездой линейное напряжение $U_{\text{л}}=220$ в. Если $U_{\text{ф}}=220$ в, то $U_{\text{л}}=380$ в.

Расчет, которого мы приводить не будем, показывает, что в случае равномерной нагрузки всех трех фаз генератора, т. е. при приблизительно одинаковых токах в каждой из них, ток в нулевом проводе равен нулю. Поэтому

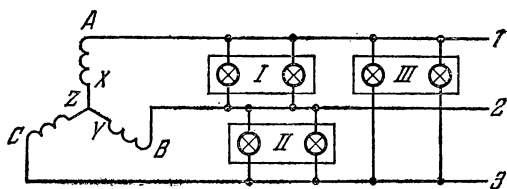


Рис. 355. Трехпроводная система проводки при соединении обмоток генератора звездой. Нагрузки (группы ламп) I, II, III питаются линейными напряжениями.

в этом случае можно нулевой провод упразднить и перейти к еще более экономной трехпроводной системе, изображенной на рис. 355. Все нагрузки включаются при этом между соответствующими парами линейных проводов.

При несимметричной нагрузке ток в нулевом проводе не равен нулю, но, вообще говоря, он слабее, чем ток в линейных проводах. Поэтому нулевой провод может быть тоньше, чем линейные. При эксплуатации трехфазного тока стремятся сделать нагрузку различных фаз по возможности одинаковой. Поэтому, например, при устройстве осветительной сети большого дома при четырехпроводной системе вводят в каждую квартиру нулевой провод и один из линейных с таким расчетом, чтобы в среднем на каждую фазу приходилась примерно одинаковая нагрузка. При трехпроводной системе вводят в одну группу помещений провода 1 и 2, в другую 2 и 3, в третью 3 и 1 с таким же расчетом.

Другой способ соединения обмоток генератора, также допускающий трехпроводную проводку,— это соединение в треугольник, изображенное на рис. 356.

Здесь конец каждой обмотки соединен с началом следующей, так что они образуют замкнутый треугольник, а линейные провода присоединены к вершинам этого треугольника — точкам *A*, *B* и *C*. Легко видеть, что при соединении треуголь-

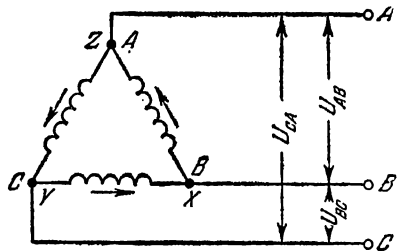


Рис. 356. Схема соединения обмоток трехфазного генератора треугольником.

ником линейное напряжение генератора равно его фазному напряжению: $U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$. Таким образом, переключение обмоток генератора со звезды на треугольник приводит к снижению линейного напряжения в $\sqrt{3} = 1,73$ раза. Соединение треугольником также допустимо лишь при одинаковой или почти

одинаковой нагрузке фаз. Иначе ток в замкнутом контуре обмоток будет слишком силен, что опасно для машины.

При применении трехфазного тока отдельные приемники (нагрузки), питающиеся от отдельных пар проводов, также могут быть соединены либо звездой, т. е. так, что один конец их присоединен к общей точке, а оставшиеся три свободных конца присоединяются к линейным проводам сети, либо треугольником, т. е. так, что все нагрузки соединяются последовательно и образуют общий контур, к точкам 1, 2, 3 которого присоединяются линейные провода сети. На рис. 357

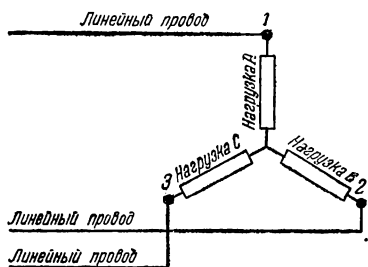


Рис. 357. Соединение нагрузок звездой при трехпроводной системе проводки.

показано соединение нагрузок звездой при трехпроводной системе проводки, а на рис. 358 — при четырехпроводной системе (в этом случае общая точка всех нагрузок соединяется с нулевым проводом). На рис. 359 показана схема соединения нагрузок треугольником (при трехпроводной системе проводки).

Практически важно иметь в виду следующее. При соединении нагрузок треугольником каждая нагрузка находится под линейным напряжением, а при соединении звездой — под напряжением в $\sqrt{3}$ раз меньшим. Для случая четырехпроводной системы это ясно из рис. 358. Но то же имеет

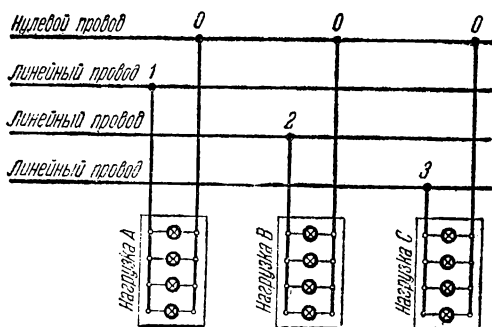


Рис. 358. Соединение нагрузок (групп ламп) А, В, С звездой при четырехпроводной системе проводки.

место и в случае трехпроводной системы (рис. 357). Между каждой парой линейных напряжений здесь включены последовательно две нагрузки, токи в которых сдвинуты по фазе на 120° . Расчет показывает, что напряжение на каждой нагрузке равно соответствующему линейному напряжению, деленному на $\sqrt{3}$.

Таким образом, при переключении нагрузок со звезды на треугольник напряжения на каждой нагрузке, а следовательно, и ток в ней повышаются в $\sqrt{3} = 1,73$ раза. Если, например, линейное напряжение трехпроводной сети равнялось 220 в, то при соединении звездой (по схеме рис. 357) напряжение на каждой из нагрузок будет равно 127 в, а при включении треугольником (по схеме рис. 359) будет равно 220 в.

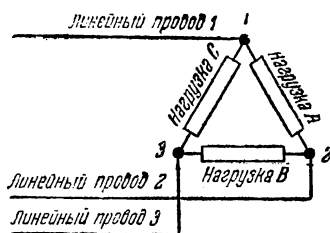


Рис. 359. Соединение нагрузок треугольником при трехпроводной системе проводки.

§ 172. Трехфазный электродвигатель (электромотор). Из большого числа типов электродвигателей переменного тока, применяющихся в современной электротехнике, наиболее широко распространенным, удобным и экономичным является двигатель с вращающимся магнитным полем, основанный на применении трехфазного тока.

Чтобы понять основную идею, лежащую в основе конструкции этих двигателей, вернемся снова к опыту, изображенному на рис. 273 (§ 140). Мы видели там, что металлическое кольцо, помещенное во вращающееся магнитное поле, приходит во вращение в ту же сторону, в какую вращается поле. Причиной этого вращения является то обстоятельство, что при вращении поля меняется магнитный поток через кольцо и при этом в кольце индуцируются токи, на которые поле действует с уже знакомыми нам силами, создающими вращательный момент.

При наличии трехфазного тока, т. е. системы трех токов, сдвинутых по фазе друг относительно друга на 120° (треть периода), очень легко получить вращающееся магнитное поле без механического вращения магнита и без всяких дополнительных устройств. Рис. 360, *а* показывает, как это осуществляется. Мы имеем здесь три надетые на железные сердечники катушки XA , YB и ZC , расположенные друг относительно друга под углом в 120° . Через каждую из этих катушек проходит один из токов системы, составляющей трехфазный ток. В катушках создаются магнитные поля, направления которых отмечены на рисунке стрелками H_A , H_B , H_C . Напряженность же каждого из этих полей и изменяется с течением времени по тому же синусоидальному закону, что и величина соответствующего тока. Таким образом, магнитное поле в пространстве между катушками представляет собой результат наложения трех переменных магнитных полей, которые, с одной стороны, направлены под углом в 120° друг по отношению к другу, а с другой стороны, смещены по фазе на 120° . Мгновенное значение результирующей напряженности H представляет собой векторную (геометрическую) сумму значений трех составляющих полей в данный момент времени:

$$H = H_A + H_B + H_C.$$

Если мы теперь станем искать, как изменяется со временем результирующая напряженность магнитного поля H , то

расчет показывает, что по величине напряженность результирующего поля не меняется (H сохраняет постоянное значение), но направление вектора H равномерно поворачивается, описывая полный оборот за время одного периода тока.

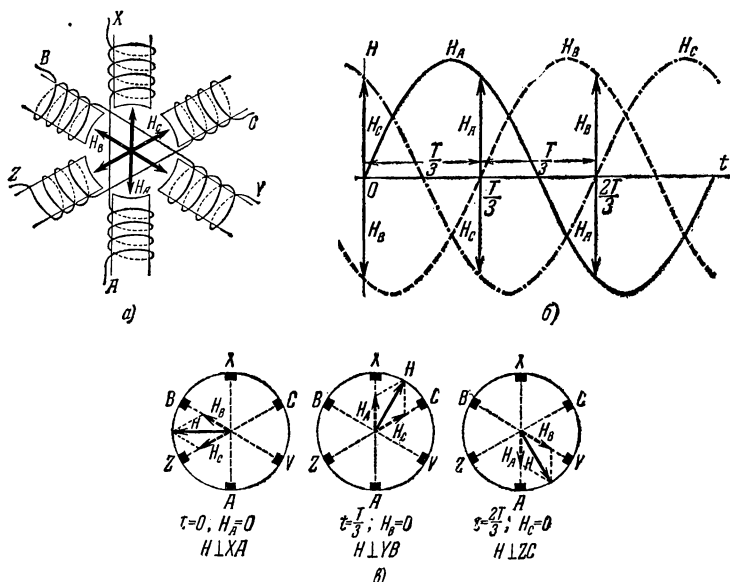


Рис. 360. Получение вращающегося магнитного поля при сложении трех синусоидальных полей, направленных под углом 120° друг относительно друга и смещенных по фазе на треть периода (120°). а) Расположение катушек XA , YB , ZC , дающих вращающееся поле. б) График изменения полей H_A , H_B , H_C со временем. в) Векторное сложение полей в моменты $t=0$, $t=\frac{T}{3}$, $t=\frac{2T}{3}$, когда соответственно поля H_A , H_B , H_C обращаются в нуль. Результирующий вектор H имеет постоянную величину и за $1/3$ периода поворачивается на $1/3$ окружности.

Не входя в подробности этого расчета, поясним, каким образом сложение трех полей H_A , H_B , H_C дает постоянное по величине вращающееся поле. Графики на рис. 360, б изображают ход изменения со временем трех полей H_A , H_B , H_C . На рисунке жирными стрелками отмечены значения напряженности этих полей в момент $t=0$, когда $H_A=0$, в момент $t=\frac{T}{3}$, когда $H_B=0$, и в момент $t=\frac{2T}{3}$, когда $H_C=0$, а на

рис. 360, в выполнено сложение по правилу параллелограмма напряженностей полей H_A , H_B и H_C в эти три момента, причем направления стрелок H_B и H_C , H_C и H_A , H_A и H_B соответствуют рисунку 360, а. Мы видим, что результирующая напряженность H имеет во все три указанных момента одно и то же численное значение, но направление ее по-

ворачивается за каждую треть периода на одну треть окружности.

Если в такое вращающееся поле мы поместим металлическое кольцо (или, еще лучше, катушку), то в нем будут индуцироваться токи так же, как если бы кольцо (катушка) вращалось в неподвижном поле. Взаимодействие магнитного поля с этими токами и создает силы, приводящие во вращение кольцо (катушку). В этом заключается основная идея трехфазного мотора с вращающимся полем,

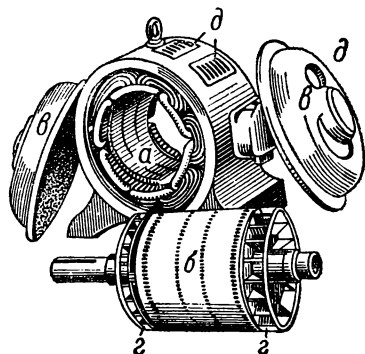


Рис. 361. Трехфазный двигатель переменного тока в разобранном виде: а — статор; б — ротор; в — подшипниковые щиты; г — вентиляторы; д — вентиляционные отверстия.

впервые осуществленного М. О. Доливо-Добровольским.

Устройство такого двигателя ясно из рис. 361, на котором двигатель изображен в разобранном виде. Его неподвижная часть — **с т а т о р** — представляет собой собранный из листовой стали цилиндр, на внутренней поверхности которого имеются пазы, параллельные оси цилиндра. В эти пазы укладываются провода, соединяющиеся между собой по торцовым сторонам статора, так, что они образуют три повернутые друг относительно друга на 120° катушки, о которых шла речь в предыдущем параграфе. Начала этих катушек А, В, С и концы их Х, У, Z присоединены к шести зажимам, находящимся на щитке, укрепленном на станине машины. Расположение зажимов показано на рис. 362.

Внутри статора помещается вращающаяся часть двигателя — его **р о т о р**. Это — также набранный из отдельных листов стали цилиндр, укрепленный на валу, вместе с которым он может вращаться в подшипниках, находящихся в боковых щитках (крышках) двигателя. На краях этого

цилиндра имеются вентиляционные лопасти, которые при вращении ротора создают в двигателе сильную струю воздуха, охлаждающую его. На цилиндрической поверхности ротора, в пазах, параллельных его оси, расположен ряд проводов, соединенных кольцами на торцах цилиндра. Такой ротор, изображенный отдельно на рис. 363, носит название «к о р о т к о з а м к н у т о г о» (иногда его называют также «белчьим колесом»). Он приходит во вращение, когда в пространстве внутри статора возникает вращающееся магнитное поле.

Это вращающееся поле создается трехфазной системой токов, подводимых к обмоткам статора, которые могут быть соединены между собой либо звездой по схеме рис. 364, либо треугольником по схеме рис. 365. В первом случае (§ 171) напряжение на каждой обмотке в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного напряжения сети, а во втором — равно ему.

