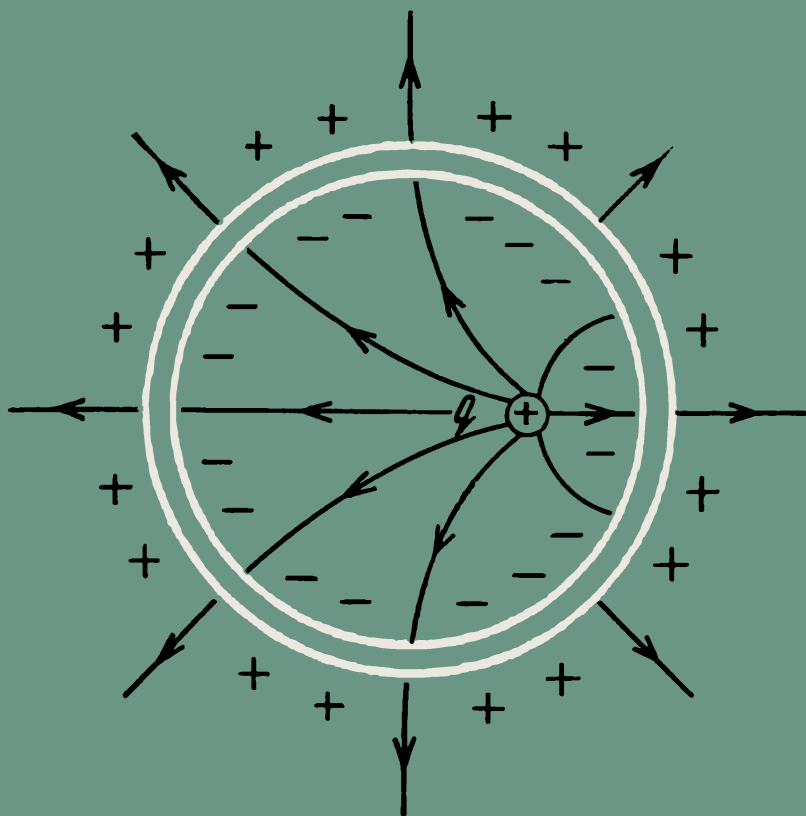


Б.Ю.КОГАН

СТО ЗАДАЧ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ



Б. Ю. КОГАН

СТО ЗАДАЧ по ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ



Издательство «Наука»
Главная редакция
физико-математической литературы
Москва 1976

537
К 57
УДК 537

Физика

*Библиотечка
физико-математической школы*

Редактор серии
Я. А. Смородинский

К $\frac{20407-111}{053(02)-76}$ 104-76

© Главная редакция
физико-математической литературы
издательство «Наука», 1967

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

1. Каков заряд всех электронов в куске меди массой 1 кг? За какое время проходит такой заряд через лампочку карманного фонаря? Заряд электрона равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, ток, потребляемый лампочкой карманного фонаря, равен 0,28 А.

2. Вообразим, что два заряда, каждый из которых состоит из 1 г электронов, находятся на расстоянии 100 млн. км друг от друга. С какой силой они взаимодействуют? Заряд электрона $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса $9,11 \cdot 10^{-31}$ кг.

3. Если наэлектризовать эбонитовую или стеклянную палочку, то она будет притягивать маленькие кусочки бумаги. Однако, если кусочки бумаги поместить вблизи клемм аккумулятора или батарейки для карманного фонаря, то мы не заметим никакого притяжения. Почему?

4. В электростатическое поле поместили незаряженный шарик. Будет ли поле действовать на него с какой-либо силой?

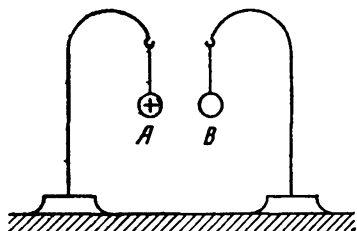


Рис. 1.

5. В некоторой области пространства электрическое

поле отсутствовало, но когда туда поместили заряженный шарик, возникло электрическое поле, действующее на этот шарик с какой-то силой. Почему оно появилось?

6. Положительно заряженный шар А поместили вблизи металлического шара В (рис. 1). Измерения

показали, что сила электрического взаимодействия шаров равна нулю. Заряжен ли шар B ?

7. Доказать, что если заряд шара B из предыдущей задачи будет положительным и очень небольшим, то шары A и B будут не отталкиваться, а притягиваться.

8. Заряженный шарик A находится на расстоянии r от незаряженного шарика B и притягивает его с силой F . Диаметры шариков малы по сравнению с r . Каков характер зависимости F от r ? Изменяется ли F обратно пропорционально r^2 ?

9. Если зарядить проводник A , то на проводнике B возникают индуцированные заряды, а если зарядить проводник B , то на проводнике A индуцированные заряды не возникают. В каком случае это наблюдается?

10. Две одинаковые металлические пластинки параллельны и им сообщены какие-то отрицательные заряды произвольной величины. Так как эти заряды будут отталкиваться друг от друга, то можно предположить, что они соберутся на внешних поверхностях пластинок. Верно ли это? Расстояние между пластинками мало по сравнению с линейными размерами каждой пластинки.

11. Бесконечная плоскость с отверстием AB диаметром d равномерно заряжена положительным электричеством (рис. 2). Плоскость действует на положительный точечный заряд q , отстоящий от нее на расстояние

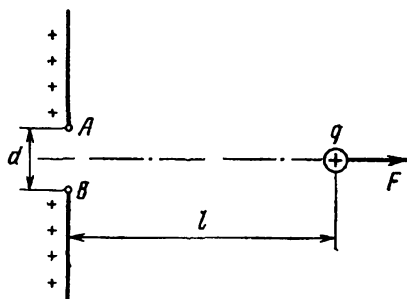


Рис. 2

l , с силой F . В каком случае эта сила больше — при $l = 5d$ или при $l = 10d$?

12. Поле плоского воздушного конденсатора имеет напряженность E , а заряд конденсатора равен q . Какая сила действует на каждую из его пластин? Равна ли эта сила qE ?

13. Заряженная металлическая пластинка находится в электростатическом поле, показанном на рис. 3. Заряд пластинки равен q , слева от пластинки напряженность поля E_1 , а справа — E_2 . Какая сила действует на пластинку?

14. На рис. 4 изображен проект вечного двигателя. Между пластинами заряженного конденсатора помещен проводник $ABCD$, расположенный, как показано на рисунке. Так

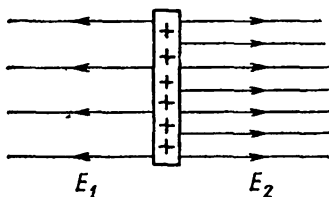


Рис. 3

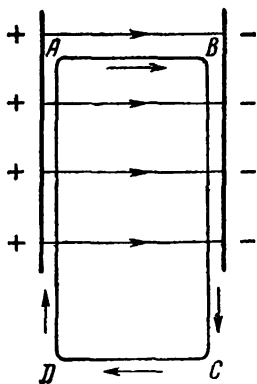


Рис. 4.

как поле конденсатора сосредоточено между его обкладками, то на участке AB будет действовать электродвижущая сила, направленная от A к B , а на других участках проводника электродвижущая сила будет отсутствовать. Поэтому в проводнике будет непрерывно поддерживаться ток, направленный, как показано на рисунке.

Указать ошибку в изложенном рассуждении.

15. На рис. 5 изображен один из проектов вечного двигателя. В однородное электростатическое поле помещен замкнутый провод $ABCD$, часть которого экранируется полым металлическим цилиндром $KLMN$. Так как внутри цилиндра поле отсутствует, то на участке DC электродвижущей силы не будет, а на участке AB она будет направлена вправо. Поэтому в проводе будет все время поддерживаться ток в направлении $ABCD$.

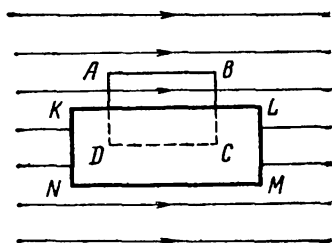


Рис 5

В чем ошибка этого проекта?

16. Положительный и отрицательный точечные заряды притягиваются друг к другу с силой F . Уменьшится ли эта сила, если поместить между зарядами стеклянный шар?

17. Пластины заряженного конденсатора притягиваются с силой F . Изменится ли эта сила, если ввести в конденсатор пластинку из диэлектрика, как показано на рис. 6?

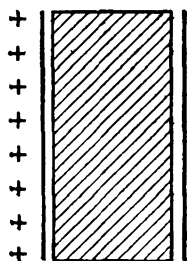


Рис 6.

18. Неподвижно закрепленный шарик заряжен положительно и находится над шариком, заряженным отрицательно. Заряды шариков одинаковы, масса каждого 0,01 г, радиус 1 мм, расстояние между центрами 20 мм. Какой должна быть разность их потенциалов, чтобы верхний шарик мог поднять нижний?

19. Один металлический шар заряжен, а другой нет. Когда шары соединили проволокой, заряды стали перетекать с незаряженного шара на заряженный. В каком случае это возможно?

20. Полый медный шар имеет радиус 10 см и массу 1 кг. Какую часть электронов надо было бы из него удалить, чтобы его потенциал стал равным 10^8 В? Заряд электрона равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

21. В каком случае незаряженный проводник имеет положительный потенциал?

22. В каком случае между проводником, заряженным положительно, и проводником, заряженным отрицательно, отсутствует разность потенциалов?

23. Проводники A и B удалены от других тел. Проводник A был заряжен, а проводник B нет, но когда их соединили проволокой, заряды не стали перетекать с A на B (а также с B на A). Привести пример таких проводников.

24. Полый латунный шар A , имеющий небольшое отверстие, заряжен положительно. Как известно, на внутренней поверхности этого шара заряды отсутствуют. Зарядится ли металлический шар B , если соединить его проволокой с внутренней поверхностью шара A ?

25. Положительно заряженный шар A индуцировал заряды на незаряженном проводнике BC (рис. 7). После этого левую половину проводника BC соединили с

незаряженным шаром D . Каков знак заряда, приобретенного шаром D ?

26. Проводникам A и B сообщили положительные заряды, причем потенциал первого стал равен 10 В, а потенциал второго 20 В. Затем заряд проводника A стали неограниченно увеличивать, и хотя его потенциал возрастал, однако потенциал проводника B при этом тоже увеличивался, и в конечном счете потенциал проводника A все время оставался меньше потенциала проводника B . Привести пример таких проводников.

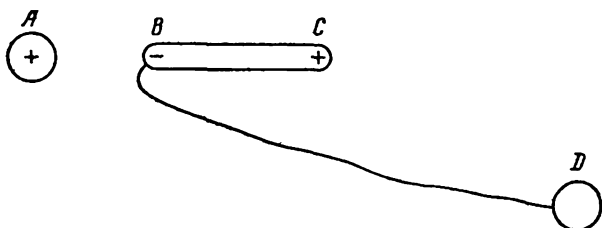


Рис 7.

27. Два концентрических полых шара заряжены: наружный до потенциала 5 В, а внутренний до потенциала 10 В. Уменьшится ли потенциал внутреннего шара и увеличится ли потенциал наружного, если соединить эти шары проволокой?

28. Медный шар A заряжен положительно, а медный шар B не заряжен. Шары имеют одинаковые размеры и почти касаются друг друга. После того, как их соединили проволокой, заряд шара A уменьшился вдвое. Сильно ли уменьшился его потенциал?

29. Двум проводникам сообщены положительные заряды, причем потенциал первого равен 100 В, а потенциал второго 50 В. Будут ли положительные заряды переходить с первого проводника на второй, если привести проводники в соприкосновение? (Никаких других тел вблизи проводников нет.)

30. Когда конденсатор присоединили к батарее аккумуляторов, он зарядился и приобрел энергию 1 Дж. Какую работу совершила при этом батарея?

31. Обкладки плоского воздушного конденсатора присоединены к аккумулятору. Уменьшится ли напряженность поля в этом конденсаторе, если поместить его в непроводящую жидкость с диэлектрической проницаемостью ϵ ?

32. Когда обкладки плоского воздушного конденсатора присоединили к аккумулятору, они стали притягиваться друг к другу с силой F . Как изменится эта сила, если ввести в конденсатор пластинку из диэлектрика, как показано на рис. 8? Диэлектрическая проницаемость пластинки $\epsilon = 3$.

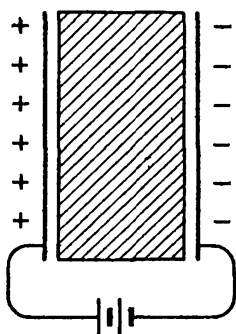


Рис. 8.