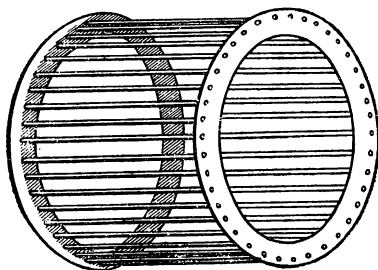


Рис. 363. Короткозамкнутый ротор трехфазного двигателя («белчье колесо»).

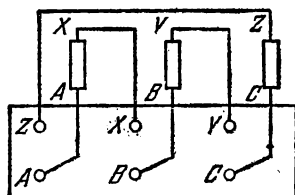


Рис. 362. Расположение зажимов на щитке двигателя.

Если, например, напряжение между каждой парой проводов трехфазной сети (линейное напряжение) равно 220 в, то при соединении обмоток треугольником каждая из них находится под напряжением в 220 в, а если они соединены звездой, то каждая обмотка находится под напряжением в 127 в. Таким образом, если обмотки двигателя рассчитаны на

напряжение в 127 в, то двигатель может работать с нормальной мощностью как от сети в 220 в при соединении его обмоток звездой, так и от сети в 127 в при соединении его обмоток треугольником. На табличке, прикрепленной к станине каждого двигателя, указываются поэтому два напряжения сети, при которых данный двигатель может работать, например 127/220 в или 220/380 в. При включении в сеть с меньшим линейным напряжением обмотки двигателя

соединяют треугольником, а при питании от сети с более высоким напряжением их соединяют звездой.

Вращающий момент двигателя создается силами взаимодействия магнитного поля и токов, индуцируемых им в роторе, а величина этих токов (или соответствующей э. д. с.) определяется относительной скоростью движения поля по отношению к ротору, который сам вращается в ту же сторону, что поле. Поэтому, если бы ротор вращался с той же скоростью, что и поле, то никакого относительного

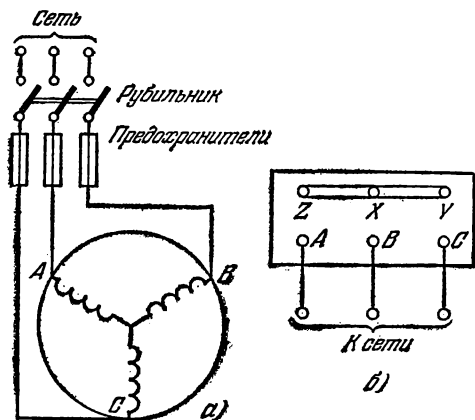


Рис. 364. Включение обмоток статора звездой: а) схема включения двигателя; б) соединение зажимов на щитке. Зажимы Z, X, Y соединены «накоротко» металлическими шинами; к зажимам A, B, C присоединяются провода трехфазной сети.

движения их не было бы. Тогда ротор находился бы в покое относительно поля и в нем не возникала бы никакая индуцированная э. д. с., т. е. в роторе не было бы тока и не могли бы возникнуть силы, приводящие его во вращение. Отсюда ясно, что двигатель описываемого типа может работать только при числе оборотов, несколько отличающемся от числа оборотов поля, т. е. от частоты тока. Поэтому такие двигатели в технике принято называть «а синхронными» (от греческого слова «синхронос» — совпадающий или согласованный во времени, частица «а» означает отрицание).

Таким образом, если поле вращается со скоростью N оборотов в минуту, а ротор — со скоростью n оборотов в

минуту, то вращение поля относительно ротора происходит со скоростью $N - n$ оборотов в минуту, и именно этой скоростью определяется величина индуцируемой в роторе э. д. с. и тока.

Величина $S = \frac{N - n}{N}$ называется в технике «скольжением».

Она играет очень важную роль во всех расчетах. Обычно скольжение выражается в процентах.

Когда мы включаем в сеть не нагруженный двигатель, то в первые моменты n равно или близко к нулю,

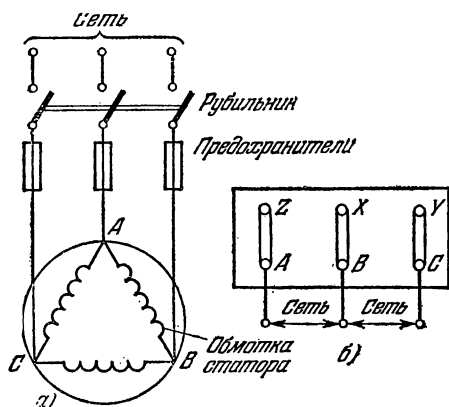


Рис. 365. Включение обмоток статора треугольником: а) схема включения; б) соединение зажимов на щитке. Металлическими полосками соединены зажимы Z и A, X и B, Y и C. К зажимам A, B, C присоединены провода сети.

частота вращения поля относительно ротора $N - n$ велика и индуцированная в роторе э. д. с. соответственно также велика — она раз в 20 превосходит ту э. д. с., которая возникает в роторе при работе двигателя с нормальной мощностью. Ток в роторе при этом тоже значительно превосходит нормальный. Двигатель развивает в момент пуска довольно значительный вращающий момент, и, так как инерция его сравнительно невелика, то число оборотов ротора быстро нарастает и почти сравнивается с числом оборотов поля, так что относительная скорость их становится почти равной нулю и ток в роторе быстро спадает. Для двигателей

малой и средней мощности кратковременная перегрузка их при пуске не представляет опасности, при запуске же очень мощных двигателей (десятки и сотни киловатт) применяются специальные пусковые реостаты, ослабляющие ток в обмотке; по мере достижения нормального числа оборотов эти реостаты постепенно выключают.

По мере того как возрастает нагрузка двигателя, число его оборотов несколько уменьшается, относительная скорость вращения поля относительно ротора возрастает, и вместе с тем растут ток в роторе и развиваемый двигателем вращающий момент. Однако для изменения мощности двигателя от нуля до нормального значения требуется очень небольшое изменение скорости вращения ротора, примерно до 6% от максимального значения. Таким образом, *асинхронный трехфазный двигатель сохраняет почти постоянное число оборотов при очень широких колебаниях нагрузки*. Регулировать это число оборотов в принципе возможно, но соответствующие устройства сложны и неэкономичны и потому на практике применяются очень редко. Если машины, приводимые в действие двигателем, требуют иного числа оборотов, чем этот двигатель дает, то предпочитают применять зубчатые или ременные передачи с различными передаточными числами.

Само собой разумеется, что при возрастании нагрузки двигателя, т. е. отдаваемой им механической мощности, должен возрастать не только ток в роторе, но и ток в статоре для того, чтобы двигатель мог поглощать из сети соответствующую электрическую мощность. Это осуществляется автоматически вследствие того, что ток в роторе также создает в окружающем пространстве свое магнитное поле, воздействующее на обмотки статора и индуцирующее в них некоторую э. д. с. Связь между магнитным потоком ротора и статора, или, как говорят, «реакция якоря», обуславливает изменения тока в статоре и обеспечивает согласование электрической мощности, отбираемой из сети, с механической мощностью, отдаваемой двигателем. Детали этого процесса довольно сложны, и мы в них входить не будем.

Очень важно, однако, помнить, что хотя недогруженный двигатель и отбирает от сети такое количество энергии, которое соответствует совершаемой им работе, но при недогрузке его, когда ток в статоре падает, это обусловлено возрастанием индуктивного сопротивления

статора, т. е. уменьшением коэффициента мощности (§ 164), что портит условия эксплуатации сети в целом. Если, например, для работы станка достаточно мощности в 3 квт, а мы установим на нем мотор в 10 квт, то данное предприятие почти не понесет ущерба — мотор все равно возьмет только ту мощность, которая требуется для его работы, плюс потери в самом двигателе ¹⁾. Но такой недогруженный мотор имеет большое индуктивное сопротивление и уменьшает коэффициент мощности сети. Он убыточен с точки зрения всего народного хозяйства в целом. Чтобы стимулировать борьбу за повышение коэффициента мощности, организации, отпускающие потребителям электроэнергию, применяют систему штрафов за слишком низкий по сравнению с установленной нормой коэффициент мощности и поощрений за его повышение.

Поэтому при работе с двигателями необходимо твердо соблюдать следующие правила:

1. *Всегда подбирать двигатель такой мощности, какую фактически требует приводимая им в действие машина.*

2. *Если нагрузка двигателя не достигает 40% нормальной, а обмотки статора включены треугольником, то целесообразно переключить их на звезду.* При этом напряжение на обмотках уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, а намагничивающий ток — почти в три раза. В тех случаях, когда такое переключение приходится производить часто, двигатель включают в сеть при помощи перекидного рубильника по схеме рис. 366. В одном положении рубильника, как легко видеть из этого рисунка, обмотки включены треугольником, в другом — звездой.

Для того чтобы изменить направление движения двигателя на обратное, необходимо поменять местами два линейных провода, присоединенных к двигателю. Это легко осуществить при помощи двухполюсного переключателя, как показано на рис. 367. Переводя ножи переключателя из положения 1,1 в положение 2,2, мы меняем направление вращения магнитного поля и вместе с тем направление вращения вала двигателя.

¹⁾ Мощный мотор, работающий с недогрузкой, т. е. при малом коэффициенте мощности, берет больший ток, чем мотор, рассчитанный на данную мощность. А так как потери на джоулево тепло (нагревание проводников током) растут как квадрат тока, то и бесполезные потери мощности в недогруженном моторе больше, чем в моторе, работающем при нормальной мощности.

Мы видели, что при наличии в статоре двигателя трех катушек, смещенных друг относительно друга на 120° , магнитное поле вращается с частотой тока, т. е. совершает один оборот за $1/50$ часть секунды, или 3000 оборотов в минуту. Почти с такой же скоростью будет вращаться и вал двигателя. Во многих случаях такая с к о р о с т ь в р а щ е н и я является чрезмерно большой. Чтобы у м е н ь ш и т ь ее, в статоре двигателя размещают не три катушки, а шесть или

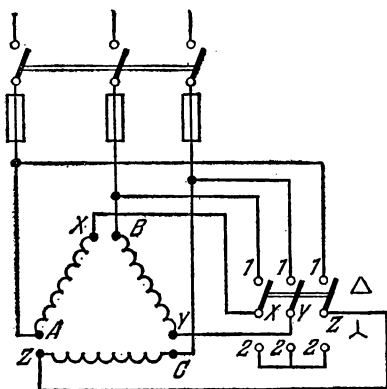


Рис. 366. Схема переключения обмоток двигателя с треугольника (положение рубильника 1, 1, 1) на звезду (положение рубильника 2, 2, 2).

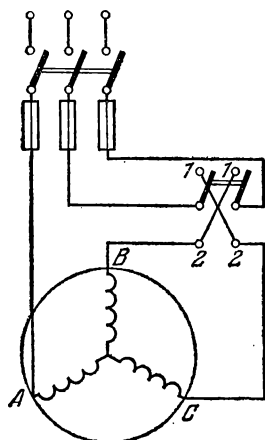


Рис. 367. Схема включения для изменения направления вращения трехфазного двигателя.

двенадцать и соединяют их так, чтобы северные и южные полюсы по окружности статора чередовались. При этом поле поворачивается за каждый период тока только на половину или четверть оборота, т. е. вал машины вращается со скоростью около 1500 или 750 оборотов в минуту.

Наконец, еще одно практически важное замечание. При повреждении (пробое) и изоляции станины и кожухи электрических машин и трансформаторов оказываются под напряжением относительно Земли. Прикосновение к этим частям машин может при таких условиях быть опасным для людей. Для предупреждения этой опасности следует при напряжениях свыше 150 в относительно Земли заземлять станины и кожухи электрических машин и трансформаторов,

т. е. надежно соединять их металлическими проводами или стержнями с Землей. Это выполняется по специальным правилам, которые необходимо строго соблюдать во избежание несчастных случаев.

§ 173. Электродвигатели (моторы) постоянного тока. Вращая генератор постоянного тока какой-нибудь внешней силой, мы затрачиваем определенную механическую мощность $P_{\text{мех}}$, а в сети получаем соответствующую электрическую мощность $P_{\text{эл}}$. Прделаем теперь с нашим генератором (динамомашинной) обратный опыт. Приключим к зажимам машины какой-нибудь внешний источник тока, например аккумуляторную батарею, и пропустим ток от этого источника через индуктор и якорь машины, соединенные последовательно или параллельно, как на рис. 348 и 349. Мы увидим, что тотчас же якорь машины придет во вращение. Соединив вал якоря со станком, мы можем привести в движение и станок. Наша машина будет теперь работать как электрический двигатель, или мотор. Теперь превращение энергии происходит в обратном направлении: мы затрачиваем определенную электрическую мощность $P_{\text{эл}}$, которую мы заимствуем от внешнего источника тока, и превращаем ее в соответствующую механическую мощность $P_{\text{мех}}$.

Происхождение сил, создающих действующий на якорь электродвигателя вращающий момент, понять нетрудно. Когда мы пропускаем ток через витки якоря, находящиеся в магнитном поле индуктора, то на них действуют силы, перпендикулярные к направлению тока и направлению напряженности магнитного поля; направление этих сил может быть определено по правилу левой руки (§ 134).

На рис. 368, например, показаны силы, действующие на отдельные проводники обмотки (секции) якоря в момент, когда плоскость этой обмотки расположена под некоторым углом к направлению магнитного поля. Легко видеть, что силы, действующие на «соединительные» проводники BC , AG и DE , лежащие в плоскости, перпендикулярной к оси вращения, всегда направлены параллельно этой оси. Поэтому они не создают момента вращения якоря, а стремятся лишь деформировать, сжать или растянуть его обмотку. Силы же, действующие на проводники AB и CD , параллельные оси вращения, перпендикулярны к этой оси и создают вращательный момент, который и приводит во вращение

вал якоря и связанные с ним валы станков, оси трамваев и т. п.

Действующий на якорь механический вращающий момент имеет наибольшее значение тогда, когда соответствующий виток лежит в плоскости, параллельной направлению магнитного поля. По мере вращения витка этот момент вращения уменьшается и обращается в нуль, когда виток

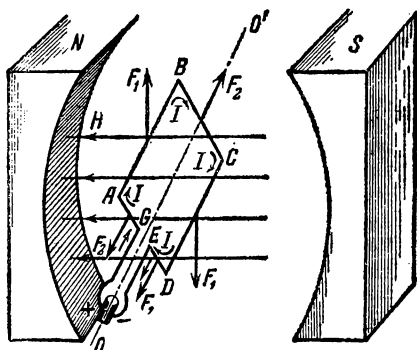


Рис. 368. Возникновение момента вращения, действующего на виток с током, находящийся в магнитном поле. Направление тока указывается стрелками I ; направление поля — стрелками H ; направление сил, действующих на «активные» проводники AB и CD , — стрелками F_1 , а направление сил, действующих на соединительные проводники AC , ED и BC , — стрелками F_2 .

становится перпендикулярно к направлению поля. В этом положении силы, действующие на проводники AB и CD , лежат в одной плоскости (плоскости витка), так что они не создают момента вращения, а стремятся только деформировать рамку. При дальнейшем повороте витка знак вращающего момента меняется, т. е. он начинает действовать в противоположную сторону. Поэтому, если бы не было коллектора, то направление вращающего момента менялось бы после каждого полуоборота якоря, и длительное вращение было бы невозможно.

Но, как мы видели, коллектор коммутирует (изменяет) направление тока в обмотках как раз в те моменты, когда виток стоит перпендикулярно к линиям поля. Благодаря этому вращающий момент сохраняет свое направление и якорь вращается постоянно в одну сторону.

Таким образом, когда машина работает как генератор постоянного тока, то роль коллектора заключается в выпрямлении переменного тока, индуцируемого в ее обмотках, а когда машина работает как двигатель, то коллектор таким же образом «выпрямляет» вращающий момент, т. е. заставляет машину длительно вращаться в одну сторону.

Направление вращения коллекторного двигателя зависит от соотношения между направлением магнитного поля индуктора и направлением тока в якоре. Различные возможные здесь случаи изображены на рис. 369. Мы видим из этого рисунка, что для того, чтобы изменить направление вращения двигателя, нужно изменить направление тока *либо* в якоре машины *либо* в индукторе. Если же мы одновременно изменим направление *обоих* токов, например присоединим тот зажим машины, который раньше был соединен с положительным зажимом сети, к отрицательному и наоборот, то машина будет продолжать вращаться в прежнюю сторону.

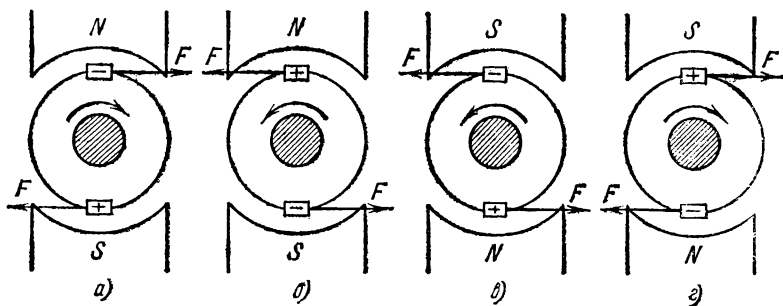


Рис. 369. Направление вращения двигателя постоянного тока в зависимости от направления магнитного поля и направления тока. Прямоугольники изображают сечение проводника с током; знак плюс обозначает направление тока от зрителя, знак минус—к зрителю. Стрелки F показывают силы, действующие на проводники с током.

Из этого ясно, что снабженный коллектором электродвигатель постоянного тока может работать и от сети переменного тока, потому что при каждом изменении направления тока будет одновременно меняться и направление тока и в индукторе и в якоре. Однако такие коллекторные двигатели переменного тока применяются сравнительно редко, преимущественно в виде двигателей малой мощности. В технике чаще всего применяются, как мы говорили, описанные в § 172 трехфазные моторы с вращающимся полем.

У п р а ж н е н и е 173.1. Проверьте правильность рис. 369 при помощи правила левой руки.

Силы, действующие в магнитном поле на проводники якоря, по которым идет ток, существуют и тогда, когда этот ток возникает в результате и н д у к ц и и, т. е. машина работает как г е н е р а т о р, и тогда, когда этот ток посылается в н е ш н и м и с т о ч н и к о м, т. е. машина работает как д в и г а т е л ь.

Когда машина работает как генератор, эти силы по общему закону Ленца направлены так, чтобы создаваемый ими вращательный момент тормозил процесс, вызывающий появление индуцированной э. д. с., т. е. был противоположен тому моменту, который приводит машину во вращение. Таким образом, в этом случае приводящие машину во вращение внешние силы должны преодолеть, уравновесить те силы, которые действуют на якорь в магнитном поле. Понятно, что эти силы тем больше, чем больше ток в якоре, т. е. чем больше электрическая мощность, потребляемая в сети, которую питает данный генератор. Поэтому по мере возрастания электрической нагрузки генератора $P_{эл}$ возрастает и механическая мощность $P_{мех}$, которую нужно затратить, чтобы поддержать его вращение с прежней скоростью. В этом легко убедиться, если попробовать вращать генератор от руки. При работе машины вхолостую (без нагрузки) или при очень малой нагрузке машина идет легко: нам приходится делать лишь очень небольшое усилие, чтобы вращать ее. Но если мы подключим к машине лампочку накаливания мощностью, скажем, в 100 *вт* и попробуем вращать машину так, чтобы эта лампа горела нормальным накалом, то убедимся, что это очень трудно. Приходится затрачивать большое усилие, чтобы преодолевать силы, действующие в магнитном поле индуктора на активные проводники якоря, через которые теперь проходит ток около 1 *а*. Таким образом, по мере возрастания нагрузки генератора, т. е. отдаваемой им электрической мощности $P_{эл}$, возрастает и поглощаемая им механическая мощность $P_{мех}$, необходимая для поддержания прежнего числа оборотов ротора и прежнего значения напряжения в сети.

Точно так же, когда машина работает в качестве двигателя, то при возрастании ее механической нагрузки, т. е. при увеличении отдаваемой ею механической мощности $P_{мех}$, должна соответственно возрастать и поглощаемая ею из сети электрическая мощность $P_{эл}$, т. е. должен увеличиваться ток через якорь. В правильности этого легко убедиться, включив в цепь якоря а м п е р м е т р. Когда двигатель работает

вхолостую или совершает очень небольшую работу, ток в цепи якоря очень мал. Увеличим теперь нагрузку якоря, например тормозя его вал или присоединив к двигателю какой-нибудь станок. Мы заметим, что при этом ток через якорь, измеряемый амперметром, автоматически усилится до необходимого значения, при котором отбираемая от сети электрическая мощность равна затрачиваемой двигателем полезной механической мощности плюс неизбежные потери на нагревание проводников током (джоулево тепло), на перемагничивание железа в якоре и на трение в движущихся частях машин и соединенных с ней станков.

Это автоматическое согласование электрической мощности с механической неизбежно следует из закона сохранения и превращения энергии. Но как оно происходит? Благодаря какому процессу увеличивается идущий через якорь электрический ток при увеличении механической нагрузки двигателя? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно иметь в виду, что независимо от того, работает ли наша машина как генератор или как двигатель, в витках ее якоря, вращающихся в магнитном поле индуктора, возникает индуцированная э. д. с. ($E_{\text{инд}}$), направленная согласно правилу Ленца противоположно напряжению внешней сети, к которой машина присоединена ($U_{\text{внеш}}$). Таким образом, в цепи якоря фактически действует напряжение, равное разности $U_{\text{внеш}} - E_{\text{инд}}$ и, по закону Ома, ток в якоре равен

$$I_{\text{як}} = \frac{U_{\text{внеш}} - E_{\text{инд}}}{R_{\text{як}}}, \quad (18,2)$$

где $R_{\text{як}}$ — омическое сопротивление якоря.

Если $U_{\text{внеш}} > E_{\text{инд}}$, то энергия отбирается от сети, т. е. машина работает как двигатель, если же $U_{\text{внеш}} < E_{\text{инд}}$, то машина отдает энергию в сеть, т. е. работает как генератор. Величина $E_{\text{инд}}$ тем больше, чем больше скорость вращения якоря. Пока нагрузка двигателя мала, ротор его вращается быстро, индуцированная э. д. с. $E_{\text{инд}}$ велика и почти равна $U_{\text{внеш}}$ и ток в якоре очень слаб. При увеличении механической нагрузки двигателя скорость его вращения (число оборотов) убывает, $E_{\text{инд}}$ уменьшается и ток $I_{\text{як}}$ в якоре возрастает.

§ 174. Основные рабочие характеристики и особенности двигателей постоянного тока с параллельным и последовательным возбуждением. Как и в случае генератора, обмотки индуктора и якоря двигателя могут быть соединены либо последовательно (по схеме рис. 348), либо параллельно (по схеме рис. 349). В первом случае двигатель называют двигателем с последовательным возбуждением (или серийным двигателем), во втором — двигателем с параллельным возбуждением (или шунтовым двигателем). Применяются

также двигатели со смешанным возбуждением (компаунд-двигатели), в которых часть обмоток индуктора соединена с якорем последовательно, а часть параллельно. Каждый из этих типов двигателей имеет свои особенности, делающие его применение целесообразным в одних случаях и нецелесообразным в других.

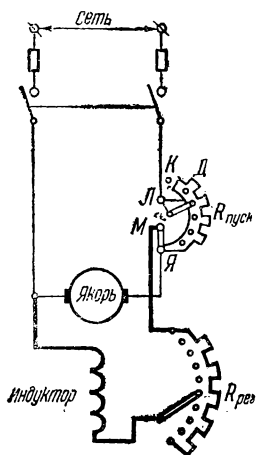


Рис. 370. Схема включения двигателя с параллельным возбуждением (шунтового).

Латунная дуга $Д$, по которой движется рычаг пускового реостата $R_{\text{пуск}}$ через зажим $М$ присоединяется к концу регулировочного сопротивления $R_{\text{рег}}$, а на другом конце $Л$ соединена с пусковым сопротивлением $R_{\text{пуск}}$. Это делается для того, чтобы при переводе пускового реостата на холостой контакт $К$ и выключении тока цепь возбуждения не разрывалась. Такой разрыв был бы опасен, так как при быстром изменении тока в индукторе вследствие процесса самоиндукции в нем могли бы индуцироваться опасные для изоляции машины большие э.д.с. При замыкании же индуктора на якорь, что имеет место при переводе $R_{\text{пуск}}$ на холостой контакт, ток в индукторе спадает медленно и опасные э.д.с. не индуцируются. Кроме того, при этом в контактах не возникает портящая их электрическая дуга.

реостат и лишь после этого выключить рубильник, соединяющий двигатель с сетью.

1) Двигатели с параллельным возбуждением. Схема включения в сеть двигателей этого типа показана на рис. 370. Так как здесь цепи якоря и индуктора не зависят друг от друга, то величину тока в них можно регулировать независимо при помощи отдельных реостатов, включенных в эти цепи. Реостат $R_{\text{пуск}}$, включенный в цепь якоря, называют пусковым, а реостат $R_{\text{рег}}$, включенный в цепь индуктора, — регулировочным. При пуске в ход двигателя с параллельным возбуждением пусковой реостат должен быть обязательно полностью включен; по мере того как двигатель набирает скорость, сопротивление $R_{\text{пуск}}$ постепенно уменьшают и при достижении двигателем нормального числа оборотов этот реостат выводится из цепи полностью. Двигатели с параллельным возбуждением, особенно более или менее значительной мощности, — ни в коем случае нельзя включать без пускового реостата. Точно так же при выключении двигателя следует сначала постепенно ввести

Нетрудно понять соображения, которыми вызваны эти правила включения и выключения двигателей. Мы видели, что ток в якоре

$$I_{\text{як}} = \frac{U_{\text{внеш}} - E_{\text{инд}}}{R_{\text{як}}}, \quad (18,2)$$

где $U_{\text{внеш}}$ — напряжение сети, а $E_{\text{инд}}$ — э. д. с., индуцирующаяся в обмотках якоря. В первый момент, когда двигатель еще не успел раскрутиться и набрать достаточное число оборотов, величина $E_{\text{инд}}$ очень мала и ток через якорь приближенно равен

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{внеш}}}{R_{\text{як}}}.$$

Сопротивление якоря обычно очень мало. Оно рассчитывается так, чтобы падение напряжения на якоре $U_{\text{як}} = I_{\text{як}} \cdot R_{\text{як}}$ не превышало 5—10% от напряжения сети, на которое рассчитан двигатель. Поэтому при отсутствии пускового реостата ток в первые секунды мог бы в 10—20 раз превысить тот нормальный ток, на который рассчитан двигатель при полной нагрузке, а это для него очень опасно. При введенном же пусковом реостате с сопротивлением $R_{\text{пуск}}$ пусковой ток через якорь равен

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{внеш}}}{R_{\text{як}} + R_{\text{пуск}}}. \quad (18,3)$$

Сопротивление пускового реостата подбирают так, чтобы пусковой ток превышал нормальный не больше чем в 1,5 — 2 раза.

Поясним сказанное численным примером. Положим, что мы имеем двигатель мощностью в 1,2 *квт*, рассчитанный на напряжение в 120 *в* и имеющий сопротивление якоря $R_{\text{як}} = 1,2$ *ом*. Ток через якорь при полной нагрузке

$$I_{\text{норм}} = \frac{1200 \text{ вт}}{120 \text{ в}} = 10 \text{ а}.$$

Если бы мы включили этот двигатель в сеть без пускового реостата, то в первые секунды пусковой ток через якорь имел бы значение

$$I_{\text{пуск}} = \frac{120 \text{ в}}{1,2 \text{ ом}} = 100 \text{ а},$$

в 10 раз превышающее максимальный рабочий ток в якоре. Если же мы хотим, чтобы пусковой ток превышал нормальный не больше чем в 2 раза, т. е. был равен 20 *а*, то мы должны подобрать пусковое сопротивление таким, чтобы имело место равенство

$$\frac{120 \text{ в}}{(1,2 + R_{\text{пуск}}) \text{ ом}} = 20 \text{ а},$$

откуда $R_{\text{пуск}} = 4,8$ *ом*.