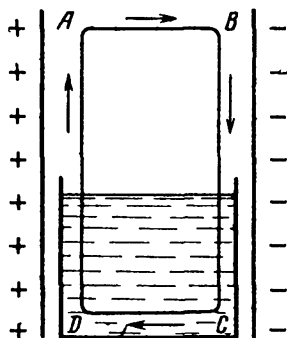


Рис. 9.

33. На рис. 9 изображен один из проектов вечного двигателя. Между обкладками плоского конденсатора находится провод $ABCD$, нижняя часть которого помещена в сосуд с водой. Изобретатель считает, что так

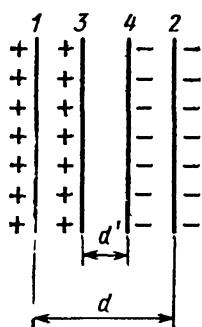


Рис. 10.

как вода является диэлектриком, то в нижней части конденсатора поле будет ослаблено, и поэтому электродвижущая сила, действующая на участке AB , будет больше электродвижущей силы, действующей на участке DC . Вследствие этого в проводнике будет все время поддерживаться ток, направленный так, как показано на рис. 9 стрелками.

Указать ошибку в этом проекте.

34. Плоский конденсатор, образованный пластинами 1 и 2, заряжен до разности потенциалов 40 В, а плоский конденсатор, образованный пластинами 3 и 4, — до разности потенциалов 30 В (рис. 10). Какова напряженность поля между обкладками конденсатора 3, 4, если $d = 2$ см, $d' = 1$ см?

Решая эту задачу, учащийся сказал: «Рассматриваемое поле получается в результате суперпозиции полей конденсаторов (1, 2) и (3, 4). Следовательно, искомая напряженность

$$E = \frac{U_{12}}{d} + \frac{U_{34}}{d'} = \frac{40}{0,02} + \frac{30}{0,01} = 5000 \text{ В/м.}»$$

Верен ли этот ответ?

35. Одинаковые металлические шары S_1 и S_2 находятся на большом расстоянии друг от друга и заряжены положительно. Незаряженный металлический шарик s во много раз меньше шаров S_1 , S_2 и удален от них на значительное расстояние. В одном эксперименте шарик s соединили тонкой проволокой с шаром S_1 , а в другом — с шаром S_2 . При этом в первом случае он приобрел заряд q_1 , а во втором — заряд q_2 . Какой заряд приобретет шарик s , если соединить его проволокой с шарами S_1 и S_2 одновременно?

36. Как известно, емкость плоского воздушного конденсатора обратно пропорциональна расстоянию между его обкладками. Уменьшится ли она до нуля, если увеличить расстояние между обкладками до бесконечности?

37. Между точками A и B некоторой конденсаторной цепи имеется разность потенциалов U . Если присоединить к этим точкам конденсатор емкостью C , то будет ли его заряд равен CU ?

38. Если в конденсаторной цепи, показанной на рис. 11, увеличить емкости конденсаторов C_1 и C_2 , то увеличатся ли их заряды?

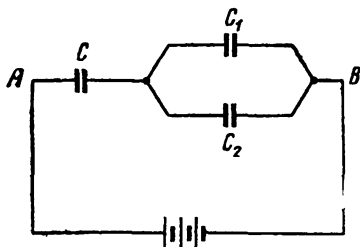


Рис. 11.

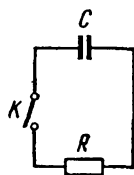


Рис. 12.

39. Конденсатор, показанный на рис. 12, имеет емкость C . Если сообщить ему заряд q_0 и замкнуть ключ K , то он станет разряжаться через сопротивление R . Оценим время, за которое он разрядится.

Рассмотрим этот конденсатор в произвольный момент времени в процессе его разрядки. Пусть его заряд в этот момент равен q , а разность потенциалов между его обкладками равна U . Тогда разрядный ток будет в этот момент равен

$$I = \frac{U}{R} = \frac{q/C}{R} = \frac{q}{CR}.$$

Но так как $q \leq q_0$, то $I \leq q_0/CR$. Поэтому, если t — время, за которое конденсатор полностью разряжается, то

$$t \geq \frac{q_0}{q_0/CR},$$

т. е.

$$t \geq CR.$$

Таким образом, если, например, $C = 0,001$ Ф и $R = 10\,000$ Ом, то конденсатор будет разряжаться больше 10 с, каким бы малым ни был его начальный заряд q_0 . Как понимать этот результат?

40. В учебниках говорится, что силовые линии электростатического поля не пересекаются. Вполне ли верно это утверждение?

41. Как известно, заряд проводника всегда располагается на его поверхности. Это часто объясняют тем, что

одноименные заряды взаимно отталкиваются и, стремясь разойтись как можно дальше друг от друга, собираются на поверхности проводника. Правильно ли это объяснение?

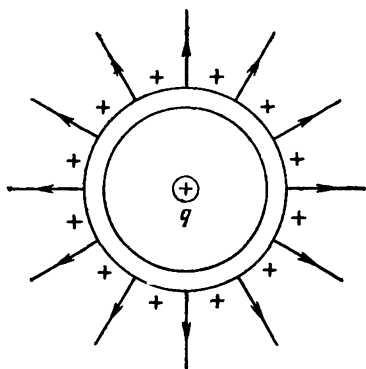


Рис. 13.

42. Если в центр незаряженной металлической сферы помещен положительный точечный заряд q , то поле вне сферы, симметрично (рис. 13). Доказать, что это поле будет таким же, если поместить заряд q не в центре сферы, а где угодно внутри нее.

43. Два одинаковых металлических шарика находятся на большом расстоянии друг от друга. Если со-

общить им разные положительные заряды q_1 , q_2 , то потенциальная энергия этой системы будет равна

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}, \quad (1)$$

где r — расстояние между шариками. Если соединить затем шарики на короткое время проволокой, то заряд каждого шарика станет равным

$$q'_1 = q'_2 = \frac{1}{2}(q_1 + q_2),$$

а для потенциальной энергии этой системы получим

$$\begin{aligned} W' &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q'_1 q'_2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r} \left[\frac{q_1 + q_2}{2} \right]^2 = \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r} \left(\frac{q_1^2}{4} + \frac{q_2^2}{4} + \frac{q_1 q_2}{2} \right) = \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r} \left[\left(\frac{q_1 - q_2}{2} \right)^2 + q_1 q_2 \right]. \quad (2) \end{aligned}$$

Сравнивая равенства (1) и (2), видим, что $W' > W$, т. е. потенциальная энергия этих зарядов стала больше. Откуда взялась лишняя энергия?

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

44. Вблизи поверхности Земли существует электростатическое поле с напряженностью около 130 В/м. Можно ли с помощью этого поля получить постоянный электрический ток?

45. В электростатическом поле потенциал точки A выше потенциала точки B . Однако если поместить в это поле проводник AB , то ток по нему идти не будет. Почему?

46. Если в водный раствор серной кислоты опустить цинковую и медную пластины, то между ними возникнет разность потенциалов (разомкнутый элемент Вольта). Но эти пластины и находящаяся между ними кислота являются проводниками, а все точки проводника должны иметь одинаковый потенциал. Откуда же берется разность потенциалов?

47. В некоторой цепи есть участок AB , показанный на рис. 14. Двое учащих обсуждали, как направлен

ток, идущий через сопротивление R . Один из них считал, что, поскольку ток всегда идет от плюса к минусу, а плюс находится слева, то рассматриваемый ток идет в направлении ARB . Другой же учащийся считал, что

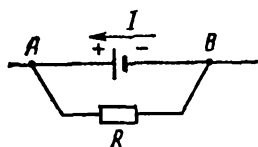


Рис. 14.

так как на участке AB ток идет от B к A , а в точке B цепь разветвляется, то рассматриваемый ток идет в направлении BRA . Кто из них прав?

48. На участках AQB и CLD , изображенных на рис. 15, ток отсутствует. Будет ли ток на участке KL , если соединить точки K и L , как показано пунктиром?

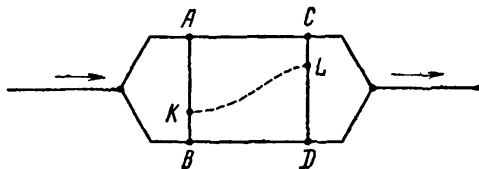


Рис. 15.

49. На рис. 16 показана цепь, простирающаяся вправо до бесконечности. Каково ее сопротивление? Напряжение подводится к точкам A и B .

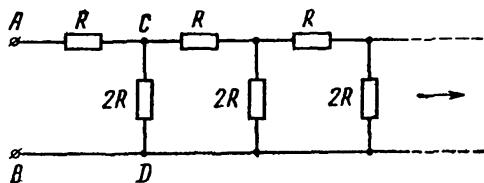


Рис. 16.

50. Гальванический элемент замкнут на два параллельных проводника. Уменьшатся ли токи в этих проводниках, если увеличить их сопротивления?

51. В цепи, изображенной на рис. 17, сопротивления всех участков одинаковы. Очевидно, потенциал точки B выше потенциала точки D , а также выше потенциала точки F . Отсюда заключаем, что если соединить точ-

ку B с точками D и F , то в проводнике BD ток пойдет от B к D , а в проводнике BF — от B к F . Верно ли это заключение?

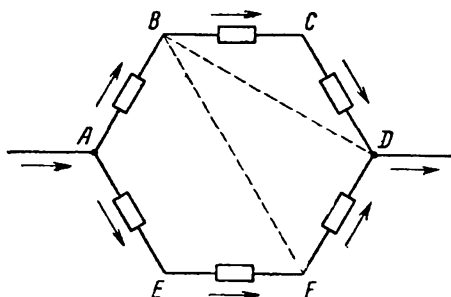


Рис 17.

52. Имеется неограниченное число одинаковых батареек для карманного фонаря. Можно ли, соединяя их тем или иным способом, зажечь лампу, рассчитанную на очень сильный ток?

53. На рис. 18 изображена цепь, состоящая из лампы 1 мощностью 40 Вт, ключа K и лампочки 2 от карманного фонаря. Цепь включили в городскую сеть при замкнутом ключе K , а затем ключ разомкнули. В этом

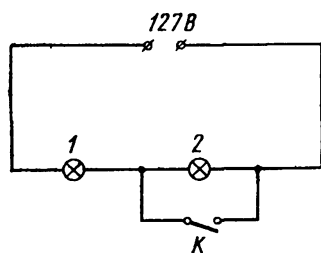


Рис 18.

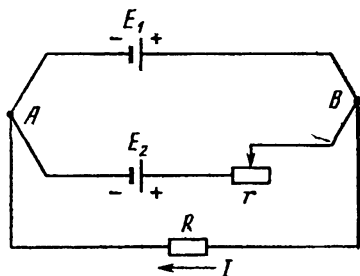


Рис. 19.

случае лампы горели нормально. Когда же в другой раз эту цепь включили в городскую сеть при разомкнутом ключе K , лампочка от карманного фонаря сразу перегорела. Почему?

54. Рассмотрим цепь, состоящую из элементов с э.д.с. E_1 и E_2 , сопротивления R и реостата r (рис. 19).

В каком случае ток I не зависит от сопротивления реостата r ?

55. В цепи, показанной на рис. 20, увеличили сопротивление R_1 , вследствие чего ток I тоже увеличился. Когда это будет наблюдаться?

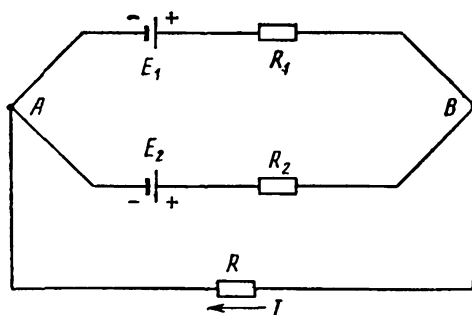


Рис. 20.

56. В цепи, показанной на рис. 20, увеличили все сопротивления. Может ли при этом увеличиться ток I ?

57. В цепи, изображенной на рис. 20, токи I_1 , I_2 , идущие через сопротивления R_1 , R_2 , направлены слева направо. Увеличатся ли они, если увеличить э.д.с. E_1 и E_2 , не меняя внутренних сопротивлений?

58. К аккумулятору A_1 последовательно присоединяют аккумуляторы A_2 и замыкают полученную батарею на внешнее сопротивление. В каком случае ток, протекающий через это сопротивление, не зависит от числа присоединенных аккумуляторов?

59. Ток во внешней цепи аккумулятора A_1 равнялся 1 А. Для его увеличения к аккумулятору A_1 последовательно присоединяют аккумуляторы A_2 , но при любом их числе ток во внешней цепи остается равным 1 А. Тогда аккумуляторы A_2 стали присоединять параллельно. Однако при любом их числе ток во внешней цепи продолжал оставаться равным 1 А. Зная, что э.д.с. аккумулятора A_1 равна 12 В, а аккумулятора A_2 равна 8 В, найти внутренние сопротивления аккумуляторов и сопротивление внешней цепи.