Ясно также, что для шунтового мотора очень опасна внезапная его остановка без выключения, например вследствие резкого возрастания нагрузки, так как при этом $E_{\text{инд}}$ падает до нуля и ток в якоре возрастает настолько, что избыток выделяемого в нем джоулева тепла может привести к

расплавлению изоляции или даже самых проводов обмотки (мотор «перегорает»).

Регулировочный реостат $R_{\text{рег}}$, включенный в цепь индуктора, служит для того, чтобы изменять число оборотов двигателя. Увеличивая или уменьшая сопротивление цепи индуктора с помощью этого реостата, мы изменяем ток в цепи индуктора, а тем самым и магнитное поле, в котором вращается якорь. Мы видели выше, что при заданной нагрузке двигателя ток в нем автоматически устанавливается такой, чтобы возникающий вращательный момент уравновешивал тормозящий момент вращения, создаваемый нагрузкой двигателя. Это достигается тем, что величина индуцированной э. д. с. достигает соответствующего значения. Но величина индуцированной э. д. с. определяется, с одной стороны, величиной магнитного поля, а с другой, скоростью вращения якоря.

Чем больше магнитный поток индуктора, тем меньше должно быть число оборотов двигателя, чтобы получить определенное значение э. д. с., и наоборот, чем слабее магнитный поток, тем больше должна быть скорость вращения. Поэтому, для того чтобы при заданной нагрузке увеличить число оборотов шунтового двигателя, нужно ослабить магнитный поток в индукторе, т. е. ввести большее сопротивление в цепь индуктора при помощи регулировочного реостата. Напротив, чтобы уменьшить число оборотов шунтового двигателя, нужно увеличить магнитный поток в индукторе, т. е. уменьшить сопротивление в цепи индуктора, выводя регулировочный реостат.

С помощью регулировочного реостата можно при нормальном напряжении и отсутствии нагрузки установить нормальное число оборотов двигателя. При возрастании нагрузки ток в якоре должен возрастать, а индуцированная в нем э. д. с. — уменьшаться. Это происходит вследствие некоторого уменьшения скорости вращения якоря. Однако уменьшение скорости, обусловленное возрастанием нагрузки от нуля до нормальной мощности двигателя, обычно очень незначительно и не превышает 5—10% от нормального числа оборотов двигателя. Это обусловлено главным образом тем, что в двигателях с параллельным включением ток в индукторе не меняется при изменении тока в якоре. Если бы при изменениях нагрузки мы хотели поддерживать прежнее значение числа его оборотов,

то это легко можно было бы осуществить, изменяя несколько с помощью регулировочного реостата ток в цепи индуктора.

Таким образом, с эксплуатационной точки зрения двигатели постоянного тока с параллельным включением (шунтовые моторы) характеризуются следующими двумя свойствами:

1) число их оборотов при изменении нагрузки остается почти постоянным,

2) скорость вращения их можно в широких пределах менять с помощью регулировочного реостата.

Поэтому такие двигатели довольно широко применяются в промышленности там, где обе указанные их особенности имеют значение, например для приведения в действие токарных и других станков, скорость вращения которых не должна сильно зависеть от нагрузки.

Упражнения. 174.1. На рис. 371 показана схема шунтового мотора постоянного тока с так называемым комбинированным пуско-регулирующим реостатом. Разберитесь в этой схеме и объясните, какую роль играют отдельные части этого реостата.

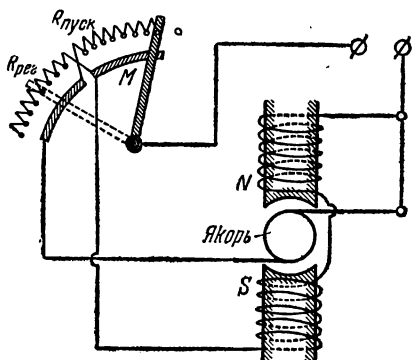


Рис. 371. К упражнению 174.1. $R_{пуск}$ и $R_{рег}$ — пусковой и регулировочный реостаты; M — металлическая полоса.

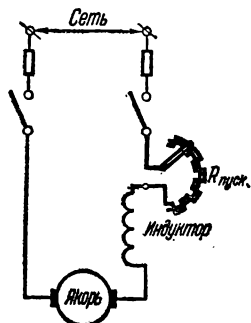


Рис. 372. Схема включения двигателя с последовательным возбуждением.

174.2. Нужно пустить в ход шунтовой мотор. Для этого даны два реостата: один из толстой проволоки с малым сопротивлением, другой из тонкой проволоки с большим сопротивлением. Какой из этих реостатов следует включить как пусковой и какой как регулировочный? Почему?

2) Двигатели с последовательным возбуждением. Схема включения в сеть этих двига-

телей показана на рис. 372. Здесь ток якоря является в то же время и током индуктора, и потому пусковой реостат изменяет и ток в якоре и ток в индукторе. При холостом ходе или очень малых нагрузках ток в якоре, как мы знаем, должен быть очень мал, т. е. индуцированная э. д. с. $E_{\text{инд}}$ должна быть почти равна напряжению сети. Но при очень малом токе через якорь и индуктор слабо и поле индуктора. Поэтому при малой нагрузке необходимая э. д. с. может быть получена только за счет очень большого числа оборотов. Вследствие этого при очень малых токах

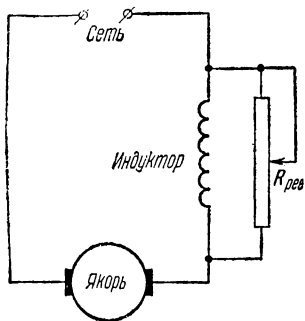


Рис. 373. Схема включения реостата для регулирования числа оборотов серийного двигателя.

(малой нагрузке) скорость двигателя с последовательным возбуждением становится настолько большой, что это может стать опасным с точки зрения механической прочности машины. Говорят, что машина идет «вразнос». Это недопустимо, и поэтому *двигатели с последовательным возбуждением нельзя пускать в ход без нагрузки или с малой нагрузкой (меньшей 20—25% нормальной мощности двигателя).* По этой же причине не рекомендуется соединять эти двигатели со станками или другими машинами

ременными или канатными передачами, так как обрыв или случайный сброс ремня приведет к «разносу» машины. Таким образом, в двигателях с последовательным включением (серийных моторах) *при возрастании нагрузки увеличиваются ток в якоре и магнитное поле индуктора; поэтому число оборотов двигателя резко падает, а развиваемый им вращательный момент резко возрастает.*

Эти свойства двигателя с последовательным возбуждением делают их наиболее удобными для применения на транспорте (трамваи, троллейбусы, электропоезда) и в подъемных устройствах (кранах), так как в этих случаях необходимо иметь в момент пуска при очень большой нагрузке большие вращающие моменты при малых скоростях вращения, а при меньших нагрузках (на нормальном ходу) меньшие моменты и большие скорости.

Таблица 8

**Преимущества, недостатки и области применения двигателей
различных типов**

Тип двигателя	Основные преимущества	Основные недостатки	Область применения
Трехфазный двигатель переменного тока с вращающимся полем.	1. Слабая зависимость числа оборотов от нагрузки. 2. Простота и экономичность конструкции. 3. Применение трехфазного тока.	1. Трудность регулирования числа оборотов. 2. Малый вращающий момент при пуске двигателя.	Станки и машины, в которых требуется постоянство числа оборотов при изменениях нагрузки, но не нужно регулировать число оборотов.
Двигатель постоянного тока с параллельным включением (шунтовой).	1. Постоянство числа оборотов при изменениях нагрузки. 2. Возможность регулирования числа оборотов.	Малый вращающий момент при пуске.	Станки и машины, требующие постоянства числа оборотов при изменениях нагрузки и возможности в широких пределах регулировать число оборотов.
Двигатель постоянного тока с последовательным включением (серийный).	Большой вращающий момент при пуске.	Сильная зависимость числа оборотов от нагрузки.	Тяговые двигатели в трамваях и электропоездах, крановые двигатели и т. п.

Регулирование числа оборотов двигателя с последовательным возбуждением производится обычно регулировочным реостатом, включаемым параллельно обмоткам индуктора (рис. 373). Чем меньше сопротивление этого реостата, тем большая часть тока якоря ответвляется в него и тем меньший ток идет через обмотки индуктора. Но при уменьшении тока в индукторе число оборотов двигателя возрастает, а при его увеличении падает. Поэтому в

отличие от того, что имело место для шунтового двигателя, для того чтобы увеличить число оборотов серийного двигателя, нужно уменьшить сопротивление цепи индуктора, выводя регулировочный реостат. Для того чтобы число оборотов уменьшить, нужно увеличивать сопротивление цепи индуктора, вводя регулировочный реостат.

Упражнение 174.3. Объясните, почему серийный мотор нельзя пускать вхолостую или с очень малой нагрузкой, а шунтовый можно.

В заключение сопоставим в виде таблицы (табл. 8) преимущества и недостатки различных типов электродвигателей, рассмотренных нами в этой главе, и области их применения.

§ 175. Коэффициент полезного действия генераторов и двигателей. В каждом электрическом генераторе или двигателе происходят некоторые бесполезные потери энергии. Они складываются из потерь на нагревание проводов проходящими по ним токами (потери в меди), потерь на токи Фуко и на нагревание стали сердечников при их перемагничивании (потери в стали) и потерь на трение. Поэтому, когда машина работает как генератор, то она отдает в сеть несколько меньшую электрическую мощность $P_{эл}$, чем та механическая мощность $P_{мех}$, которая затрачивается на ее вращение. Коэффициентом полезного действия генератора называют отношение отдаваемой электрической мощности к затрачиваемой механической мощности:

$$\eta_{ген} = \frac{P_{эл}}{P_{мех}}. \quad (18,4)$$

Точно так же, когда машина работает как двигатель, то она отдает несколько меньшую механическую мощность, чем поглощаемая ею из сети электрическая мощность. Коэффициентом полезного действия двигателя называют отношение отдаваемой механической мощности к затрачиваемой электрической мощности:

$$\eta_{двиг} = \frac{P_{мех}}{P_{эл}}. \quad (18,4')$$

Потери энергии в генераторах и двигателях сравнительно малы, и коэффициент полезного действия их близок к единице (к 100%).

§ 176. Обратимость электрических генераторов постоянного тока.
 В § 173 мы видели, что всякий генератор постоянного тока может быть, как говорят, *обращен*: если его якорь вращать внешней силой, то машина работает как генератор, т. е. посылает ток во внешнюю сеть; напротив, если через нее посылать ток от внешней сети, то машина работает как двигатель. Это свойство *обратимости* не является характерной особенностью только индукционных генераторов, которые мы рассматриваем в этой главе, а присуще и другим типам генераторов, которые мы рассматривали раньше.

На рис. 374, например, мы видим две электростатические машины, полюсы которых попарно соединены проводами. С левой машины снят приводной ремень для уменьшения трения и облегчения ее вращения.

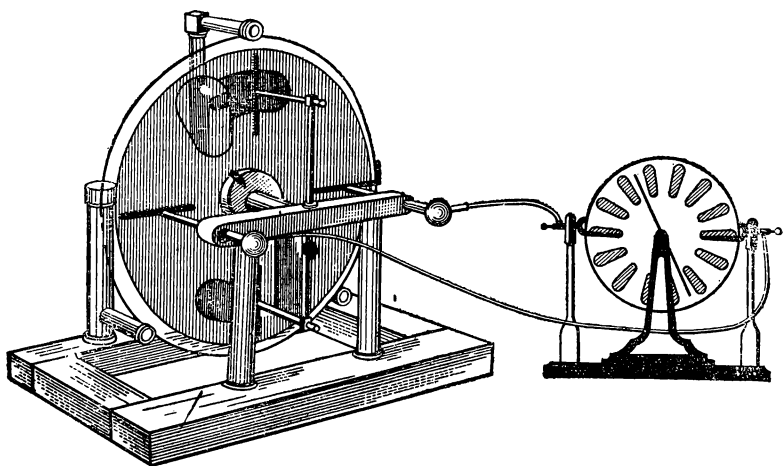


Рис. 374. Обратимость электростатических машин. Правая машина работает как генератор, левая — как мотор.

Если правую машину вращать, например, от руки, то она будет работать как генератор, превращая механическую работу наших мускулов в энергию электрического тока. Этот ток, проходя через левую машину, заставит ее вращаться, т. е. работать как двигатель. Здесь будет происходить обратное превращение электрической энергии в механическую работу.

Обратимостью обладают и химические источники тока — гальванические элементы. Это ясно обнаруживается в явлениях поляризации элементов (§ 77) и особенно в аккумуляторах (§ 79). В § 79 мы уже отмечали, что при зарядке аккумулятора электрическая энергия в нем превращается в химическую, а при разрядке — химическая в электрическую.

Обратимо также и явление возникновения термо-э. д. с. Когда за счет внешнего источника тепла мы поддерживаем разность температур между двумя спаями термоэлемента, то он работает как тепловая машина, преобразующая часть теплового потока в электрическую энергию.

Напротив, если мы будем пропускать через термоэлемент ток от в н е ш н е г о источника, то один спай его будет охлаждаться, а другой — нагреваться, т. е. за счет электрической энергии будет возникать поток тепла от холодного спаю к горячему. Это явление называется эффектом Пельтье по имени открывшего его ученого. При этом, если мы будем пропускать ток в направлении, которое для термотока соответствовало бы случаю, когда, скажем, спай *a* горячее, чем спай *b*, то в силу эффекта Пельтье спай *a* будет охлаждаться, а спай *b* нагреваться.

Явление Пельтье в полупроводниковых термоэлементах дало уже возможность построить холодильные машины, которые по экономичности не уступают некоторым типам применяющихся на практике комбинатных холодильников.

§ 177. Электромагниты. Хорошие постоянные магниты находят себе важные научные и технические применения, например в электроизмерительных приборах. Но создаваемые ими поля не очень сильны, хотя в последнее время и изготавливают специальные сплавы, которые позволяют получать сильные постоянные магниты, хорошо сохраняющие свои магнитные свойства. (К числу таких сплавов относится, например, кобальтовая сталь, содержащая около 50% железа, около 30% кобальта, а также некоторое количество вольфрама, хрома и углерода.) Кроме того, большим неудобством постоянных магнитов является невозможность быстро изменять напряженность их поля. В этом отношении гораздо удобнее применение соленоидов с током (электромагнитов), поле которых можно легко изменять, изменяя величину тока в обмотке соленоида. Напряженность поля соленоида можно увеличить в сотни и тысячи раз, помещая внутрь него железный сердечник. Именно так и устроено громадное большинство электромагнитов, применяемых в технике.

Простейший электромагнит каждый легко может приготовить себе сам. Достаточно намотать на какой-нибудь железный стержень — болт или кусок железного прута — несколько десятков витков изолированной проволоки и присоединить концы этой обмотки к источнику постоянного тока: аккумулятору или гальванической батарее (рис. 375)¹⁾. Нередко придают электромагниту подковообразную форму (рис. 376), более выгодную для удержания груза.

¹⁾ Железо рекомендуется предварительно отжечь, т. е. накаливать его докрасна, например в печке, и затем дать ему медленно остыть. Присоединять обмотку к батарее следует через реостат в 1—2 ом, чтобы не брать от батареи слишком больших токов.

Поле катушки с железным сердечником значительно сильнее, чем поле катушки без сердечника, потому что железо внутри катушки сильно намагничивается и поле его складывается с полем катушки. Однако применение железных сердечников в электромагнитах для усиления поля может оказаться полезным только до известного предела. Действительно, поле электромагнита складывается из поля, создаваемого обмоткой с током, и поля намагниченного сердечника, причем при небольших токах это последнее значительно сильнее, чем первое. При увеличении тока в обмотке оба

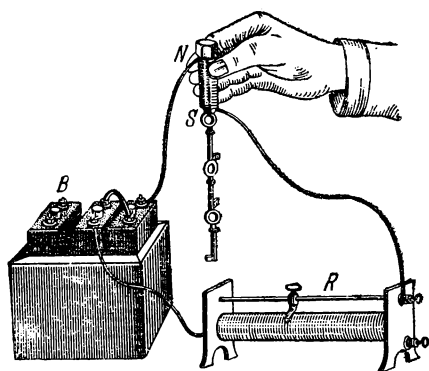


Рис. 375. Простейший самодельный электромагнит в виде стержня: *B* — батарея; *NS* — обмотка электромагнита; *R* — реостат.

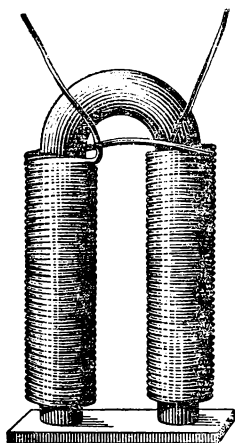


Рис. 376. Самодельный U-образный магнит.

эти поля возрастают сначала в одинаковой степени, а именно пропорционально току, так что роль сердечника продолжает оставаться решающей. Однако при дальнейшем увеличении тока в обмотке намагничивание железа начинает замедляться и железо приближается к состоянию **магнитного насыщения**. Когда практически все молекулярные токи ориентированы параллельно, дальнейшее увеличение тока обмотки уже ничего не может добавить к намагничиванию железа, тогда как поле обмотки продолжает расти пропорционально току. При большом токе в обмотке (точнее, когда число ампервитков на 1 см длины достигает больших значений, примерно нескольких десятков тысяч) поле,

создаваемое самой обмоткой, оказывается гораздо сильнее поля насыщенного железного сердечника, так что железный сердечник становится практически бесполезным и лишь усложняет конструкцию электромагнита. Поэтому с а м ы е м о щ н ы е электромагниты делают б е з ж е л е з н о г о с е р д е ч н и к а.

Нетрудно видеть, что получение таких весьма мощных электромагнитов представляет собой очень сложную техническую задачу. Действительно, чтобы иметь возможность применить большие токи, надо иметь обмотку из толстой проволоки, иначе она сильно разогреется и может даже расплавиться. Иногда вместо проволоки применяют медные трубки, в которых циркулирует сильная струя воды для интенсивного охлаждения стенок трубок, по которым течет электрический ток. Но при обмотке из толстой проволоки или трубки нельзя уложить много витков на сантиметр длины. Применение же сравнительно тонкой проволоки, обеспечивающей значительное число витков на сантиметр, не дает возможности применять большие токи.

Очень остроумный выход из этого положения нашел академик П. Л. Капица. Он пропускал через соленоид токи огромной силы — десятки тысяч ампер, — но только в течение очень короткого времени, примерно 0,01 сек. За это время обмотка соленоида не успевала чрезмерно нагреться и получались очень сильные, хотя и очень кратковременные магнитные поля. Однако специальные приборы успевали регистрировать результаты опытов, в которых изучалось влияние создаваемых в соленоиде мощных магнитных полей на различные вещества. Капица получал самые сильные магнитные поля, какие кому-либо удавалось осуществить, и опыты его имеют большое научное значение. Установка Капицы очень сложна и громоздка. Она занимает целый большой зал.

В большинстве технических электромагнитов применяются обмотки, у которых число ампервитков на сантиметр не превышает нескольких сотен, так что для их питания можно ограничиться током в несколько ампер и проволокой умеренной толщины. При наличии железного сердечника в таких электромагнитах могут быть получены довольно сильные магнитные поля (десятки тысяч эрстед).

§ 178. Применение электромагнитов. Большинство технических применений магнитов основывается на их способности притягивать и удерживать железные предметы. И в этих применениях электромагниты имеют огромные преимущества перед постоянными магнитами, ибо изменение величины тока в обмотке электромагнита позволяет быстро изменять его п о д ъ е м н у ю с и л у. Сила, с которой магнит притягивает железо, резко у б ы в а е т по мере увеличения р а с с т о я н и я между магнитом и железом.

Поэтому для определенности подъемной силой магнита условились называть силу, с которой магнит удерживает железо, расположенное в непосредственной близости к нему; другими словами, *подъемная сила магнита равна той силе, которая необходима, чтобы оторвать от магнита притянутый к нему кусок чистого мягкого железа.*

Чтобы получить электромагнит с возможно большей подъемной силой, нужно стремиться увеличить площадь соприкосновения полюсов магнита с притягиваемым железным предметом (который носит название *якоря*) и добиться того, чтобы силовые линии магнитного поля проходили

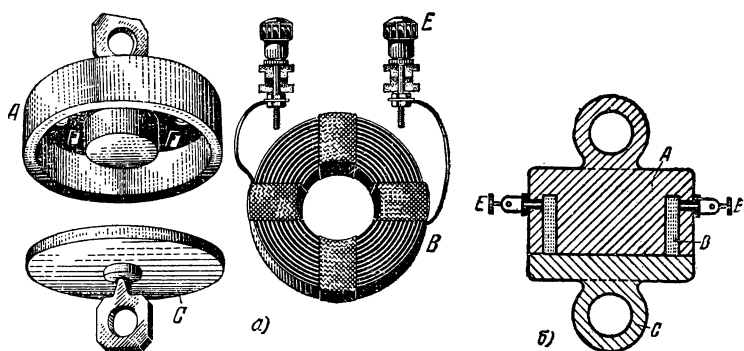


Рис. 377. Горшкообразный электромагнит в собранном виде. а) Внешний вид разобранного электромагнита; б) поперечный разрез, схема. А — тело электромагнита с выступом, на который надевается обмотка; В — обмотка с зажимами Е; С — якорь.

только в железе, т. е. устранить всякие воздушные зазоры или щели между якорем и полюсами магнита; для этого необходимо хорошо пришлифовать друг к другу их поверхности. Этим требованиям хорошо удовлетворяет конструкция так называемого *горшкообразного* магнита, изображенного на рис. 377, а и б. Такой электромагнит, питаемый аккумулятором или батареей от карманного фонаря, удерживает груз в 80—100 кг.

Электромагниты с большой подъемной силой применяются в технике для весьма различных целей. Например, *электромагнитный подъемный кран* применяется на металлургических и металлообрабатывающих заводах для переноски железного лома и готовых

изделий. На металлообрабатывающих заводах часто применяют также станки с так называемыми магнитными столами, на которых обрабатываемое железное или стальное изделие закрепляется притяжением сильных электромагнитов. Достаточно включить ток, чтобы надежно закрепить изделие в любом положении на столе; достаточно выключить ток, чтобы освободить его. При отделении магнитных материалов от немагнитных, например при отделении кусков железной руды от пустой породы (обогащение руды), применяют магнитные сепараторы, в которых очищаемый материал проходит через сильное магнитное поле электромагнитов, вытягивающее из него все магнитные частицы.

В последние годы мощные электромагниты с огромной площадью полюсов получили новые важные применения при конструировании ускорителей, т. е. специальных устройств, в которых электрически заряженные частицы — электроны и протоны — разгоняются до огромных скоростей, соответствующих энергии в сотни миллионов и миллиарды электронвольт. Пучки таких частиц, летящих с огромной скоростью, являются основным средством исследования атомного ядра (т. III). Электромагниты, применяющиеся в таких устройствах, представляют собой грандиозные сооружения.

Когда нужно получить очень сильное магнитное поле, хотя бы и в небольшом пространстве, применяют электромагниты с полюсными наконечниками в виде усеченных конусов; тогда в небольшом пространстве между ними легко получать магнитное поле с напряженностью до 50 000 э. Такие электромагниты применяются преимущественно в физических лабораториях для опытов с сильными магнитными полями.

Для специальных целей строят электромагниты и различных других типов. Врачи, например, применяют электромагниты для удаления из глаза случайно попавших в него железных опилок.

У п р а ж н е н и я. 178.1. Как построить электромагнит, подъемную силу которого можно было бы регулировать?

178.2. Укажите, каковы особенности конструкции сильного электромагнита.

178.3. Как построить сильный электромагнит, если конструктору поставлено условие, чтобы ток в электромагните был сравнительно малым?

178.4. Какой из электромагнитов, изображенных на рис. 378, имеет большую подъемную силу, если они сделаны из одинакового железа и магнитные поля их обмоток имеют одинаковое число ампервитков?

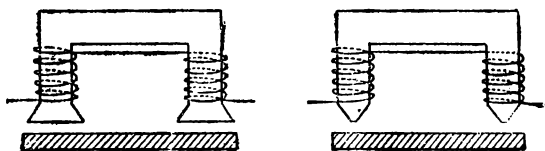


Рис. 378. К упражнению 178.4.

§ 179. Релé и их применения в технике и автоматике.

Электромагниты очень широко применяются в разного рода устройствах для передачи сигналов с помощью электрического тока. Ток, замыкаемый в одном месте, заставляет электромагнит, расположенный на другом конце цепи, притянуть якорь и этим подать тот или иной сигнал. Примеры таких простейших устройств (молоточковый прерыватель, электрический звонок, простой телеграф) общеизвестны. В современной технике применяются и гораздо более сложные устройства этого типа.

К числу их принадлежат так называемые релé — приборы, которые при включении в их цепь или выключении очень малого электрического тока замыкают или размыкают другой, гораздо больший ток, приводящий в движение какой-либо мотор или механизм.

Типы и конструкции реле очень разнообразны.

Релé, схема которого изображена на рис. 379, устроено следующим образом. Управляющий ток (малый) проходит по обмотке электромагнита E . Железный сердечник электромагнита притягивает в B железную пластину AC , замыкая в A цепь рабочего тока (большого). Пластина AC закреплена в точке C , около которой она может вращаться, и оттягивается вверх пружиной f , разрывающей контакт в A , когда электромагнит не работает. Пружина закреплена в h . Можно регулировать ее натяжение, от которого зависит, при каком наименьшем управляющем токе реле может «сработать».

Чувствительность современных реле очень велика. Существуют реле, которые «срабатывают», т. е. воздействуют на управляемый ток, уже от тока в десятитысячные и даже сотысячные доли ампера. Такие реле не могут замыкать

очень больших токов, и потому иногда применяют несколько реле, работающих последовательно. Первое реле — очень чувствительное — замыкает ток от 0,1 до 1 а в цепи второго реле, которое уже и включает или выключает рабочий ток, иногда огромной величины.

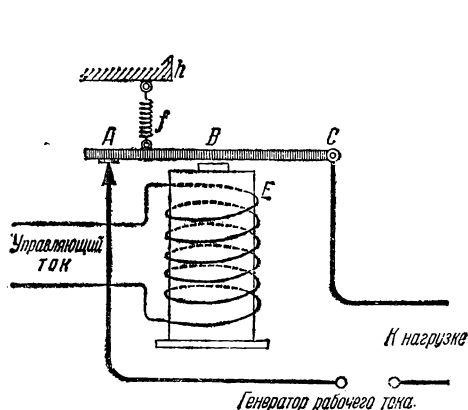


Рис. 379. Электромагнитное реле: E — электромагнит в цепи управляющего тока; A — контакт в цепи рабочего тока. Чувствительность реле регулируется изменением напряжения пружины f при помощи винта на пластинке h .

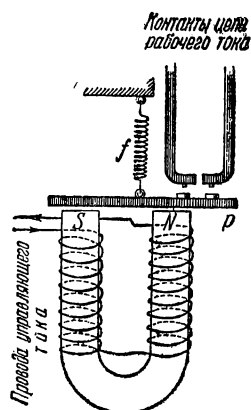


Рис. 380. К упражнению 179.1. N и S — полюсы электромагнита; P — железная пластинка; f — пружина.

У п р а ж н е н и е 179.1. На рис. 380 изображена схема так называемого реле с качающимся якорем. Основные части его указаны в подписи под рисунком. Разберитесь в том, как действует это реле, и сформулируйте письменно описание его действия. Может ли это реле применяться и при постоянном и при переменном управляющем токе?

ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ К УПРАЖНЕНИЯМ

4.1. Отклонение листочка уменьшается. **4.2.** Латунный стержень электризуется в обоих случаях. Однако если стержень касается руки, то возникающие на нем заряды уходят через тело экспериментатора. Если же стержень обернуть в резину (хороший изолятор), заряды остаются на стержне. **4.3.** Достаточно провести заряженный изолятор сквозь раскаленные газы вблизи горелки: раскаленные газы проводят ток, и поэтому заряд уйдет через облако газа и тело экспериментатора. **4.4.** При трении меха о стол мех электризуется и поэтому на теле экспериментатора, держащего мех, также появляются электрические заряды. **4.5.** Для этого достаточно положить шелк, после трения его о стекло, в ведерко электроскопа (см. рис. 9).