60. Напряжение на участке цепи AB равно 100 В (рис. 21). Перегорит ли лампочка для карманного фонаря, присоединенная к точкам A и B , если замкнуть контакт K ?

61. В цепи, показанной на рис. 22, каждый из вольтметров показывает 110 В и каждая из ламп L_1 , L_2 рассчитана на 110 В, но лампы имеют различную

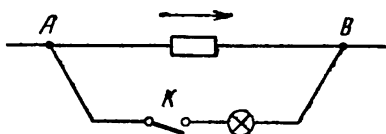


Рис. 21.

номинальную мощность. Можно ли замкнуть контакты K_1 , K_2 , не опасаясь, что лампы перегорят?

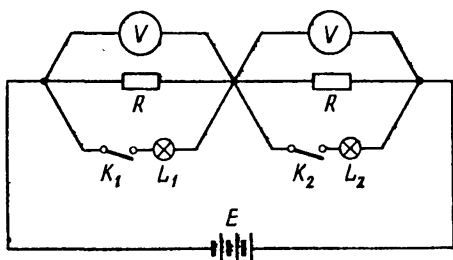


Рис. 22.

62. Рассмотрим цепь, показанную на рис. 23. При замыкании одного лишь контакта K_1 через сопротивление R идет ток I_1 , а при замыкании одного лишь контакта K_2 через сопротивление R идет ток I_2 . Будет ли ток I , протекающий через это сопротивление при замыкании обоих контактов, равен $I_1 + I_2$?

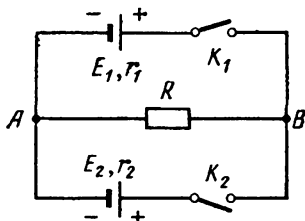


Рис. 23.

63. Пусть в цепи, изображенной на рис. 23, $r_1 = r_2 = 0$ и $E_1 \neq E_2$. Вычислим токи в этой цепи после замыкания контактов K_1 , K_2 . Положим $\varphi_B - \varphi_A = U$. Тогда согласно закону Ома $E_1 - U = I_1 r_1 = 0$, $E_2 - U = I_2 r_2 = 0$, откуда

$$E_1 = U, \quad E_2 = U,$$

что противоречит условию $E_1 \neq E_2$.

Разрешить противоречие.

64. Разность потенциалов между точками *A* и *B* некоторой цепи равна U . Когда эти точки соединили проводником с сопротивлением R , по нему пошел ток I . Какой ток пошел бы по этому сопротивлению, если бы оно было вдвое меньше?

65. В атмосфере Земли происходит в среднем сто разрядов молний в секунду. Продолжительность молнии равна примерно 0,001 с, разность потенциалов между ее концами можно принять равной 10^9 В, а силу тока — 20 000 А. Оценить годовой расход электроэнергии во всех молниях Земли. Сравнить его с годичной выработкой электроэнергии во всем мире (около $2 \cdot 10^{19}$ Дж).

66. Лампу, рассчитанную на напряжение 220 В, включили в сеть с напряжением 127 В. Так как $N = U^2/R$, а $220^2/127^2 = 3$, то можно сделать вывод, что ее мощность будет втрое меньше номинальной. Верно ли это?

67. На что расходуется электроэнергия, потребляемая домашним холодильником?

68. Вагон освещается пятью последовательно соединенными лампами, на каждой из которых написано: 110 В, 25 Вт. Затем одну из них заменили новой, на которой написано: 110 В, 40 Вт. Будет ли она гореть ярче прежней?

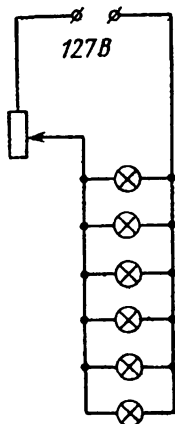


Рис. 24

69. На рис. 24 показаны шесть лампочек для карманного фонаря, включенные в городскую сеть через реостат, обеспечивающий

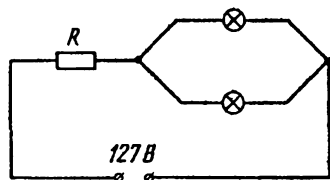


Рис. 25

нормальный накал каждой лампочки. Уменьшится ли создаваемая ими освещенность, если одна из них перегорит?

70. Две одинаковые лампы включены в городскую сеть, как показано на рис. 25. Если их номинальная

мощность велика, то при подходящем выборе сопротивления R наблюдается следующий эффект: когда обе лампы включены, они не горят; если же одну из них вывернуть, то вторая загорается, но горит неполным накалом. Объяснить явление.

71. Имеется ключ и две лампы мощностью 75 и 15 Вт соответственно. Составить из них цепь, удовлетворяющую следующему условию: при замкнутом ключе горит только лампа мощностью 75 Вт, а при разомкнутом горит только лампа мощностью 15 Вт.

72. Как при параллельном, так и при последовательном соединении двух одинаковых аккумуляторов на внешнем сопротивлении выделялась мощность 80 Вт. Какая мощность будет выделяться на этом сопротивлении, если замкнуть на него лишь один из аккумуляторов?

73. На внешнем сопротивлении аккумулятора выделялась тепловая мощность $N = 10$ Вт. Когда к концам этого сопротивления присоединили второй такой же аккумулятор, мощность N стала вдвое большей, т. е. достигла 20 Вт. Какой она будет, если к концам этого сопротивления присоединить третий такой же аккумулятор?

74. Согласно закону Фарадея масса вещества, выделившегося при электролизе, равна

$$m = kIt,$$

где k — коэффициент пропорциональности. При этом затрачивается электроэнергия

$$W = UIt = Um/k,$$

где U — напряжение, при котором производится электролиз. Из последнего выражения видно, что если производить электролиз при очень малом напряжении, то энергию, нужную для выделения заданной массы вещества, можно сделать сколь угодно малой. В частности, при электролизе воды можно получить 1 кг гремучего газа, затрачивая ничтожное количество электроэнергии. Но это, очевидно, находится в противоречии с законом сохранения энергии, так как количество тепла, которое можно получить при взрыве 1 кг гремучего газа, отнюдь не мало.

Разрешить противоречие.

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

75. Шарик из мягкого железа был сначала помещен в слабое магнитное поле, а затем — в сильное, причем во втором случае на него действовала меньшая сила, чем в первом. В каком случае это наблюдается?

76. Шарик из мягкого железа находится вблизи двух магнитов (рис. 26). Если бы второго магнита не было,

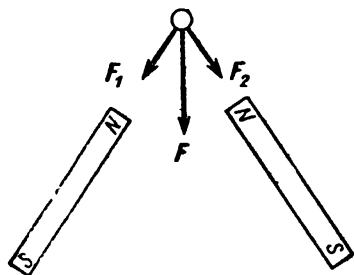


Рис. 26.

то первый действовал бы на шарик с силой F_1 , а если бы не было первого магнита, то второй действовал бы на шарик с силой F_2 . Равна ли сила F , с которой действуют на шарик оба магнита, геометрической сумме сил F_1 и F_2 ?

77. Работа, совершаемая при сближении двух отталкивающихся магнитов, очевидно, расходуется на уве-

личение энергии магнитного поля. На что расходуется работа, затрачиваемая при сближении двух отталкивающихся токов, т. е. двух проводников, по которым текут токи противоположных направлений?

78. Проводник AB перемещают так, что по нему идет ток от точки A к точке B (рис. 27). В какой из этих точек потенциал выше?

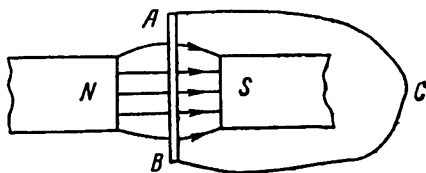


Рис. 27.

79. Вращающийся медный диск связан с неподвижным проводником $ABCD$ посредством скользящих контактов A и D (рис. 28). Диск и проводник находятся в однородном магнитном поле, перпендикулярном плоскости чертежа. Изменяется ли при вращении диска магнитный поток через контур $ABCD$? Течет ли по проводнику $ABCD$ ток?

80. Кольцо из сверхпроводника находится вблизи постоянного магнита и пронизывается магнитным потоком Φ . Тока в кольце нет. Каким будет магнитный поток через это кольцо, если убрать магнит?

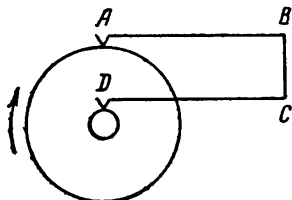


Рис. 28.

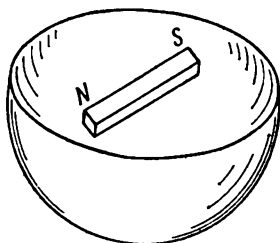


Рис. 29.

81. Известен эффектный опыт: если над чашей, сделанной из сверхпроводника, поместить магнит, то он неподвижно повиснет над ней (рис. 29). Чем это объясняется?

82. Электроны e_1 и e_2 движутся, как показано на рис. 30. Пусть F — сила, с которой магнитное поле первого электрона действует на второй, а F' — сила, с которой магнитное поле второго электрона действует на первый. Равны ли силы F и F' ?

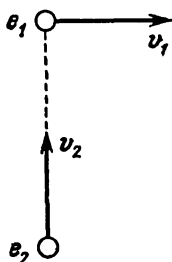


Рис. 30.

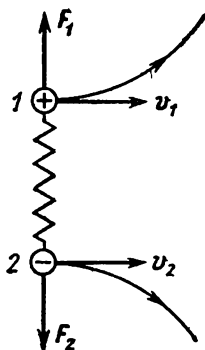


Рис. 31.

83. Шарики 1 и 2, показанные на рис. 31, влетают в однородное магнитное поле, перпендикулярное плоскости чертежа. Шарики связаны пружиной, движутся с

одинаковыми скоростями, имеют одну и ту же массу и одинаковые заряды противоположных знаков.

Так как на эти шарики действуют силы Лоренца F_1 , F_2 , перпендикулярные скоростям v_1 , v_2 , то они будут двигаться так, как показано на рисунке. При этом пружина будет растягиваться и приобретет некоторую потенциальную энергию. За счет чего?

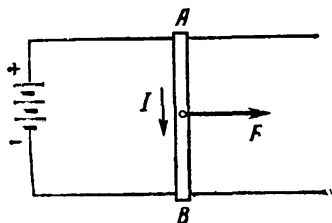


Рис. 32.

84. По двум металлическим рейкам, лежащим в горизонтальной плоскости, может скользить металлический стержень AB (рис. 32). По стержню протекает ток I , поддерживаемый аккумулятором. Система находится в однородном магнитном поле, направленном

вертикально (т. е. перпендикулярно плоскости чертежа).

Так как магнитное поле действует на стержень с силой F , то он будет двигаться вправо и сила F будет совершать работу. Но эта сила складывается из сил Лоренца, действующих на электроны, движущиеся по проводнику AB . А так как силы Лоренца не совершают работы, то ее не совершает и сила F .

Разрешить противоречие.

85. На рис. 33 показана схема электрозвонка постоянного тока. Когда ток идет по цепи $ABKCMDA$,

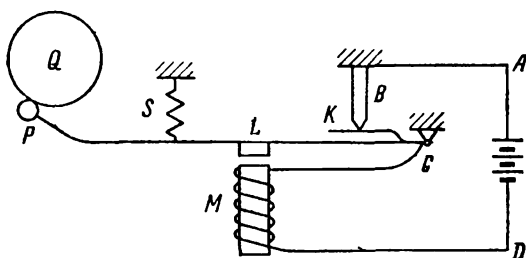


Рис. 33.

электромагнит M притягивает к себе якорь L . При этом упругая пластинка K отходит от штифта B и цепь размыкается. Тогда пружина S возвращает якорь L в первоначальное положение, цепь вновь замыкается, якорь

вновь притягивается к электромагниту и т. д. В итоге якорь совершает периодические колебания и молоточек P бьет по колокольчику Q .

Рассмотрим работу этого звонка более подробно. На рис. 34 показаны три положения якоря: положение 1, когда он находится в верхней точке, положение 2, при котором только начинается размыкание цепи, и положение 3, когда якорь находится в нижней точке. При перемещении якоря из положения 1 в положение 2

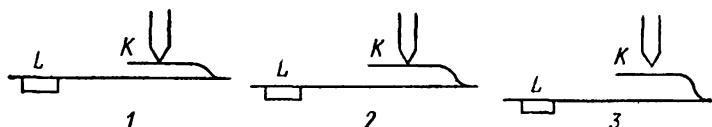


Рис. 34.