7.1. Потому что и волосы и гребень при трении друг о друга электризуются. **7.2.** При натирании бумаги ладонью на бумаге возникают электрические заряды. Опыт получается только с теплой, хорошо просушенной бумагой, так как только в этом случае она является хорошим изолятором.

8.1. При поднесении тела к шарiku электроскопа на стержне электроскопа появляются индуцированные заряды: на внешнем конце противоположного знака, на внутреннем — того же знака, что и на теле. Поэтому, если на электроскопе был сначала заряд того же знака, что и на теле, то суммарный заряд листочка (первоначальный заряд плюс индуцированный) увеличится и отклонение листочка станет больше. Если заряд электроскопа был противоположного знака, отклонение листочка уменьшится. **8.2.** Когда мы подносим к электроскопу положительно заряженную стеклянную палочку, электроны движутся от внутреннего конца стержня к внешнему. Когда, коснувшись предварительно шарика пальцем, мы убираем стеклянную палочку, движение электронов происходит в обратном направлении. **8.3.** Отклонение уменьшится, потому что заряд электроскопа вызовет на ближайшем к нему конце металлического тела индуцированный заряд противоположного знака, который будет уменьшать отклонение листочка (см. упражнение 8.1). **8.4.** По мере приближения отрицательного заряда индуцированный отрицательный заряд на внутреннем конце стержня и на листочке увеличивается. Поэтому результирующий заряд листочка, равный сумме первоначального положительного и увеличивающегося отрицательного, сначала уменьшается, при некотором положении тела обращается в нуль, а затем становится отрицательным, т. е. листочек перезаряжается. **8.5.** Потому что на руке появляется индуцированный заряд противоположного знака.

11.1. 9 *дин*. 11.2. Угол отклонения α равен приблизительно 5° ($\operatorname{tg} \alpha = 0,09$). 11.3. 6,2 абс. эл.-ст. единицы. 11.4. $6,5 \cdot 10^5 T$. 11.5. Сила электрического притяжения электрона к ядру $F = \frac{e^2}{R^2}$ *дин*, причем e должно быть выражено в абс. эл.-ст. единицах, а R в *см*. Эта сила создает ускорение $a = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$ (т. I, «Механика»). Стало быть, частота обращения электрона вокруг ядра должна быть такова, чтобы удовлетворялось равенство $\frac{e^2}{R^2} = m\omega^2 R$, откуда $\omega = 3,1 \cdot 10^{15}$, а число оборотов в секунду $n = \frac{\omega}{2\pi} = 4,9 \cdot 10^{14}$.

12.1. В первом случае (вата на стекле) одноименный индуцированный заряд остается на кусочках ваты и ослабляет силу притяжения между зарядом палочки и разноименным индуцированным зарядом. Во втором случае одноименный индуцированный заряд уходит через стол и притяжение получается более сильное.

14.1. 0,3 абс. эл.-ст. единицы. 14.2. 1,5 абс. эл.-ст. единицы. 14.3. 300 *дин*.

15.1. 36 *дин*.

19.1. Силовые линии являются радиальными прямыми, сходящимися к точке нахождения отрицательного заряда. См. рис. 33, относящийся к подобному случаю для положительного заряда. 19.2. Нулю. 19.3. Нулю. 19.4. Потому что флажок, подобно бумажной стрелке (§ 12) и всякому иному удлинненному телу, стремится стать вдоль силовых линий поля.

20.1. Сходство: 1) в электрическом поле (закон Кулона) сила взаимодействия между точечными зарядами обратно пропорциональна квадрату расстояния; для двух точечных масс справедливо то же самое (закон Ньютона); 2) это приводит к тому, что работа на замкнутом пути и в том и в другом поле всегда равна нулю, т. е. оба поля консервативны; 3) из этого в свою очередь вытекает как следствие, что и в электрическом поле, и в гравитационном поле (поле тяжести) существует разность потенциалов. Различие: в электрическом поле существуют заряды двух различных знаков, в то время как в гравитационном поле отрицательных масс нет. Это приводит к ряду совсем различных следствий. Например, тело может быть электрически нейтрально (не заряжено), т. е. не вызывать вокруг себя электрического поля; гравитационно нейтральных тел не существует, всякое материальное тело вызывает вокруг себя поле тяжести, т. е. действует на окружающие тела.

23.1. Около 100 Г. 23.2. Сила равна $2,08 \cdot 10^{-12}$ *дин* и направлена к Земле. Она в $1,3 \cdot 10^5$ раз больше веса иона.

24.1. Они показаны на рис. 381. В нем существенно, что поверхность шарика и поверхность Земли являются эквипотенциальными поверхностями и поэтому силовые линии перпендикулярны и к поверхности Земли и к поверхности шарика. 24.2. См. рис. 382. 24.3. Не изменится.

26.1. Стекло в электрическом поле заряженного электроскопа поляризуется: на ближайшем к электроскопу конце появляется разноименный заряд, на удаленном — одноименный. Близко расположенный к электроскопу разноименный заряд действует на электроскоп сильнее и вызывает расхождение его листочков.

27.1. Нет. 27.2. Нет, так как на электроскопе останется теперь индуцированный телом заряд противоположного знака. 27.3. Не изменится.

28.1. Разность потенциалов тех точек, в которых помещены свечи.

29.1. Тело человека — проводник, и поэтому поверхность его в поле при равновесии зарядов должна быть эквипотенциальной поверхностью. Между отдельными точками ее (головой и ногами) не может быть

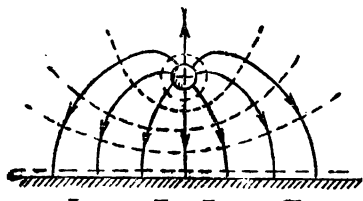


Рис. 381. К упражнению 24.1.

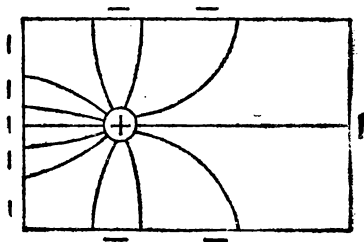


Рис. 382. К упражнению 24.2.

разности потенциалов. Пока человека в данном месте не было, поле имело вид, показанный на рис. 383, а: силовые линии его направлены вертикально вниз, а эквипотенциальные поверхности представляют собой горизонтальные плоскости. Между точками А и В, действительно, существует напряжение в 200 в. Появление в этом пространстве человека искажает поле, и оно принимает примерно такой вид, как на рис. 383, б:

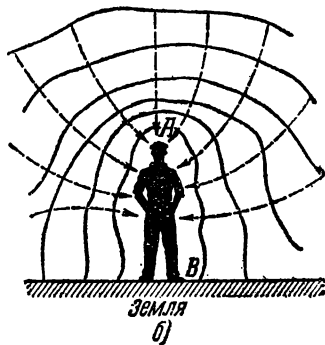
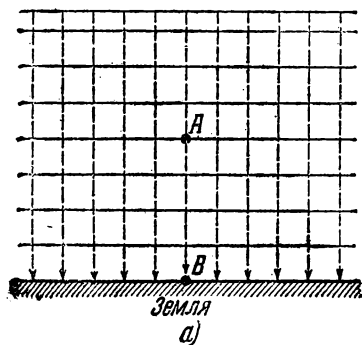


Рис. 383. К упражнению 29.1.

вблизи тела человека ход силовых линий и эквипотенциальных поверхностей изменяется, и одна из этих поверхностей совпадает с поверхностью тела человека, так что напряжение между точками А и В становится равным нулю. Это происходит вследствие перераспределения зарядов в теле человека, но это перемещение зарядов (электрический ток) чрезвычайно кратковременно и слабо, так что мы не ощущаем его. Когда же мы прикасаемся к полюсам батарей или сети, то равновесия зарядов

нет и через наше тело длительно идет ток, достаточно сильный, чтобы вызвать известные всем неприятные ощущения. 29.2. Около $4,5 \cdot 10^5$ к.

30.1. $9,6 \cdot 10^{-6}$ абс. эл.-ст. единицы.

31.1. Подвешенный грузик отклонится. На поверхности шара возникнут индуцированные заряды равной величины, на внутренней поверхности противоположного знака, на внешней — того же знака, что и заряд в центре. Вне шара совокупное действие заряда в центре и заряда внутренней поверхности равно нулю, но останется действие заряда внешней поверхности; этот заряд будет действовать так, как если бы он был сосредоточен в центре, и поэтому наличие полого шара никак не скажется. Если же шар заземлен, то зарядов на внешней поверхности не будет, не будет и поля вне шара и грузик не отклонится. 31.2. Внутри металлической сетки (замкнутая полость) электрическое поле равно нулю и поэтому нигде не может возникнуть электрическая искра. Если, однако, внутри полости имеется не соединенная с нею труба, выходящая за пределы полости, то между трубой и сеткой может возникнуть разность потенциалов (например, во время грозы) и проскочит электрическая искра. 31.3. Нет, не мог бы. В первом случае заряды, снимаемые с ленты кисточкой 2, не переходили бы на внешнюю поверхность шара, а оставались на месте и длительный перенос заряда с ленты на шар был бы невозможен. Во втором случае кисточка 1, лента и поверхность шара представляли бы собой одну эквипотенциальную поверхность и был бы невозможен длительный переход заряда с кисточки 1 на ленту.

33.1. 10^{-6} к. 33.2. Например, при помощи электрометра. Для этого можно, изолировав корпус электрометра, соединить стержень с одним из шаров, а корпус с другим. 33.3. Разность потенциалов между отдельными частями тела птицы (ее лапками) будет мала. Птица вся окажется под высоким напряжением.

34.1. Можно, и притом одинаково. Если после этого, держа заряженную банку за стержень, поставить ее на стол, то банка разрядится через стол и наше тело и мы почувствуем сотрясение. 34.2. Заряд на лейденской банке в этом случае будет очень мал. На изолированной обкладке возникнут вследствие индукции заряды обоих знаков, однако ни один из этих зарядов не сможет уйти с обкладки, она будет поэтому в целом не заряжена и лейденская банка не будет конденсатором. 34.3. Когда мы касаемся внутренней обкладки банки, стоя на изолирующей скамейке, банка не может разрядиться, так как на пути тока имеется изолятор (скамейка) и через наше тело ток не проходит.

35.1. В первом в 16 раз. 35.2. $U_1 = 40$ в; $U_2 = 80$ в. 35.3. $1,5 \cdot 10^{-6}$ к. 35.4. 150 в. 35.5. Поровну.

42.1. $6,2 \cdot 10^{18}$ электронов в секунду. 42.2. 1 ампер-час = 3600 к.

46.1. 3,3 ма.

47.1. 0,02 ом. 47.2. 492 м.

48.1. У лампочки с металлической нитью ток уменьшается по мере раскаливания нити, так как сопротивление металлов увеличивается с увеличением температуры. У угольной лампочки происходит обратное.

48.2. 2000° С. 48.3. 12,1 ом.

50.1. Треугольники acb и feb подобны, и поэтому $\frac{R}{R_1} = \frac{fb}{ab}$; точно так

же из подобия треугольников abd и afe имеем $\frac{R}{R_2} = \frac{af}{ab} = \frac{ab - fb}{ab} = 1 - \frac{fb}{ab}$.

Исключая из обоих уравнений $\frac{fb}{ab}$, находим $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$, что и требовалось доказать.

50.2. Сопротивление сети 20 ом; ток равен 6 а. **52.1.** Следует соединить последовательно 10 лампочек. **52.2.** 117,1 в. **52.3.** Напряжение на печке 9,3 в; на лампочке 110,7 в. Печка работать не будет, лампочка же будет накаливаться почти нормально. **52.4.** а) Нужно взять 21 шестивольтовую лампу или 16 восьмивольтовых; б) нет, не будут; чтобы исправить гирлянду, нужно вырезать перегоревшую лампочку и соединить друг с другом оставшиеся свободными концы проводов. **П р и м е ч а н и е.** Обнаженные места провода обязательно замотать изоляционной лентой или надеть на это место трубочку из изолирующего материала; в) когда из гирлянды вырезано несколько ламп, то сопротивление оставшихся становится настолько малым, а ток через них настолько большим, что оставшиеся лампочки очень быстро перегорят. **52.5.** а) 60 в; б) 12 в; в) 96 в. **52.6.** 103,2 в. **52.7.** 8,5 в. **52.8.** Включая приборы, потребляющие большой ток, мы увеличиваем ток в линии и подводящих проводах, а следовательно, и увеличиваем падение напряжения в них $U = I \cdot r$, приходящееся на провода, отчего напряжение на лампочках соответственно уменьшается. Яркость лампочек постепенно увеличивается, потому что по мере разогревания утюга его сопротивление увеличивается и падение напряжения, вызванное его включением, уменьшается. **52.9.** Сопротивление металлической нити возрастает с увеличением температуры, сопротивление угольной — падает. Поэтому две лампочки, металлическая и угольная, которые имеют одинаковое сопротивление в горячем состоянии, обладают различным сопротивлением в холодном: у металлической оно малое, у угольной большое. Этим и объясняется указанное различие.

53.1. Можно. Провода, между которыми измеряют напряжение, следует присоединить к зажимам электрометра, соединенным с его корпусом и с листочками. Градуировать нужно по нескольким заранее известным напряжениям.

54.1. 1 в. **54.2.** 10 ма. **54.3.** а) 12 000 ом; сопротивление нужно соединить последовательно с вольтметром; б) не изменится. **54.4.** 240 ом.

55.1. 1/90 ом.

58.1. 6 кал. **58.2.** 0,096 коп. **58.3.** 625 ом. **58.4.** Большой ток проходит через лампочку в 100 вт; большее сопротивление у лампочки в 15 вт. **58.5.** 0,635 квт. **58.6.** При последовательном соединении проводников количество тепла, выделяющегося в каждом из них, пропорционально сопротивлению проводника. Сопротивление же проводки в сотни раз меньше сопротивления лампочки. **58.7.** а) Сильнее будут разогреваться никелиновые проволоки, так как их сопротивление больше, чем у медных проволок; б) сильнее всего будет нагреваться медная проволока, так как через нее будет идти наиболее сильный ток. **58.8.** Лампы одинаковой мощности, рассчитанные на одно и то же напряжение (110 в), имеют одинаковое сопротивление. Поэтому при последовательном их включении в сеть с напряжением в 220 в напряжение распределится между ними поровну, на каждой лампе будет напряжение в 110 в, и она будет гореть нормально. Если мощность ламп различна, то более мощная имеет меньшее сопротивление. При последовательном их включении, когда ток через обе лампы один и тот же, напряжение на более мощной лампе ($V = I \cdot R$) будет меньше, чем на другой. Эта лампа будет гореть с недокалом, а менее мощная — с перекалом. В нашем примере напряжение на лампе в 25 вт будет в 4 раза больше, чем напряжение на

лампе в 100 *вт*, и составит 176 *в*. Эта лампа ярко вспыхнет и очень быстро перегорит, а лампа в 100 *вт*, на которой напряжение будет равно 44 *в*, едва раскалится. 58.9. а) Можно; б) нельзя, гирлянда 8-вольтовых ламп имеет меньшее количество ламп и потому при одинаковой мощности к а ж д о й лампы имеет меньшую мощность, чем гирлянда 6-вольтовых ламп. При последовательном включении она будет гореть с перекалом и быстро выйдет из строя (см. упражнение 58.8); в) можно. 58.10. а) 222 р. 20 к.; б) $\sim 1,7 \cdot 10^{12}$ *квт-ч*. 58.11. В 6,6 раза.

59.1. Нельзя.

60.1. 13 *мин*. 60.2. 1,44 коп. 60.3. 86,4 *кал*. 60.4. а) 200 *вт*; б) да, будет; в) 900 *вт*.

61.1. 5,2 *м*.

64.2. См. рис. 384. 64.3. См. рис. 385.

66.1. Если между проводами есть напряжение, в воде начнется электролиз и на проводах будут выделяться пузырьки газов (кислорода и

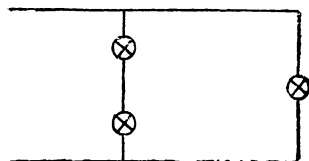


Рис. 384. К упражнению 64.2.

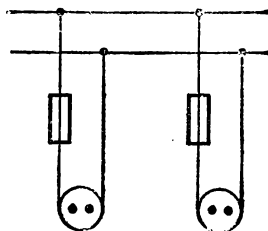


Рис. 385. К упражнению 64.3.

водорода). 66.2. Так как при электролизе воды количество выделившегося водорода по объему в два раза больше количества кислорода, то отрицательным полюсом будет тот, у которого выделяется больше газа. 66.3. Электрохимический эквивалент свинца равен 1,074 *мг/к*, натрия 0,0238 *мг/к*, а алюминия 0,0933 *мг/к*. Выделится свинца 193,3 г, натрия 42,8 г, алюминия 16,8 г. 66.4. Электрохимический эквивалент хлора равен $0,0104 \cdot 35,4 / 1,008 = 0,367$ *мг/к*.

67.1. Между двумя последовательными соударениями ионы двигаются ускоренно и приобретают кинетическую энергию. При соударениях же эта кинетическая энергия упорядоченного движения переходит в энергию беспорядочного движения, т. е. в тепло. 67.2. Потому что влага на проводах всегда содержит растворенные электролиты и является проводником. 67.3. Влага на руках всегда содержит раствор NaCl и является электролитом. Поэтому она создает гораздо лучший контакт между проводами и кожей, чем обычно бывает при сухой коже.

68.1. На отрицательном полюсе.

71.1. Потому что в каждом объеме электролита находится столько же положительных зарядов, сколько и отрицательных, так что в среднем электролит не заряжен. 71.2. Тепловое движение ионов и молекул.

73.1. 3,0 *квт*; 1500 *дм³*. 73.2. Около 4 *час*. 73.3. 2,08 г; $\sim 2,7$ часа.

76.1. 0,051 г.

77.1. Улучшится, его поляризация уменьшится.

79.1. 80 *час*.

81.1. 2,2 а. **81.2.** 0,8 в. **81.3.** 12 000 а. **81.4.** Измеряемое вольтметром напряжение на 0,01 в меньше э. д. с. **81.5.** Так как электрометр не берет на себя ток, то им можно точно измерить э. д. с. источника. Для этого его корпус следует присоединить к одному из полюсов источника, а стрелку (листочек) — к другому. **81.6.** Изменяется. Чем больше емкость конденсатора, тем меньше показания электрометра. **81.7.** 2 в.

82.1. 18 в. **82.2.** 55 в. **82.3.** 0,7 в. **82.4.** Ток в цепи есть. Напряжение на зажимах равно нулю. При различных внутренних сопротивлениях напряжение не будет равно нулю. **82.5.** Тока в цепи нет. Напряжение на зажимах каждого элемента равно его э. д. с. **82.6.** 2,0 а. **82.7.** 160 а. **82.8.** 0,8 ом. **82.9.** 1,1 в; 1 ом. **82.10.** 10^8 ом. **82.11.** 1,1 в. **82.12.** 5 ом. **82.13.** 0,5 ом. **82.14.** 0,5 а. **82.15.** 1,4 а. **82.16.** 1,07 ом. **82.17.** Э. д. с. останется такой же, как и у одного аккумулятора. Внутреннее сопротивление уменьшится в два раза. Емкость батареи будет в два раза больше, чем у одного аккумулятора. **82.18.** Э. д. с. увеличится в два раза. Внутреннее сопротивление также возрастет в два раза. Емкость батареи будет такая же, как у одного аккумулятора. **82.19.** Э. д. с. батареи равна 2,2 в, а ее сопротивление равно 1 ом.

85.1. 1200°C . **85.2.** $0,0021^{\circ}\text{C}$. **85.3.** Термопара медь — константан обладает большей термо-э. д. с., но разрушается при высоких температурах.

86.1. Под действием центробежной силы концентрация электронов на периферии делается больше нормальной; поэтому края диска заряжаются отрицательно, а центр — положительно. Отметим, что эти заряды ничтожно малы и практической роли играть не могут. **86.2.** Около 0,01 см/сек. **86.3.** $1,25 \cdot 10^{19}$ электронов.

89.1. $1,26 \cdot 10^8$ см/сек.

90.1. Электроны, двигаясь ускоренно между катодом и анодом, приобретают кинетическую энергию, которая передается аноду и переходит в тепло при соударении электронов с анодом. **90.2.** Не будет, так как для наличия тока нужно было бы, чтобы в одной из ламп электроны выходили из холодного электрода (анода), что невозможно. **90.3.** $8,4 \times 10^8$ см/сек. **90.4.** При положительном заряде оловянной бумаги термоэлектроны движутся к стеклянной колбе и заряжают ее внутреннюю поверхность отрицательно, т. е. зарядом противоположного знака, отчего отклонение листочка электроскопа уменьшается. При отрицательном заряде оловянной бумаги электроны не попадают на стенки колбы.

93.1. При уменьшении давления газа напряжение пробоя уменьшается. Это происходит потому, что при большем свободном пробеге ионы могут приобрести необходимую для ионизации кинетическую энергию при меньшей напряженности электрического поля.

95.1. При достаточно большой напряженности электрического поля вокруг тела в окружающем диэлектрике (воздухе) возникает разряд (корона или искра) и воздух теряет свои изолирующие свойства. **95.2.** Потому что у острий напряженность поля велика и поэтому облегчается зажигание коронного разряда. **95.3.** Возле острий зажигается корона и в воздухе появляются ионы. Разноименные с зарядами диска ионы движутся к диску и уничтожают его заряд, одноименные движутся к острию и заряжают его.

97.1. Антенна является грозоотводом, который во время грозы должен быть хорошо заземлен.

98.1. Потому что температура у положительного угля (кратера) выше, чем у отрицательного, и поэтому он сгорает быстрее. **98.2.** 260 ккал; 0,2 ом.

103.1. Они двигались бы по силовым линиям электрического поля.

103.2. $1,0 \times 10^{10}$ см/сек. 103.3. 120 кал.

104.1. Каналовые лучи и катодные лучи будут отклоняться в противоположные стороны. Если время пребывания между обкладками конденсатора у обоих лучей одинаково, то катодные лучи отклонятся сильнее.

106.1. Тяжелые газовые ионы, под влиянием электрического поля попадая на катод, разрушают его.

107.1. $1,6 \cdot 10^9$ см/сек и $1,9 \cdot 10^9$ см/сек. 107.2. На 0,5 см; отрицательный ион и электрон отклонятся одинаково.

112.1. Равновесие будет неустойчивым, потому что при малейшем отклонении от этого положения возникнут силы, стремящиеся это отклонение увеличивать. Например, если мы отодвинем чуть-чуть шарик книзу, то сила тяжести останется прежней, а сила магнитного притяжения уменьшится. Возникнет равнодействующая, направленная книзу и заставляющая шарик падать. Точно так же достаточно чуть-чуть отодвинуть магнит вверх, чтобы возникла равнодействующая силы тяжести и силы магнитного притяжения, направленная вверх и заставляющая шарик притягиваться к магниту. 112.2. Движение будет происходить со все возрастающим ускорением, потому что сила, действующая на кубик, возрастает по мере его приближения к магниту.

113.1. Разломать ее на две части и посмотреть, будут ли притягиваться друг к другу концы спицы. 113.2. Сложить эти бруски в виде буквы Т. Если магнитом является брусок, обращенный к другому своим концом, то притяжение будет заметно; если же намагничен другой брусок, то притяжения не будет, потому что второй брусок находится у его нейтральной области.

115.1. В первом случае расположение полюсов будет такое, как показано на рис. 386, а, во втором, как на рис. 386, б. На спице всегда будут четыре полюса, разделенных тремя нейтральными областями.

120.1. $P = 1000 \cdot \sin 30^\circ = 500$ дин·см.

121.1. 40 дин.

122.1. Напряженность результирующего поля будет лежать в вертикальной плоскости, перпендикулярной к меридиану. Она будет составлять с вертикалью угол α , который можно определить из соотношения $\operatorname{tg} \alpha = \frac{4}{3}$ ($\alpha = 53^\circ 4'$). Величина результирующей напряженности

равна 50 единицам. 122.2. $H = 114$. 122.3. $H = 82$. 122.4. $H_{\text{верт}} = 100 \cos 30^\circ = 85$; $H_{\text{гориз}} = 100 \sin 30^\circ = 50$.

124.1. $H \approx 8000$ э.

125.1. Конец, обращенный внутрь контура — северный (во всех трех случаях). 125.2. Если все стороны параллелограмма одинаковы, то напряженность поля в точке O равна нулю. Во втором случае напряженность поля в точке O перпендикулярна к плоскости параллелограмма и направлена вверх (к наблюдателю). 125.3. Результирующая напряженность в точке O лежит в плоскости, параллельной обеим прямым AB и CD , и образует углы в 45° с плоскостями, проходящими через PQ и каждую из прямых AB и CD . 125.5. Напряженность поля в центре

шара лежит в плоскости, перпендикулярной к плоскостям обоих витков, и образует с этими плоскостями углы в 45° .

126.2. Получаются две обмотки, расположенные рядом, токи в которых направлены противоположно. Магнитные поля этих токов взаимно уничтожаются. **126.3.** Южным. **126.4.** Конец B будет направлен к северу.

127.1. 60 а. **127.2.** Напряженность станет равной: а) 225 э; б) 900 э; в) магнитное поле соленоида уничтожится. **127.3.** а) Магнитное поле увеличится втрое; б) ослабить ток в соленоиде. **127.4.** а) 37,7 э; б) 12,6 э. **127.5.** $I_2 = 0,25$ а; $I_3 = 2$ а. **127.6.** $H = 50$ ампервитков/см = 62,8 э. **127.7.** $n = 1000$ витков. **127.8.** а) 3,14 э; б) уменьшится в 25 раз.

129.1. Намагничивание вертикальных предметов в магнитном поле Земли доказывает, что напряженность этого поля имеет вертикальную составляющую, т. е. не лежит в горизонтальной плоскости. Внизу будет находиться северный полюс, наверху — южный (в северном полушарии). **129.2.** На конце полосы, обращенном к северу, возникнет северный полюс, на другом конце — южный. **129.3.** а) Корабль намагничивается так, что внизу будет северный полюс, а наверху — южный. Так как поле тока должно компенсировать магнитное поле корабля, то оно должно иметь противоположное направление, т. е. наверху должен находиться северный полюс. Отсюда заключаем, что ток в петле должен иметь направление, противоположное направлению движения часовой стрелки (если смотреть сверху); б) не имеет значения. **129.4.** Чашка со стержнем отклоняется книзу. **129.5.** Вблизи полюса мала горизонтальная составляющая земного магнитного поля и потому мал вращающий момент, действующий на компасную стрелку.

130.1. 0,15 Г. Указание. Для стрелки, наклоненной под углом в 30° к горизонту, перпендикулярная к направлению стрелки составляющая веса стрелки g должна по условию уравниваться перпендикулярной к стрелке составляющей силы f , с которой магнитное поле действует на каждый полюс стрелки. Отсюда найдется соотношение между силами g и f . Такое же рассуждение для горизонтальной стрелки дает соотношение между f и искомым весом груза x . Исключая из этих соотношений f , можно убедиться в том, что $x = \frac{3}{2} g$.