электромагнит действует на него с силой F , которая совершает положительную работу A_{12} . Затем при перемещении якоря из положения 2 в положение 3 и из положения 3 в положение 2 сила F равна нулю и работы не совершает. Наконец, когда якорь перемещается из положения 2 в положение 1, на него вновь действует сила F , и так как она направлена вниз, а якорь движется вверх, то совершаемая ею работа A_{21} отрицательна. Но когда якорь перемещается из положения 2 в положение 1, сила F имеет такую же величину, как при перемещении якоря из положения 1 в положение 2. Следовательно, $A_{21} = -A_{12}$, т. е. работа, совершаемая силой F за один цикл, равна нулю. А так как движение якоря сопровождается энергетическими потерями (например, при ударах молоточка по колокольчику), то приходим к выводу, что звонок работать не будет.

Почему же звонок все-таки работает?

86. В демонстрационном генераторе постоянного тока магнитное поле создается постоянными магнитами, а якорь приводится во вращение опускающимся грузом (груз прикреплен к нити, намотанной на шкив генератора). Увеличится ли ток, генерируемый этой машиной, если усилить ее магниты?

87. Генератор, описанный в предыдущей задаче, замкнут на электрическую лампочку. Как изменится накал этой лампочки, если последовательно с ней включить небольшое дополнительное сопротивление?

88. В демонстрационном электродвигателе магнитное поле создается постоянными магнитами. Станет ли такой двигатель вращаться медленнее, если сделать его магниты немного слабее? Двигатель работает без нагрузки.

89. Груз поднимают с помощью серийного электродвигателя (двигателя с последовательным возбуждением). Как изменится ток, потребляемый этим двигателем, если немного увеличить подводимое к нему напряжение?

90. Ответить на вопрос предыдущей задачи в случае шунтового двигателя (двигателя с параллельным возбуждением).

91. На шкив шунтового двигателя намотан трос, поднимающий груз. Как изменится скорость груза, если немного увеличить радиус шкива? Один учащийся считал, что поскольку $v = \omega r$, то увеличение радиуса шкива должно привести к увеличению скорости груза. Другой же учащийся считал, что если увеличить радиус шкива, то поднимать груз станет труднее (так как для этого потребуются больший вращающий момент) и поэтому скорость груза уменьшится. Кто из них прав?

92. Вообразим, что обмотка якоря шунтового двигателя сделана из сверхпроводника. Будет ли через якорь идти бесконечно большой ток? Зависит ли угловая скорость двигателя от момента нагрузки (от вращающего момента на валу двигателя)? Подводимое напряжение считать заданным.

93. Обмотка индуктора шунтового двигателя имеет сопротивление $R_1 = 120$ Ом, а обмотка якоря — сопротивление $R_2 = 1$ Ом. Ток, протекающий через двигатель, $I = 11$ А, а напряжение на его клеммах $U = 120$ В. Вычислить механическую мощность двигателя.

Решая эту задачу, учащийся рассуждал следующим образом. Мощность, потребляемая двигателем, равна

$$P = UI = 120 \cdot 11 = 1320 \text{ Вт},$$

а мощность тепловых потерь равна

$$P' = I^2 R.$$

где R — сопротивление обмоток якоря и индуктора. Но так как эти обмотки соединены параллельно, то

$$P' = I^2 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 11^2 \cdot \frac{120 \cdot 1}{120 + 1} = 120 \text{ Вт},$$

Откуда искомая механическая мощность

$$N = P - P' = 1320 - 120 = 1200 \text{ Вт.}$$

Верно ли это решение?

94. Два генератора постоянного тока соединены, как показано на рис. 35. Если пренебречь их внутренними сопротивлениями, то

$$N_1 = E_1 I, \quad N_R = I^2 R = IR \cdot I = (E_1 - E_2) I,$$

где E_1 и E_2 — э. д. с. этих генераторов, N_1 — мощность, развиваемая первым генератором, и N_R — мощность, расходуемая на выделение тепла в сопротивлении R . Из этих выражений видно, что $N_1 > N_R$, т. е. часть мощности, развиваемой первым генератором, куда-то исчезает. Куда?

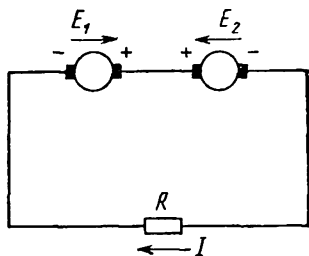


Рис. 35.

95. Цепь переменного тока состоит из трех последовательно соединенных сопротивлений: омического, индуктивного и емкостного. Может ли одновременное увеличение каждого из них привести к уменьшению общего сопротивления?

96. В городскую сеть включена катушка с большим числом витков (рис. 36). При измерении протекающего по ней переменного тока установили, что ее сопротивление равно 20 Ом. Затем поверх этой катушки намотали вторую точно такую же и включили ее в цепь параллельно первой (вторая катушка показана пунктиром). Будет ли общее сопротивление катушек равно 10 Ом?

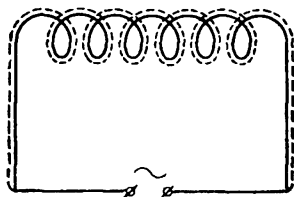


Рис. 36

97. Замкнутый проводник находится в переменном магнитном поле, изменяющемся по синусоидальному закону. Учащиеся обсуждали вопрос о токе в этом проводнике. Один из них считал, что согласно закону Ома

$$I = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} / R,$$

где $\Delta\Phi/\Delta t$ — скорость изменения магнитного потока, а R — сопротивление проводника. Другой же учащийся полагал, что так как сопротивление этого проводника складывается из омического и индуктивного, то

$$I = \frac{\Delta\Phi/\Delta t}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}},$$

где ωL — индуктивное сопротивление проводника. Кто из них прав?

98. В городской сети тока находится участок, составленный из «черных ящиков» 1 и 2 (рис. 37), причем

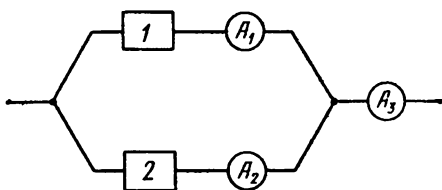


Рис. 37.

амперметр A_1 показывает ток 0,3 А, амперметр A_2 — ток 0,4 А и амперметр A_3 — ток 0,5 А. Что может находиться в «черных ящиках»?

99. На рис. 38 показан участок цепи переменного синусоидального тока. В каком случае напряжение U не зависит от величины тока I ?

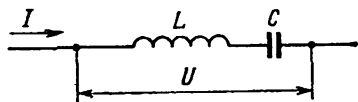


Рис 38

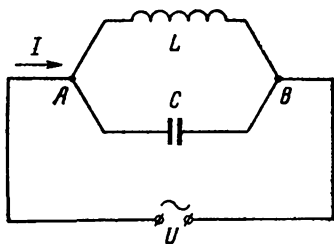


Рис. 39.

100. На рис. 39 показана цепь переменного синусоидального тока. В каком случае ток I не зависит от величины напряжения U ?

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

1. Атомная масса меди равна 63,54, ее атомный номер — 29; следовательно, искомый заряд равен

$$q = \frac{6,02 \cdot 10^{26}}{63,54} \cdot 29 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} = 44 \cdot 10^6 \text{ Кл.}$$

Через лампочку карманного фонаря такой заряд проходит за время

$$t = \frac{44 \cdot 10^6}{0,28} = 157 \cdot 10^6 \text{ с} \approx 5 \text{ лет.}$$

2. Заряд грамма электронов равен

$$q = \frac{0,001}{9,11 \cdot 10^{-31}} 1,6 \cdot 10^{-19} = 17,6 \cdot 10^7 \text{ Кл.}$$

Следовательно, для искомой силы получим

$$F = \frac{(17,6 \cdot 10^7)^2}{4\pi\epsilon_0 (10^{11})^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot (17,6 \cdot 10^7)^2}{(10^{11})^2} = 28\,000 \text{ Н.}$$

3. Потому, что электрическое поле вблизи клемм аккумулятора слишком слабо (см. в связи с этим задачу 18).

4. Если поле однородно, то не будет. Если же оно неоднородно, то будет действовать с силой, направленной в ту сторону, где напряженность поля больше.

5. Шарик поместили вблизи незаряженного проводника. На проводнике появились индуцированные заряды, и вокруг него возникло электрическое поле.

6. Заряжен, так как если бы его заряд был равен нулю, то он притягивался бы к шару А, подобно тому как кусочки незаряженной бумаги или металлической

фольги притягиваются к наэлектризованному гребню. Нетрудно видеть, что его заряд положителен.

7. Пусть заряд шара B равен нулю (см. рис. 1). Тогда он станет притягиваться к шару A , т. е. на него будет действовать сила F , направленная влево. Сообщим теперь шару B положительный заряд очень небольшой величины. Тогда сила F изменится очень мало и, следовательно, будет по-прежнему направлена влево. При этом левая часть шара B будет иметь отрицательный заряд, а правая — чуть больший положительный.

8. Если шарик B является проводником, то на нем появляются индуцированные заряды. Если он сделан из диэлектрика, то на нем образуются поляризационные заряды. В любом из этих случаев на одной стороне шарика B образуется положительный заряд, а на другой — такой же отрицательный. Пусть абсолютная величина каждого из этих зарядов равна q , а расстояние между ними равно l (рассматриваем эти заряды как точечные). Тогда, если заряд шара A равен Q , то

$$F = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{(r - \frac{1}{2}l)^2} - \frac{1}{(r + \frac{1}{2}l)^2} \right] = \frac{Qql}{2\pi\epsilon_0(r^2 - \frac{1}{4}l^2)^2} \approx \frac{Qql}{2\pi\epsilon_0 r^3},$$

так как $\frac{1}{4}l^2$ мало по сравнению с r^2 .

Мы видим, что если считать $ql = \text{const}$, т. е. если рассматривать шарик B как жесткий диполь, то F обратно пропорционально r^3 . В действительности же, поскольку q уменьшается с ростом r , сила F убывает быстрее, чем $1/r^3$.

9. Например, в случае концентрических полых шаров.

10. Это верно лишь в случае одинаковых зарядов пластинок.

Пусть заряд левой пластинки равен q_1 , а заряд правой равен q_2 , причем $q_1 \neq q_2$. Предположим, что заряды q_1, q_2 находятся на внешних поверхностях этих пластинок. Тогда заряд q_1 создаст внутри левой пластинки поле с напряженностью

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{2\epsilon_0} = \frac{q_1}{2\epsilon_0 S},$$

а заряд q_2 — поле с напряженностью

$$E_2 = \frac{\sigma_2}{2\epsilon_0} = \frac{q_2}{2\epsilon_0 S},$$

где S — площадь каждой пластинки. Так как поля E_1, E_2 направлены в противоположные стороны, то внутри

левой пластинки будет существовать поле с напряженностью

$$E = |E_1 - E_2| = \frac{|q_1 - q_2|}{2\epsilon_0 S} \neq 0.$$

Но это невозможно, так как левая пластинка является проводником, а внутри проводника электростатическое поле отсутствует. Следовательно, предположение, что заряды q_1 , q_2 находятся на внешних поверхностях пластинок, неверно.

11. Когда $l = 10d$.

В самом деле, пусть поверхностная плотность заряда этой плоскости равна σ . Вообразим, что отверстия AB нет и плотность заряда на участке AB тоже равна σ . Тогда на заряд q будет действовать сила $F + F'$, где F' — сила, действующая на этот заряд со стороны участка AB . Но напряженность поля, созданного заряженной плоскостью без отверстия, составляет $\sigma/2\epsilon_0$. Следовательно,

$$F + F' = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} q,$$

откуда

$$F = \frac{\sigma q}{2\epsilon_0} - F'.$$

Начнем теперь увеличивать расстояние l . Тогда первый член написанной разности будет оставаться неизменным, а второй будет изменяться. Если $l = 10d$, то сила F' будет, конечно, меньше, чем если $l = 5d$. Значит, при $l = 10d$ сила F больше, чем при $l = 5d$.

12. Если поле конденсатора имеет напряженность E , то напряженность поля, созданного одной из его пластин, равна $1/2 E$. Значит, для силы, действующей на другую пластину, получим $1/2 qE$.

В книге «Фейнмановские лекции по физике» дается другая трактовка коэффициента $1/2$ в выражении $1/2 qE$. Рассмотрим одну из пластин конденсатора, например, левую. Заряд этой пластины будем представлять себе в виде тонкого слоя на ее внутренней поверхности. Тогда части заряда, расположенные на правой поверхности этого слоя, будут находиться в поле с напряженностью E , а части, расположенные на левой поверхности, — в поле с напряженностью, равной нулю. Следовательно, средняя напряженность поля, действующего на рассматриваемый заряд, равна $1/2 E$, и поэтому искомая сила равна $1/2 qE$.