130.2. Так как стрелка инклинометра может вращаться только в плоскости его круга, а магнитные силы лежат в плоскости магнитного меридиана, то стрелка всегда будет устанавливаться по направлению проекции этих сил на плоскость круга инклинометра. Угол α , который она образует с горизонтальной плоскостью, определяется соотношением $\operatorname{tg} \alpha = H_{\text{верт}} / H_{\text{гор}} \cos \beta$, где β — угол поворота плоскости инклинометра относительно плоскости магнитного меридиана. Отсюда видно, что при $\beta = 0$ угол $\alpha = i$, а по мере увеличения угла β угол α уменьшается. При $\beta = 90^\circ$ угол $\alpha = 0$, т. е. стрелка устанавливается вертикально. **130.3.** Компасная стрелка на горизонтальной оси будет находиться в положении безразличного равновесия; стрелка наклонения установится вертикально. **134.1.** Проводник MN установится так, чтобы он был параллелен CD и ток в нем был направлен в противоположную сторону; положение, при котором проводник MN параллелен CD , но токи в них направлены одинаково, также является положением равновесия проводника MN , но равновесия неустойчивого. **134.2.** а) Сила направлена горизонтально с запада на восток; б) сила наклонена к горизонту под углом $(90^\circ - i)$ (перпендикулярна к направлению земного поля) и направлена вверх.

135.1. а) Виток примет форму окружности; б) виток сожмется и примет вид двух параллельных соприкасающихся прямых. В первом случае площадь его при данном периметре максимальная, во втором — минимальная. **135.2.** Каждый виток спирали аналогичен намагниченному листку; все эти листки обращены одноименными полюсами в одну сторону и потому взаимно притягиваются. **135.3.** При включении тока спираль сжимается, конец ее выходит из чашечки с ртутью и цепь замыкается. Вслед за этим под действием сил упругости спираль снова распрямляется и конец ее, входя в чашечку с ртутью, опять замыкает цепь и т. д. Устройство сходно с молоточковым прерывателем и могло бы применяться для тех же целей. **135.4.** Железо втягивается внутрь катушки, потому что оно намагничивается ее полем. В однородном поле на магнит действует только вращающий момент; силы, вызывающие поступательное движение, возникают только в неоднородном поле (§ 135). Поэтому, если бы мы поместили железо внутри катушки, где поле однородно, то оно не пришло бы в движение. **135.5.** Ток нужно выключить в момент, когда снаряд приобрел максимальную скорость, т. е. тогда, когда он находится в области однородного поля, где сила, действующая на него, равна нулю. Если ток останется включенным все время, то у второго конца катушки снаряд попадет в область, где поле слабеет; так как действующие на него силы всегда стремятся втягивать его в область наибольшей напряженности поля, то здесь снаряд будет тормозиться, скорость его обратится в некоторой точке в нуль и затем он начнет двигаться в обратную сторону.

137.1. Более быстрые электроны отклоняются сильнее. **137.2.** а) Ионы положительные и отрицательные отклоняются в противоположные стороны; б) ионы с большим зарядом отклоняются сильнее; в) ионы с большим молекулярным весом отклоняются меньше (т. I, «Механика»). **137.3.** Электроны будут двигаться по окружности, потому что действующая на них сила, а значит, и их ускорение в каждый момент движения перпендикулярны к скорости. Численная величина скорости при этом остается постоянной (т. I, «Механика»). **137.4.** Если смотреть навстречу потоку электронов, то электроны и отрицательные ионы отклоняются налево от наблюдателя, а положительные ионы — направо. **137.6.** Против часовой стрелки, если смотреть со стороны батареи.

139.1. Опыт объясняется тем, что магнитный поток сквозь витки катушки J возрастает при вдвигании железа в катушку P вследствие намагничивания железа полем этой катушки. **139.2.** Нет, не будет, потому что при любом положении рамки линии магнитного поля параллельны ее плоскости и магнитный поток сквозь рамку равен нулю. **139.3.** Возникает больше всего при движении с запада на восток и тем сильнее, чем быстрее движется автомобиль. **139.4.** Ток не возникает, потому что на обеих осях возникают э.д.с., равные и противоположно направленные. **139.5.** Магнитное поле, сопровождающее ток молнии, индуцирует в проводниках сильные направленные токи.

140.1. Кольцевые линии магнитного поля тока в проводнике 1 пронизывают индукционный контур, состоящий из проводника 2 и проводов, соединяющих его гальванометром. При увеличении тока в 1 ток, индуцируемый в 2 , направлен противоположно току 1 (первичному току), а при уменьшении первичного тока индуцированный ток в 2 имеет то же направление, что и первичный. **140.2.** Ток будет направлен из-за плоскости чертежа к наблюдателю. При перемене направления поля или направления движения проводника направление тока изменится на обратное. «Правило правой руки» можно сформулировать так: «Если

положить правую руку на проводник так, чтобы линии поля входили в ладонь, а отставленный большой палец указывал направление движения проводника, то четыре вытянутых пальца укажут направление индуцированного тока». 140.3. При вдвигании сердечника ток в катушке I будет иметь направление, противоположное направлению тока в катушке P . При удалении сердечника оба тока будут направлены одинаково.

142.1. В случае а) индукция обусловлена только горизонтальной составляющей земного поля; в случае б) только вертикальной составляющей; в случае в) всей напряженностью поля. Наиболее силен будет индуцированный ток в случае в). При наклонении, большем 45° , вертикальная составляющая поля больше горизонтальной, и ток в случае б) будет сильнее, чем в случае а). 142.2. В случае а) $M=600 \text{ э.см}^2$, $E=0,24 \text{ в.}$ В случае б) $M=1038 \text{ э.см}^2$, $E=0,41 \text{ в.}$ В случае в) $M=600 \text{ э.см}^2$; $E=0,28 \text{ в.}$ 142.3. $E=0,004 \text{ в.}$ 142.4. $H=3200 \text{ э.}$ 142.5. $H=800 \text{ э.}$ 142.6. $Q=2 \cdot 10^{-6} \text{ к.}$

144.1. Нагревание воды вызвано токами Фуко, возникающими в стенках цилиндра при его вращении в магнитном поле. Действие поля на эти токи стремится тормозить вращение. При наличии поля мы должны поэтому приложить к цилиндру больший вращающий момент, т.е. затратить большую энергию, чем в его отсутствие. Эта дополнительная энергия и расходуется на нагревание цилиндра и воды. 144.2. Маятник тормозится силами, которые действуют со стороны магнитного поля на токи Фуко, индуцирующиеся в маятнике при его прохождении через неоднородную область поля. 144.3. Монета тормозится теми же силами, что и маятник в упражнении 144.2. 144.4. Когда кубик подвешен за ушко А, прослойки изоляции между медными листками препятствуют возникновению токов Фуко, тормозящих вращение. Когда кубик подвешен за ушко В, токи Фуко, направленные в вертикальной плоскости, могут течь беспрепятственно.

147.1. Железо и другие ферромагнитные материалы всегда втягиваются в ту область поля, где оно наиболее сильно (§ 143). Так же ведут себя, очевидно, парамагнитные материалы. Напротив, диамагнитные тела выталкиваются в область наиболее слабого поля. В нашем случае поле сильнее внизу, где полюсы электромагнита сближены, а слабее сверху. Этим и объясняются описанные явления. 147.2. Парамагнитная жидкость втягивается в область наибольшей напряженности поля, а диамагнитная — выталкивается из нее.

149.1. Стальные предметы на судне искажают магнитное поле Земли. Поправки зависят от магнитных свойств стали. 149.2. Очень точным измерениям магнитного поля Земли мешали бы искажающие влияния стальных и железных предметов на судне, несмотря на вводимые поправки.

150.1. Для постоянных магнитов наиболее пригодна закаленная сталь, для электромагнитов с быстрой регулировкой — мягкое железо. 150.2. Нельзя, потому что по мере нагревания железа (приближения к точке Кюри) его магнитная проницаемость уменьшается. Раскаленная болванка очень слабо намагничивается и потому очень слабо притягивается электромагнитом.

155.1. $\sim 0,06 \text{ а; } \sim 0,085 \text{ а.}$ 155.2. $I_{\text{эфф}} = 10 \text{ а.}$ 155.3. $I_{\text{эфф}} = 3,55 \text{ а.}$ 155.4. $I_m = 20 \text{ а.}$

157.1. Вследствие его большой индуктивности. 157.2. То же. 157.3. При включении тока э. д. с. самоиндукции направлена против э. д. с. цепи, а при выключении — в одинаковую сторону с ней. Искра

увеличивается при размыкании более сильного тока и при наличии большой индуктивности в цепи. **157.4.** Более сильная искра получается при размыкании электромагнита, у которого индуктивность больше.

158.1. 25 гн. **158.2.** 1) Уменьшить число витков; 2) вынуть железный сердечник. **158.3.** Зависит.

160.1. $I = 0,75 \text{ а}$. **160.2.** 0,176 а.

164.1. Способ с сердечником выгоднее, так как увеличивается безваттное сопротивление.

165.1. 30 в; 60 в; 180 в. **165.2.** $U_{ab} = 40 \text{ в}$; $U_{ad} = 240 \text{ в}$; $U_{ae} = 400 \text{ в}$; $U_{be} = 80 \text{ в}$; $U_{bd} = 200 \text{ в}$; $U_{be} = 360 \text{ в}$; $U_{cd} = 120 \text{ в}$; $U_{ec} = 280 \text{ в}$; $U_{ed} = 160 \text{ в}$. **165.3.** 4,4 а.

166.1. В первом случае сечение проводов должно равняться 85 мм^2 , во втором $21,25 \text{ мм}^2$. Расход меди в первом случае $36,78 \text{ кг}$, во втором $9,52 \text{ кг}$.

168.1. Под частотой тока n разумеется обычно число периодов в секунду. Поэтому в данном случае $n = \frac{12 \cdot 1500}{60} = 300$. Ток меняет направ-

ление дважды за каждый период; число перемен направления в данном случае равно $2 \cdot 300 = 600$. **168.2.** Когда зубцы ротора стоят против зубцов статора, магнитный поток, создаваемый катушками возбуждения P и пронизывающий индукционные катушки J , больше, чем тогда, когда зубцы ротора отходят от зубцов статора. Таким образом, поток сквозь катушки J при вращении ротора непрерывно изменяется, и это является причиной возникновения индукционного тока.

169.1. Потому что в статоре генератора переменного тока находится якорь, в котором индуцируется переменный ток, а в статоре генератора постоянного тока находится индуктор, по обмоткам которого проходит постоянный ток.

170.1. В серийной машине через обмотки возбуждения проходит весь очень большой ток, генерируемый машиной. Поэтому они должны быть сделаны из толстой проволоки. Вместе с тем достаточная напряженность поля и магнитный поток получаются при большом токе уже при наличии незначительного числа витков. В шунтовой динамомашине в обмотку возбуждения ответвляется лишь небольшая доля тока. Для получения достаточного числа ампервитков нужно при малом токе взять много витков, но обмотка может быть выполнена из тонкой проволоки. **170.2.** Серийный генератор нельзя запустить без нагрузки, так как при этом цепь обмоток возбуждения разомкнута, через них не будет проходить ток и, следовательно, не будет происходить нарастание магнитного потока в машине. Шунтовую машину можно включать без нагрузки, потому что цепь якоря всегда замкнута на обмотки возбуждения. **170.3.** Если пустить машину в обратную сторону, то индуцируемый ток будет создавать магнитное поле, противоположное остаточному намагничиванию индуктора. Индуктор при этом размагнитится, и машина не будет работать. **170.4.** Нужно на короткое время пропустить через обмотки возбуждения ток от постороннего источника (батарей аккумуляторов), позаботившись о том, чтобы ток этот намагничивал индуктор в том направлении, которое соответствует указанному направлению вращения машины.

174.1. При пуске мотора в ход ручка реостата находится в крайнем правом положении. При этом отрезок реостата $R_{\text{пуск}}$ введен в цепь якоря и является пусковым сопротивлением; цепь же катушки возбуждения замкнута накоротко через металлическую полосу M . Поэтому,

пока ручка реостата находится на этой полоске, мотор вращается с наименьшим числом оборотов. Переводя ручку реостата налево, мы сначала выводим сопротивление $R_{\text{пуск}}$ из цепи якоря, а затем начинаем вводить все большую и большую долю сопротивления $R_{\text{рег}}$ в цепь возбуждения. Магнитный поток при этом уменьшается, а число оборотов мотора возрастает.

174.2. Так как через обмотку возбуждения проходит только небольшая доля тока, поступающего в машину, а главная часть его идет через якорь, то в качестве пускового нужно взять реостат из толстой проволоки с малым сопротивлением, а в качестве регулировочного — реостат из тонкой проволоки с большим сопротивлением.

174.3. При пуске мотора вхолостую или с малой нагрузкой ток в якоре очень мал и индуцированная в якоре электродвижущая сила почти равна напряжению сети. В серийном моторе через обмотки возбуждения проходит ток якоря; для того чтобы при таком малом токе в якоре могла индуцироваться большая электродвижущая сила, мотор должен вращаться с очень большим числом оборотов, т. е. он идет «вразнос». В шунтовом моторе этого не может случиться, потому что здесь ток в обмотках возбуждения и магнитный поток в машине мало зависят от тока в якоре и необходимая электродвижущая сила индуцируется всегда при умеренном числе оборотов мотора.

178.1. а) Включить реостат последовательно с электромагнитом; б) сделать выдвижной сердечник. **178.3.** Сделать большое число витков из тонкой проволоки. **178.4.** Электромагнит с плоскими полюсными башмаками.

179.1. Может.

Элементарный учебник физики
под редакцией Г. С. Ландсберга

Том II

Электричество и магнетизм

М., 1972 г., 528 стр. с илл.

Редактор *Н. А. Райская*

Техн. редактор *К. Ф. Брудно*

Корректор *З. В. Автонева*

Печать с матриц.
Подписано к печати 4/VII 1972 г.
Бумага 84X108/32, тип. № 2.
Физ. печ. л. 16,5.
Условн. печ. л. 27,72.
Уч.-изд. л. 29,92.
Тираж 300 000, 1-ый завод 150 000 экз.
Цена книги 94 коп.
Заказ № 3079.

Издательство «Наука»
Главная редакция
физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский
проспект, 15

Ордена Трудового Красного Знамени
Первая Образцовая типография
имени А. А. Жданова
Главполиграфпрома Комитета по печати
при Совете Министров СССР
Москва, М-54, Валуевая, 28

Цена 94 коп.