13. Поле, в котором находится пластинка, очевидно, является суперпозицией двух полей: внешнего поля E и поля E' , созданного самой пластинкой. Считая направление вправо положительным, получим

$$E - E' = -E_1, \quad E + E' = E_2,$$

откуда

$$E = \frac{1}{2}(E_2 - E_1).$$

Так как искомая сила действует на плоскость со стороны внешнего поля E , то

$$F = \frac{1}{2}q(E_2 - E_1).$$

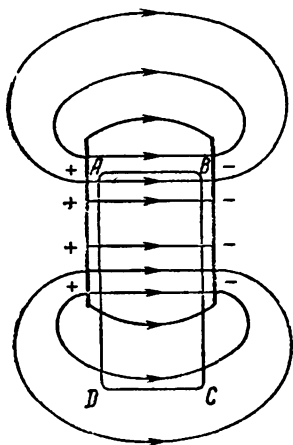


Рис. 40.

14. Поле плоского конденсатора выглядит примерно так, как показано на рис. 40, т. е. существует и вне его обкладок. Из рисунка видно, что на участке CD оно создает электродвижущую силу, противоположную электродвижущей силе на участке AB .

15. После того, как в поле внесут цилиндр $KLMN$, оно перестанет быть однородным. На правой части этого цилиндра индуцируются положительные заряды, а на левой отрицательные, и возникнет поле, созданное этими зарядами. На участке AB оно будет направлено влево, т. е. будет противодействовать внешнему полю.

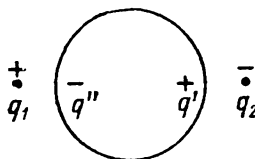


Рис. 41.

16. Нет, она увеличится.

Обозначим рассматриваемые заряды через q_1 и q_2 (рис. 41). Вследствие поляризации правая часть шара будет иметь положительный заряд q' , а левая — отрицательный заряд q'' такой же величины. Поэтому на заряд q_2 будут действовать три силы: сила F со стороны заряда q_1 , сила F' со стороны заряда q' и сила F'' со стороны заряда q'' . Так как силы F и F' направлены влево, а сила F'' — вправо, то их равнодействующая равна

$$R = F + F' - F''.$$

Но поскольку заряд q_2 ближе к заряду q' , чем к заряду q'' , то $F' > F''$ и поэтому $R > F$.

17. Поляризационные заряды, образующиеся на правой и левой сторонах пластинки, имеют одинаковую величину и противоположные знаки, и поэтому они не создают поля в зазорах между пластинкой и обкладками конденсатора. Вводя пластинку из диэлектрика, мы ослабляем поле в пространстве, занятом диэлектриком, но не изменяем поля в зазорах между диэлектриком и пластинами конденсатора. Следовательно, силы, действующие на пластины конденсатора, при этом не изменятся.

18. Должно выполняться неравенство

$$\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 l^2} > mg, \quad (1)$$

где q — заряд каждого шарика, l — расстояние между их центрами и m — масса нижнего шарика. Искомая разность потенциалов $U = 2\phi$, т. е.

$$U = 2 \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R}, \quad (2)$$

где R — радиус каждого шарика. Из (1) и (2) получим

$$U > \frac{l}{R} \sqrt{\frac{mg}{\pi\epsilon_0}}.$$

Подставив сюда $l = 20$ мм, $R = 1$ мм, $m = 10^{-5}$ кг, $\pi\epsilon_0 = \frac{1}{36 \cdot 10^9}$ Ф/м, найдем $U > 37\,600$ В.

19. Если эти шары находятся в электростатическом поле, созданном другими телами. Пусть, например, шар A заряжен отрицательно, а шар B не заряжен, но находится вблизи отрицательно заряженного шара C (рис. 42). Если заряд шара A очень мал, то после соединения шаров A и B проволокой отрицательные заряды станут перетекать с незаряженного шара B на заряженный шар A . При этом отрицательный заряд шара A будет увеличиваться.

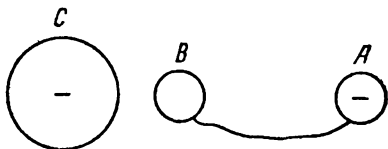


Рис 42

Если слова «заряды стали перетекать» понимать буквально, то можно дать более простой ответ. Пусть

металлический шар A заряжен положительно, а металлический шар B не заряжен. Если соединить их проволокой, то формально можно считать, что положительные заряды будут перетекать с шара A на шар B . Однако в действительности дело будет обстоять иначе: электроны будут перетекать с незаряженного шара B на заряженный шар A .

20. Заряд всех электронов этого шара $q_0 = 44 \cdot 10^6$ Кл (см. решение задачи 1). Заряд электронов, которые нужно удалить, равен

$$q = 4\pi\epsilon_0 R\varphi = \frac{1}{9 \cdot 10^9} \cdot 0,1 \cdot 10^8 = 1,11 \cdot 10^{-3} \text{ Кл.}$$

Так как $q_0/q \approx 40 \cdot 10^9$, то из каждых сорока миллиардов электронов нужно удалить один.

21. Если он находится в электростатическом поле, созданном другими телами.

22. Если эти проводники находятся в поле, созданном другими заряженными телами. Например, соединим незаряженные шары A и B проволокой и внесем в однородное поле, как показано на рис. 43. Тогда шар A зарядится по индукции отрицательно, а шар B — положительно, причем их потенциалы будут одинаковыми. Убрав проволоку, получим

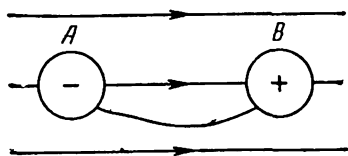


Рис. 43.

два разноименно заряженных проводника, между которыми нет разности потенциалов.

23. Проводник A — полый, проводник B находится внутри проводника A .

24. Зарядится. Действительно, если бы шар B был соединен проволокой не с внутренней поверхностью шара A , а с наружной, то он приобрел бы положительный заряд. Но шар A является проводником, и поэтому потенциал его внутренней поверхности такой же, как наружной. Следовательно, шар B зарядится и тогда, когда он соединен с внутренней поверхностью шара A .

Механизм этого процесса таков. Электроны, находящиеся на шаре B и в проводнике, соединяющем шары, будут притягиваться к положительным зарядам шара A и сначала перейдут на его внутреннюю поверхность,

а затем — на наружную. В результате шар B приобретет положительный заряд.

25. Положительный. Действительно, можно представить себе, что опыт проводился в другом порядке: сначала незаряженный проводник BC соединили с незаряженным шаром D , а затем приблизили положительно заряженный шар A . Но в этом случае на шаре D индуцируется заряд положительного знака, так как он находится вдаль, а на проводнике BC — отрицательного, так как проводник BC находится вблизи.

26. Проводник A — полый, проводник B находится внутри проводника A .

27. Потенциал внутреннего шара уменьшится, а потенциал наружного останется прежним.

Радиус внутреннего шара обозначим через R_1 , а радиус наружного — через R_2 . Пусть до соединения проволокой внутренний шар имел заряд q_1 , а наружный — заряд q_2 . Тогда

$$\varphi_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 R_1} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 R_2}, \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 R_2} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 R_2}, \quad (2)$$

где φ_1 и φ_2 — потенциалы этих шаров до соединения проволокой. После соединения шары будут иметь потенциал

$$\varphi = (q_1 + q_2)/4\pi\epsilon_0 R_2, \quad (3)$$

так как внутренний шар будет не заряжен, а заряд наружного будет равен $q_1 + q_2$. Сравнивая выражения (1), (3) и учитывая, что $R_1 < R_2$, видим, что $\varphi < \varphi_1$, т. е. потенциал внутреннего шара уменьшается. Сравнивая выражения (2), (3), видим, что $\varphi = \varphi_2$, т. е. потенциал наружного шара не изменяется.

28. После соединения проволокой потенциал шара A стал уменьшаться, а шара B — увеличиваться. Но до соединения шаров их потенциалы были почти одинаковыми, так как зазор между шарами очень мал. Поэтому, соединив шары проволокой, мы почти не изменили потенциал шара A (так же, как потенциал шара B).

29. Не обязательно. Потенциал проводника зависит не только от его заряда, но и от наличия вблизи него других проводников. Сближая проводники, мы изменяем их потенциалы, потенциал второго проводника может

увеличиться. Пусть, например, первый проводник представляет собой полый шар с отверстием, а второй — маленький шарик, который вносят внутрь полого шара и приводят в соприкосновение с внутренней поверхностью последнего. Тогда положительные заряды будут переходить со второго проводника на первый.

30. Энергия конденсатора равна

$$W = \frac{1}{2}qU = \frac{1}{2}qE,$$

где q — заряд конденсатора, U — напряжение на его обкладках и E — э. д. с. батареи. Работа, совершенная батареей, равна

$$A = qE.$$

Следовательно, $A = 2W = 2$ Дж.

Работа $A = W = 1$ Дж ушла на джоулево тепло. Из приведенных выкладок видно, что она не зависит от сопротивления соединительных проводов.

31. Так как разность потенциалов между обкладками этого конденсатора не изменится, то не изменится и напряженность поля.

32. Увеличится в 9 раз.

Емкость конденсатора увеличится в 3 раз, а разность потенциалов между его обкладками не изменится, так как она равна э. д. с. аккумулятора. Следовательно, заряд каждой обкладки увеличится в 3 раз, и поэтому поле, создаваемое одной из обкладок, тоже увеличится в 3 раз. Но сила, действующая на каждую из обкладок, равна

$$F = qE,$$

где E — напряженность поля, порождаемого одной из обкладок. (Поляризационные заряды на пластинке из диэлектрика не создают поля в зазорах между этой пластинкой и обкладками конденсатора) Поэтому сила F увеличится в 3^2 раз.

33. В верхней части конденсатора разность потенциалов между его обкладками такая же, как в нижней. А поскольку ширина конденсатора всюду одинакова, то на участке DC его поле такое же, как на участке AB . (Отсюда следует, что в нижней части конденсатора плотность заряда его обкладок больше, чем в верхней.)

34. Неверен. Так как поле между обкладками внутреннего конденсатора однородно, то искомая напряженность равна

$$E = \frac{U_{34}}{d'} = \frac{30}{0,01} = 3000 \text{ В/м.}$$

Ошибка учащегося состоит в следующем. Согласно методу суперпозиции,

$$E = E_{12} + E_{34},$$

где E_{12} — напряженность поля, создаваемого только конденсатором (1, 2), а E_{34} — напряженность поля, создаваемого только конденсатором (3, 4). Следовательно,

$$E_{12} = \frac{U_{12}}{d},$$

где U_{12} — не фактическая разность потенциалов между обкладками 1 и 2, равная 40 В, а та разность потенциалов, которая была бы между ними, если бы не было конденсатора (3, 4). Аналогично,

$$E_{34} = \frac{U_{34}}{d'},$$

где U_{34} — не фактическая разность потенциалов между обкладками 3 и 4, равная 30 В, а та разность потенциалов, которая существовала бы между ними, если бы не было конденсатора (1, 2).

35. Пусть потенциал шара S_1 равен φ_1 , а потенциал шара S_2 равен φ_2 . Так как шарик s значительно меньше шаров S_1 , S_2 , то, соединяя его с шаром S_1 или S_2 , мы практически не меняем потенциала этого шара. Поэтому

$$q_1 = C\varphi_1, \quad q_2 = C\varphi_2,$$

где C — емкость шарика s . Если соединить шарик s с шарами S_1 , S_2 одновременно, то потенциал этих шаров станет равным

$$\varphi = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2),$$

так как шары S_1 , S_2 одинаковы, а шарик s очень мал. Следовательно, заряд, приобретенный шариком s , равен

$$q = C\varphi = \frac{1}{2}C(\varphi_1 + \varphi_2) = \frac{1}{2}(C\varphi_1 + C\varphi_2).$$

Учитывая ранее написанные равенства, получаем

$$q = \frac{1}{2}(q_1 + q_2).$$

36. Формула $C = \epsilon_0 S/d$ верна лишь при небольших d , и поэтому ею нельзя пользоваться при $d \rightarrow \infty$.

Пусть обкладки плоского конденсатора находятся бесконечно далеко друг от друга. Если сообщить им заряды $+q$ и $-q$, то они приобретут потенциалы

$$\varphi_1 = q/C, \quad \varphi_2 = -q/C,$$

где C — емкость одной обкладки, рассматриваемой как уединенный проводник. Следовательно, емкость конденсатора, образованного этими обкладками,

$$C' = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{\frac{q}{C} - \left(-\frac{q}{C}\right)} = \frac{1}{2}C.$$

Так как $C \neq 0$, то и $\frac{1}{2}C \neq 0$.

37. Не обязательно, так как присоединение конденсатора может изменить разность потенциалов между точками A и B . Рассмотрим, например, цепь, показанную на рис. 44. Пусть э.д.с. аккумулятора равна $2U$. Тогда $\varphi_A - \varphi_B = U$. Если теперь присоединить к точкам A и B конденсатор, показанный пунктиром, то, как нетрудно вычислить, разность $\varphi_A - \varphi_B$ станет равной $\frac{2}{3}U$, а заряд присоединенного конденсатора будет равен $\frac{2}{3}CU$.

Рис. 44.

Приведем расчет.

Емкость конденсаторов, присоединенных к точкам A и B , равна $2C$, а емкость всех трех конденсаторов равна

$$C' = \frac{C \cdot 2C}{C + 2C} = \frac{2}{3}C.$$

Следовательно, заряд этой батареи равен

$$q = C' \cdot 2U = \frac{4}{3}CU,$$

а для разности потенциалов $\varphi_A - \varphi_B$ имеем

$$\varphi_A - \varphi_B = q/2C = \frac{4}{3}CU/2C = \frac{2}{3}U.$$

Поэтому заряд присоединенного конденсатора равен $C \cdot \frac{2}{3}U = \frac{2}{3}CU$.

38. Не обязательно.

Разность потенциалов между точками A и B (она равна э.д.с. аккумулятора) обозначим через U . Емкость рассматриваемой батареи равна

$$\frac{C(C_1 + C_2)}{C + C_1 + C_2},$$

и, следовательно, для суммарного заряда конденсаторов C_1 и C_2 получим

$$q = \frac{C(C_1 + C_2)}{C + C_1 + C_2} U.$$

Так как заряды этих конденсаторов пропорциональны их емкостям, то

$$q_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} q, \quad q_2 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} q,$$

что с учетом предыдущего равенства дает

$$q_1 = \frac{C_1}{C + C_1 + C_2} CU, \quad q_2 = \frac{C_2}{C + C_1 + C_2} CU.$$

Из этих выражений видно, что если увеличить емкости C_1 и C_2 , то либо заряды q_1 и q_2 увеличатся, либо один из них увеличится, а другой уменьшится. Например, если емкость C_1 увеличить сильно, а емкость C_2 — очень мало, то q_1 увеличится, а q_2 уменьшится.

39. Из полученного результата следует, что конденсатор будет разряжаться бесконечно долго при любом q_0 .

В самом деле, так как от любого момента, предшествующего полному разряду конденсатора, должно пройти не меньше 10 с (при выбранных значениях C и R) до его окончательного разряда, то сам разряд должен длиться бесконечно долго. (См. Примечание 1 на стр. 59.)

40. Силовые линии электростатического поля не пересекаются в точках, где напряженность поля отлична от нуля, но могут пересекаться в точках, где напряженность поля равна нулю. Например, на рис. 45 показано поле, созданное двумя одинаковыми положительными зарядами. Здесь силовые линии пересекаются в точке O , в которой напряженность поля равна нулю.

41. Неправильно, так как с тем же основанием можно сказать, что заряды, находящиеся на поверхности проводника, будут отталкиваться друг от друга и поэтому часть из них будет вытеснена внутрь проводника.

(Заряды, пришедшие на поверхность проводника раньше, будут отталкивать те, которые подойдут к этой поверхности позже.)

Доказать, что заряд проводника располагается только на его поверхности, можно следующим образом. Предположим, что в некоторой точке внутри проводника объемная плотность заряда ρ отлична от нуля. Тогда она будет отлична от нуля и в некоторой окрестности этой точки. Опишем вокруг этой точки сферу сколь

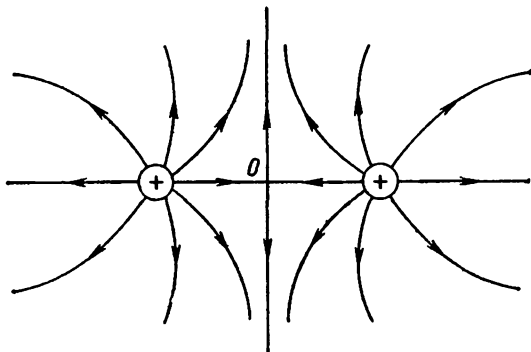


Рис. 45.

уюдно малого радиуса и рассмотрим находящиеся на ней заряды. Так как каждый из них находится в равновесии, то действующая на него электростатическая сила равна нулю. Следовательно, в каждой точке этой сферы равна нулю напряженность электростатического поля, и поэтому равен нулю поток вектора напряженности через рассматриваемую сферу. Но согласно теореме Гаусса указанный поток равен

$$\frac{1}{\epsilon_0} \sum q,$$

где $\sum q$ — сумма зарядов, находящихся внутри данной сферы. Значит, $\sum q = 0$, и так как $\sum q = \rho V$, где V — объем, ограниченный рассматриваемой сферой, а ρ — объемная плотность заряда внутри нее, то приходим к выводу, что $\rho = 0$.

Таким образом, предположение, что в данной точке $\rho \neq 0$, приводит к противоречию.

Приведенное доказательство опирается на теорему Гаусса, а теорема Гаусса выводится из закона Кюлона.

Следовательно, то, что заряд проводника располагается на его поверхности, есть математическое следствие закона Кулона. Можно доказать и более сильное утверждение, а именно: если бы сила взаимодействия зарядов не подчинялась закону Кулона, т. е. зависела от расстояния не по закону обратных квадратов, а по какому-нибудь другому, то заряды располагались бы не только на поверхности проводника, но и внутри него.

42. Сначала рассмотрим другой случай, а именно — точечный заряд $+q$, помещенный внутри проводящей сферы, несущей отрицательный заряд $-q$ (рис. 46).

Докажем, что в этом случае поле будет существовать только внутри сферы.

Рассмотрим однородную проводящую среду, заполняющую все пространство. Вырежем в ней сферическую полость и внесем туда точечный заряд $+q$ (рис. 47).

Тогда на поверхности полости появится индуцированный отрицательный заряд $-q$, а в бесконечно удаленных точках среды — индуцированный положительный заряд $+q$. При этом во всех точках вне этой полости будут отсутствовать как электрическое поле, так и заряды (ибо среда является проводником). Удалим теперь ту часть рассматриваемой среды, которая находится вне пунктирной сферы (см. рис. 47).

Тогда точечный заряд $+q$ окажется внутри проводящей сферы, несущей заряд $-q$. Но так как удаляемая часть не содержит зарядов (заряды, находящиеся в бесконечности, не существенны), то, отбрасывая ее, мы не изменяем электрического поля. Следовательно, оно по-прежнему будет существовать лишь внутри данной полости.

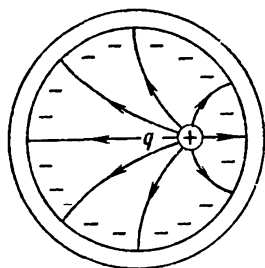


Рис. 46

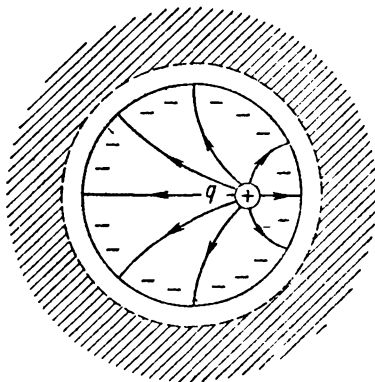


Рис. 47.

Итак, если внутри полый проводящей сферы, несущей заряд $-q$, находится точечный заряд $+q$, то поле существует только внутри этой сферы (см. рис. 46).

Сообщим теперь сфере, показанной на рис. 46, дополнительный заряд $+q$. Тогда ее суммарный заряд станет равным нулю, т. е. мы придем к случаю, который нас интересует (точечный заряд $+q$ внутри незаряженной сферы). Но так как на внешней поверхности этой

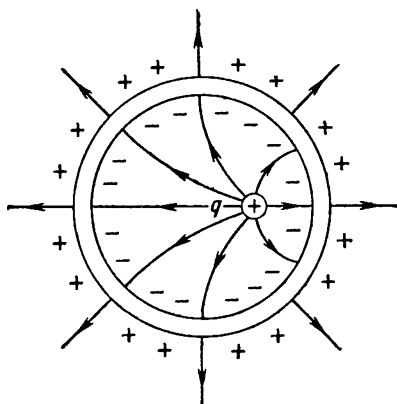


Рис. 48.

сферы нет поля, то дополнительный заряд $+q$ распределится по ней равномерно. Таким образом, мы получим картину, показанную на рис. 48: внутри незаряженной сферы находится точечный заряд $+q$, на ее внутренней поверхности — заряд $-q$, а на внешней — заряд $+q$, распределенный по этой поверхности равномерно.

Теперь ясно, каким будет поле вне сферы, изображенной на рис. 48.

Можно считать, что оно получается в результате суперпозиции двух полей: поля, порождаемого зарядом $+q$ на внешней поверхности, и поля, порождаемого точечным зарядом $+q$ и зарядом $-q$ на внутренней поверхности. Но мы видели, что второе из этих полей существует только внутри сферы (см. рис. 46). Следовательно, вне сферы поле создается только зарядом $+q$, находящимся на ее внешней поверхности. А так как этот заряд распределен равномерно, то создаваемое им поле будет симметричным.

В проведенных рассуждениях мы пользовались искусственным приемом: вместо того, чтобы вносить точечный заряд $+q$ внутрь незаряженной сферы, мы внесли его внутрь сферы, имеющей заряд $-q$, а затем сообщили ей дополнительный заряд $+q$. Но ясно, что электростатическое поле не зависит от способа, которым мы заряжаем или разряжаем тела, порождающие это поле. Поэтому поле, показанное на рис. 48, возникнет и при внесении точечного заряда $+q$ внутрь сферы, ко-

торая не была заряжена. Положительный заряд на ее внешней поверхности и отрицательный заряд на ее внутренней поверхности появятся в этом случае вследствие электростатической индукции.

43. Энергия

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}$$

есть энергия взаимодействия рассматриваемых шариков. Но, кроме того, они обладают собственной энергией

$$\frac{q_1^2}{2C} + \frac{q_2^2}{2C},$$

где C — емкость каждого из них. Соединяя шарики проволокой, мы изменяем их заряды и при этом уменьшаем их собственную энергию. (См. Примечание 2 на стр. 59.)

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

44. Нельзя, так как для появления постоянного тока в замкнутой цепи нужны силы неэлектростатической природы (сторонние силы).

45. Потенциал точки A выше потенциала точки B лишь до тех пор, пока в поле не внесен проводник AB . После внесения этого проводника в нем начнется перемещение зарядов, благодаря чему конец B зарядится положительно, а конец A — отрицательно. В результате в проводнике образуется поле, направленное противоположно первоначальному. Складываясь, эти поля уничтожают друг друга.

46. На границе между электродами и кислотой действуют силы неэлектростатического происхождения (сторонние силы). При наличии таких сил разные точки проводника могут иметь различный потенциал.

47. Это зависит от того, каковы остальные участки цепи. Например, в цепи, показанной на рис. 49, ток идет в направлении ARB . Если же рассматривается цепь, изображенная на рис. 50, и э.д.с. E_1 мала, то ток идет в направлении BRA .

48. На участках AK и CL тока нет, а на участке AC он течет слева направо; поэтому

$$\Phi_A = \Phi_K, \quad \Phi_C = \Phi_L, \quad \Phi_A > \Phi_C.$$

Из этих соотношений следует, что $\varphi_K > \varphi_L$. Значит, если соединить точки K и L проводником, то по нему будет идти ток.

49. Интуитивно ясно, что эта цепь имеет конечное сопротивление. Пусть оно равно r . Тогда сопротивление

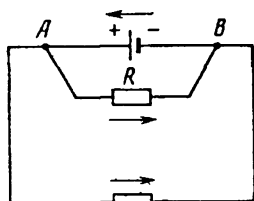


Рис. 49.

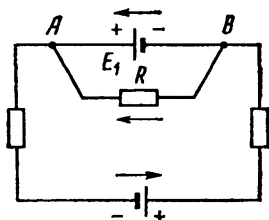


Рис. 50.

бесконечной цепи, лежащей правее точек C и D , тоже будет равно r . Следовательно, исходная цепь эквивалентна показанной на рис. 51, и для ее сопротивления имеем

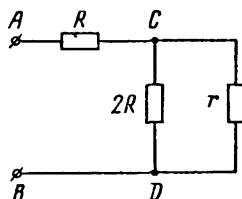


Рис. 51.

$$R + \frac{2Rr}{2R + r}.$$

Но так как оно вместе с тем равно r , то

$$R + \frac{2Rr}{2R + r} = r.$$

Решив это уравнение, найдем $r = 2R$.

Конечность сопротивления этой бесконечной цепи можно доказать следующим образом. Рассмотрим цепь, подобную показанной на рис. 16, но состоящую не из бесконечного числа ячеек, а из конечного. Пусть число ячеек равно n , а сопротивление цепи равно r_n . Добавив к крайней правой ячейке еще одну, получим цепь, у которой число ячеек равно $n + 1$, а сопротивление равно r_{n+1} . Так как эта цепь получается из старой посредством добавления некоторого проводника, то ее сопротивление уменьшается (ибо заряды получают большую свободу перемещения). Таким образом, $r_{n+1} < r_n$, т. е. величины $r_1, r_2, \dots, r_n, \dots$ образуют монотонно убывающую последовательность. Но так как все ее члены положительны, то она имеет некоторый неотрицательный предел r .

50. Ток, протекающий через оба сопротивления, уменьшится. Что касается токов, протекающих через каждое из этих сопротивлений, то один из них уменьшится, а другой может как уменьшиться, так и увеличиться. Например, если R_1 увеличить сильно, а R_2 — очень мало, то ток в проводнике R_2 увеличится.

Дадим количественное решение этой задачи. Так как

$$I = \frac{E}{R_1 R_2 / (R_1 + R_2) + r},$$

где E — э. д. с. и r — внутреннее сопротивление источника тока, то токи в первом и втором проводниках равны соответственно

$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{E R_2}{R_2 (R_1 + r) + R_1 r},$$

$$I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{E R_1}{R_1 (R_2 + r) + R_2 r},$$

что можно записать в виде

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + r + R_1 r / R_2}, \quad I_2 = \frac{E}{R_2 + r + R_2 r / R_1}.$$

Из полученных выражений видно, что если R_1 увеличить сильно, а R_2 — очень мало, то I_2 станет больше.

Полученный результат верен лишь в случае $r \neq 0$. Если $r = 0$, то $I_1 = E/R_1$, $I_2 = E/R_2$ и любое увеличение сопротивлений R_1 , R_2 приводит к уменьшению токов I_1 , I_2 .

51. Неверно. В проводнике BD ток будет идти от B к D , а в проводнике BF направление тока зависит от сопротивления проводника BD . Это видно из следующих соображений. Пусть сначала точка B не соединена с точками D и F . Тогда потенциал точки B будет выше потенциала точки F . Соединим теперь точки B и D проводником с очень большим сопротивлением. Тогда протекающий в нем ток будет очень мал, и поэтому потенциалы всех точек этой цепи останутся практически такими же, как до соединения. Следовательно, потенциал точки B будет по-прежнему выше потенциала точки F , и поэтому, если соединить их, то ток будет идти от B к F . Рассмотрим теперь другой крайний случай — когда сопротивление проводника BD очень мало. В этом случае сопротивление всего участка между точками B

и D также будет очень мало, и поэтому потенциал точки B будет близок к потенциалу точки D . Но так как точка D имеет меньший потенциал, чем точка F , то потенциал точки B тоже будет ниже потенциала точки F . Следовательно, если соединить точки B и F , то ток пойдет от F к B . Таким образом, направление тока в проводнике BF зависит от сопротивления проводника BD .

52. Можно, но не при параллельном соединении батареек и не при последовательном. Действительно, при параллельном соединении

$$I = \frac{E}{R + r/n},$$

а при последовательном

$$I = \frac{nE}{R + nr},$$

где I — ток, протекающий через лампу, R — ее сопротивление, E — э. д. с. батарейки, r — ее внутреннее сопротивление, n — число батареек. Из этих выражений видно, что при параллельном соединении $I < E/R$, а при последовательном $I < E/r$, т. е. ни при одном из этих соединений нельзя сделать I сколь угодно большим.

Чтобы получить сколь угодно большой ток, надо соединить батарейки смешанным образом, например так. Соединив последовательно m батареек, получим источник с э. д. с. mE и внутренним сопротивлением mr . Соединив затем параллельно n таких источников и замкнув их на лампу, получим ток

$$I = \frac{mE}{R + mr/n}.$$

Пусть m очень велико, а m/n очень мало (т. е. n во много раз больше m). Тогда

$$I \approx mE/R,$$

а так как m очень велико, то I тоже очень велико.

53. В первом случае ток через лампочку 2 начинает идти после того, как нить лампы 1 накалилась, вследствие чего ее сопротивление стало значительным. Во втором же случае ток через лампочку 2 начинает идти сразу после включения в сеть, т. е. когда нить лампы 1 еще не нагрелась и ее сопротивление мало. Поэтому лампочка 2 перегорает.

54. Это будет при

$$E_2 = \varphi_B - \varphi_A,$$

где φ_A и φ_B — потенциалы точек A и B до присоединения элемента E_2 .

В этом случае э. д. с. E_2 будет «уравновешивать» разность потенциалов $\varphi_B - \varphi_A$, и ток в цепи элемента E_2 будет отсутствовать. Поэтому ток I не будет зависеть от сопротивления реостата и будет равен

$$I = \frac{E_1}{R + r_1},$$

где r_1 — внутреннее сопротивление элемента E_1 .

Так как при этом

$$\varphi_B - \varphi_A = IR = \frac{E_1 R}{R + r_1},$$

то такую же величину должна иметь э. д. с. E_2 . Следовательно, рассматриваемый эффект будет наблюдаться при

$$E_2 = E_1 \frac{R}{R + r_1}.$$

(См. Примечание 3 на стр. 60.)

55. Если э. д. с. E_1 значительно меньше э. д. с. E_2 . В этом случае ток, протекающий через элемент E_1 , направлен не от A к B , а от B к A , т. е. ток, генерируемый элементом E_2 , идет частично через сопротивление R и частично — через сопротивление R_1 . Увеличивая R_1 , мы уменьшаем ток на участке BR_1A , что приводит к увеличению тока на участке BRA .

56. Может. В решении предыдущей задачи было показано, что если э. д. с. E_1 мала по сравнению с э. д. с. E_2 , то, увеличивая сопротивление R_1 , мы увеличиваем ток I . Пусть E_1 значительно меньше E_2 и мы увеличиваем R_1 заметно, а R_2 и R — очень мало. Тогда результат будет почти таким же, как в случае увеличения одного лишь сопротивления R_1 . Следовательно, ток I при этом увеличится.

Дадим количественное решение рассматриваемой задачи. Для упрощения выкладок добавим внутренние сопротивления источников к сопротивлениям участка AB , т. е. будем считать, что R_1 и R_2 — полные сопротивления верхней и нижней ветвей этого участка. Потенциал точки A будем считать равным нулю, а потенциал точки B

обозначим через φ . Тогда согласно закону Ома

$$E_1 - \varphi = I_1 R_1, \quad E_2 - \varphi = I_2 R_2, \quad \varphi = IR, \quad I = I_1 + I_2.$$

Получилась система четырех уравнений с четырьмя неизвестными φ , I_1 , I_2 , I . Решив ее, найдем

$$I = \frac{E_1 R_2 + E_2 R_1}{R_1 R_2 + R(R_1 + R_2)},$$

что можно записать в виде

$$I = \frac{E_1/R_1 + E_2/R_2}{1 + R/R_1 + R/R_2}.$$

Поскольку E_1 значительно меньше E_2 , первым слагаемым в числителе написанной дроби можно пренебречь. Если, далее, мы увеличим R_1 сильно, а R_2 и R — очень мало, то числитель этой дроби (в котором отброшено первое слагаемое) останется почти тем же, а знаменатель уменьшится. Следовательно, ток I увеличится. (См. Примечание 4 на стр. 60.)

57. Либо увеличатся, либо один увеличится, а другой уменьшится. Первая возможность очевидна, а вторая видна из следующих соображений. Увеличим сначала только э. д. с. E_1 . Тогда ток I увеличится и, поскольку

$$\varphi_B - \varphi_A = IR,$$

разность $\varphi_B - \varphi_A$ станет больше. Но так как

$$E_2 - (\varphi_B - \varphi_A) = I_2 R_2,$$

то ток I_2 уменьшится. Теперь чуть-чуть увеличим э. д. с. E_2 . Тогда ток I_2 почти не изменится и, следовательно, будет меньше того, который протекал через сопротивление R_2 до увеличения E_1 и E_2 .

58. Рассматриваемый ток равен

$$I = \frac{E_1 + nE_2}{r_1 + nr_2 + R},$$

где E_1 и E_2 — э. д. с. аккумуляторов A_1 и A_2 , r_1 и r_2 — их внутренние сопротивления, R — внешнее сопротивление и n — число присоединенных аккумуляторов. Написанная дробь не зависит от n лишь в одном случае, а именно при

$$E_1/(r_1 + R) = E_2/r_2.$$

При этом $I = E_2/r_2$.

59. Так как при последовательном присоединении аккумуляторов A_2 ток во внешней цепи не изменялся, то

$$E_1/(r_1 + R) = E_2/r_2, \quad (1)$$

где E_1 и E_2 — э. д. с. аккумуляторов A_1 и A_2 , r_1 и r_2 — их внутренние сопротивления, а R — внешнее сопротивление (см. решение предыдущей задачи). Ток во внешней цепи равнялся

$$I = E_2/r_2. \quad (2)$$

Так как при параллельном присоединении аккумуляторов A_2 ток во внешней цепи по-прежнему оставался неизменным, то э. д. с. E_2 равна напряжению на внешней цепи до присоединения этих аккумуляторов (см. решение задачи 54). Следовательно,

$$E_2 = IR. \quad (3)$$

Подставив в равенства (1), (2), (3) $E_1 = 12$ В, $E_2 = 8$ В, $I = 1$ А, получим систему трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\frac{12}{r_1 + R} = \frac{8}{r_2}, \quad 1 = \frac{8}{r_2}, \quad 8 = 1 \cdot R.$$

Решив ее, найдем $r_1 = 4$ Ом, $r_2 = 8$ Ом, $R = 8$ Ом.

60. Это зависит от того, каковы остальные участки цепи. Рассмотрим, например, цепь, показанную на рис. 52. Пусть $R_1 = R_2 = 10\,000$ Ом, $E = 200$ В, внутреннее сопротивление источника э. д. с. ничтожно мало. Тогда до замыкания контакта $U_{AB} = 100$ В. Если же замкнуть его, то ток, идущий через R_2 , меньше E/R_2 и, следовательно, ток, протекающий через лампочку, будет заведомо меньше E/R_2 . Учитывая, что $E = 200$ В и $R_2 = 10\,000$ Ом, видим, что этот ток будет меньше 0,02 А. Значит, лампочка не только не перегорит, но даже не загорится. (При замыкании контакта K напряжение на участке AB «сядет» и будет измеряться долями вольта.)

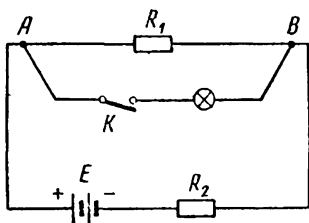


Рис 52.

61. Одна из ламп может перегореть.

Пусть $E = 220$ В и внутреннее сопротивление источника э.д.с. ничтожно мало. Тогда каждый из вольтметров будет показывать 110 В. Пусть, далее, R очень велико. Тогда, если замкнуть контакты K_1 , K_2 , то лампы будут под напряжениями

$$U_1 = E \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad U_2 = E \frac{R_2}{R_1 + R_2},$$

где R_1 и R_2 — сопротивления ламп. Пусть, наконец, номинальная мощность первой лампы мала (например, 15 Вт), а второй — велика (например, 150 Вт). Тогда $R_1 \gg R_2$ и, следовательно,

$$U_1 \approx E = 220 \text{ В.}$$

Поэтому первая лампа перегорит.

62. Не будет. Это видно хотя бы из следующего простого примера. Пусть $E_1 = E_2 = E$ и $r_1 = r_2 = r$. Тогда

$$I_1 = \frac{E}{R+r}, \quad I_2 = \frac{E}{R+r}, \quad I = \frac{E}{R+\frac{1}{2}r} = \frac{2E}{2R+r},$$

т. е. $I \neq I_1 + I_2$. (См. Примечание 5 на стр. 61.)

63. Если $E_1 \neq E_2$ и $r_1 = r_2 = 0$, то через источники будет идти бесконечно большой ток. Следовательно, в этом случае $I_1 = I_2 = \infty$ и поэтому произведения $I_1 r_1$ и $I_2 r_2$ нельзя считать равными нулю. (Другими словами, если внутренние сопротивления этих источников очень малы, то при расчете рассматриваемой цепи их нельзя приближенно считать равными нулю.)

64. Какой бы ни была цепь, ее можно рассматривать как генератор с какой-то э.д.с. E и каким-то внутренним сопротивлением r , присоединенный к точкам A и B . (Это утверждение интуитивно очевидно. В электротехнике оно строго доказывается и называется теоремой об эквивалентном генераторе.) Следовательно, можно считать, что сопротивление R включено так, как показано на рис. 53.

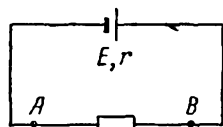


Рис 53.

В условии сказано, что в отсутствие проводника, соединяющего точки A и B , между ними была разность потенциалов U . Следовательно, э.д.с. E равна U . Далее, при сопротивлении участка AB , равном R , по нему шел ток I . Следовательно,

$$E/(R+r) = I,$$

и так как $E = U$, то

$$U/(R + r) = I,$$

откуда

$$r = (U - IR)/I.$$

Значит, если участок AB будет иметь сопротивление $1/2R$, то по нему будет идти ток

$$I' = \frac{E}{1/2R + r} = \frac{U}{1/2R + (U - IR)/I} = 2I \frac{U}{2U - IR}.$$

65. Энергия, расходуемая одной молнией, равна

$$UIt = 10^9 \cdot 20\,000 \cdot 0,001 = 2 \cdot 10^{10} \text{ Дж.}$$

Энергия, расходуемая всеми молниями за год, равна

$$W = 2 \cdot 10^{10} \cdot 100 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 365 = 6,3 \cdot 10^{19} \text{ Дж.}$$

Это более чем втрое превышает мировую годовичную выработку электроэнергии.

66. Неверно, так как при напряжении 127 В нить лампы будет иметь меньшую температуру и, следовательно, меньшее сопротивление. Поэтому мощность лампы уменьшится менее чем в три раза.

67. На нагревание комнаты. Рассмотрим включенный холодильник в произвольный момент t и несколько часов спустя. Очевидно, его состояние за это время не изменится (в частности, не изменится температура внутри него). Следовательно, не изменится и его внутренняя энергия, а так как холодильник взаимодействует лишь с комнатой, где он установлен, то приходим к выводу, что потребляемая им электроэнергия расходуется на нагревание этой комнаты.

68. Нет. Из пяти ламп заменена только одна, и поэтому ток, протекающий через эти лампы, изменится мало. Но так как сопротивление новой лампы заметно меньше сопротивления замененной (ибо у нее заметно больше номинальная мощность), то она будет гореть менее ярко.

69. Освещенность увеличится. Лампочка фонаря рассчитана на напряжение 3,5 В. Так как это напряжение значительно меньше городского, то сопротивление реластата должно быть во много раз больше сопротивления шести параллельно включенных лампочек. Поэтому когда одна из них перегорит, общее сопротивление цепи

почти не изменится и, следовательно, почти не изменится сила тока, протекающего через лампочки. Но так как их сопротивление при этом увеличится, то увеличится и потребляемая ими мощность.

70. Когда обе лампы включены, через каждую из них протекает ток

$$I = \frac{1}{2} \frac{U}{R + \frac{1}{2}r} = \frac{U}{2R + r},$$

где U — напряжение сети, а r — сопротивление одной лампы. Если же включена лишь одна из ламп, то протекающий через нее ток равен

$$I' = \frac{U}{R + r}.$$

Так как $I < I'$, то может оказаться, что ток I недостаточен для накала лампы, а ток I' достаточен.

71. См. рис. 54.

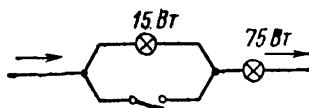


Рис. 54.

72. Согласно условию,

$$\left(\frac{E}{R + \frac{1}{2}r}\right)^2 R = 80, \quad \left(\frac{2E}{R + 2r}\right)^2 R = 80,$$

где E — э. д. с. аккумулятора, r — его внутреннее сопротивление, R — внешнее сопротивление. Из этих равенств следует, что

$$r = R, \quad E^2/R = 180.$$

Поэтому искомая мощность

$$N = \left(\frac{E}{R + r}\right)^2 R = \left(\frac{E}{R + R}\right)^2 R = \frac{E^2}{4R} = \frac{180}{4} = 45 \text{ Вт.}$$

73. Согласно условию,

$$\left(\frac{E}{R + r}\right)^2 R = 10, \quad \left(\frac{E}{R + \frac{1}{2}r}\right)^2 R = 20.$$

Из этих равенств следует, что

$$r = R\sqrt{2} = 1,41R, \quad E^2/R = 10(\sqrt{2} + 1)^2 = 58,1.$$

Искомая мощность равна

$$N = \left(\frac{E}{R + 1/3r} \right)^2 R = \frac{E^2}{R} \left(\frac{3R}{3R + r} \right)^2;$$

подставив сюда $E^2/R = 58,1$, $r = 1,41R$, найдем $N \approx 27$ Вт.

74. При электролизе возникает э.д.с. поляризации E_p , направленная в сторону, противоположную напряжению U . Поэтому электролиз возможен не при любом напряжении, а лишь при $U > E_p$. (Для воды $E_p \approx 1,5$ В.)

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

75. Если второе поле более однородно, чем первое. Если бы оно было вполне однородным, то сила, с которой оно действует на шарик, равнялась бы нулю.

76. Не равна, так как второй магнит увеличивает силу, действующую на шарик со стороны первого магнита (и наоборот). Это объясняется тем, что изображенные на рис. 26 магниты намагничивают шарик сильнее, чем каждый из них в отдельности. В результате сила F будет больше геометрической суммы сил F_1 и F_2 .

77. При сближении проводников AB и CD (рис. 55) создаваемое ими магнитное поле будет ослабляться, так как протекающие по ним токи направлены в противоположные стороны. Следовательно, работа, затрачиваемая на сближение этих проводников, превращается в тепло.

Механизм этого явления таков. Когда проводники сближаются, каждый из них пересекает силовые линии магнитного поля другого проводника. Вследствие это-

го в каждом проводнике возникает э.д.с. электромагнитной индукции, порождающая дополнительный ток и дополнительное нагревание проводника.

78. В точке B , так как на участке BCA , где отсутствуют источники э.д.с., ток идет от B к A ,

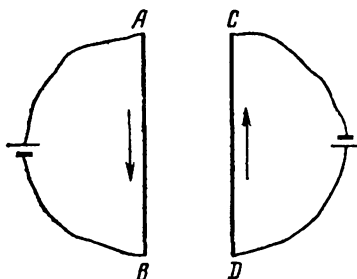


Рис. 55.

79. Магнитный поток остается постоянным, но по проводнику $ABCD$ будет идти индукционный ток. Действительно, рассмотрим участок диска между точками D и A . Так как этот участок движется в магнитном поле и пересекает его силовые линии, то на нем будет индуцироваться некоторая э.д.с. и, следовательно, по цепи $ABCD$ будет идти ток. Формальное противоречие закону индукции возникает здесь потому, что радиус DA все время «заменяется новым».

80. Э.д.с. индукции равна $\Delta\Phi/\Delta t$ и, следовательно,

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = IR,$$

причем в данном случае $R = 0$. Поэтому, как бы ни перемещался магнит, $\Delta\Phi/\Delta t$ будет все время равно нулю, т. е. Φ будет оставаться постоянным. Значит, если удалить магнит, то магнитный поток останется равным Φ . (При удалении магнита в кольце возникает индукционный ток. Магнитное поле этого тока создает поток Φ , который раньше создавался полем постоянного магнита.)

81. Когда магнит начинает падать, в чаше возникает индукционный ток, магнитное поле которого действует на магнит с силой, направленной вверх (согласно правилу Ленца). Эта сила быстро увеличивается и останавливает магнит. Так как чаша сделана из сверхпроводника, то индукционный ток в ней не прекращается и магнит продолжает висеть.

82. Не равны.

В точках прямой, на которой лежит вектор v_2 , магнитное поле электрона e_2 отсутствует. Следовательно, сила F' равна нулю. В точке же, где находится электрон e_2 , магнитное поле электрона e_1 отлично от нуля. Следовательно, сила F не равна нулю.

Когда векторы v_1 , v_2 направлены не так, как показано на рис. 30, а произвольным образом, силы F и F' , вообще говоря, тоже не равны друг другу.

83. За счет кинетической энергии шариков. Из рис. 31 видно, что когда шарики сместятся вправо, пружина будет действовать на них с силами, которые уменьшают скорость шариков.

84. Сила, действующая на стержень со стороны магнитного поля, имеет направление, отличное от изображенного на рис. 32. Если бы проводник AB был неподвижен, то электроны двигались бы от B к A и сила F

была бы направлена так, как показано на этом рисунке. Но проводник AB движется вправо, и, следовательно, электроны участвуют в двух движениях: по проводнику со скоростью v и вместе с проводником со скоростью v' (рис. 56). Следовательно, скорость электронов изображается вектором u , и поскольку сила F является силой Лоренца, то она направлена, как показано на рис. 56. Так как эта сила перпендикулярна к скорости u , то совершаемая ею работа равна нулю.

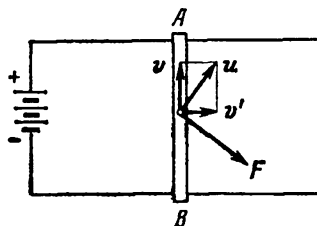


Рис. 56.

Однако, двигаясь вправо, стержень AB может совершить некоторую работу (например, преодолевая трение о рейки, по которым он скользит). В связи с этим может возникнуть вопрос: за счет чего она совершается? Легко видеть, что работа совершается за счет энергии аккумулятора.

85. Электромагнит обладает индуктивностью, и поэтому ток в нем устанавливается не сразу. Когда при движении якоря вверх контакт K замыкается, по обмотке электромагнита начинает течь ток, который в течение некоторого времени увеличивается. Поэтому когда якорь перемещается из положения 1 в положение 2 (см рис. 34), ток в нем несколько больше, чем при последующем перемещении из положения 2 в положение 1. Следовательно, на пути 1—2 сила F несколько больше, чем на пути 2—1, и, значит, работа A_{12} больше работы A_{21} (по абсолютной величине). По этой причине работа, совершаемая силой F за один цикл, положительна.

Таким образом, работа звонка оказывается возможной только благодаря «инертности» электромагнита. Если бы электромагнит включался и выключался мгновенно, звонок бы не работал. (См. Примечание 6 на стр. 62.)

86. Ток уменьшится.

Магнитное поле генератора действует на якорь с моментом M , препятствующим вращению. Так как этот момент создается силами Ампера, то он пропорционален силе тока и индукции магнитного поля, в котором вращается якорь. Следовательно,

$$M = kBI,$$

где k — постоянный коэффициент (для данного генератора). С другой стороны, так как якорь вращается равномерно, то

$$M = PR,$$

где P — вес опускающегося груза, а R — радиус шкива. Таким образом,

$$kBI = PR,$$

откуда

$$I = PR/kB.$$

Если усилить магниты, то B станет больше, а P , R и k не изменятся. Следовательно, I уменьшится. (При этом, очевидно, уменьшится и угловая скорость якоря.)

87. Из равенства $I = PR/kB$, полученного при решении предыдущей задачи, видно, что ток I не зависит от сопротивления внешней цепи. Значит, накал лампочки не изменится.

Это может показаться странным, так как если дополнительное сопротивление очень велико, то накал лампочки должен, как будто, стать очень малым. Но дело в том, что чем больше сопротивление внешней цепи, тем больше скорость вращения якоря и тем больше он ее набирает. Если это сопротивление очень велико, то якорь разгонится до очень большой скорости, и э.д.с. индукции станет настолько большой, что ток I будет иметь конечное значение, несмотря на очень большое сопротивление внешней цепи. Разумеется, это верно лишь в идеальном случае, когда нет трения и сопротивления воздуха, препятствующих вращению якоря и опусканию груза. В реальных условиях скорость якоря лимитируется трением и силами сопротивления воздуха (а также тем, что груз достигнет пола раньше, чем якорь наберет очень большую скорость). В этих условиях ток остается неизменным, лишь пока внешнее сопротивление увеличивается не сильно.

88. Двигатель будет вращаться быстрее.

Двигатель работает без нагрузки, и, следовательно, момент, приводящий во вращение его якорь, равен нулю (якорь вращается по инерции). А так как этот момент создается силами Ампера и поэтому пропорционален току в якоре, то ток в якоре тоже равен нулю. Но этот ток определяется равенством

$$U - E_i = IR,$$

где U — подводимое к двигателю напряжение, E_i — э. д. с. индукции, R — сопротивление якоря. Значит,

$$U - E_i = 0.$$

Далее, э. д. с. E_i пропорциональна скорости якоря ω и индукции поля, создаваемого постоянными магнитами, и, значит,

$$E_i = kB\omega;$$

тогда предыдущее равенство принимает вид

$$U - kB\omega = 0,$$

откуда

$$\omega = U/kB.$$

Из полученного соотношения видно, что уменьшение B приводит к увеличению ω .

Если B очень мало, то согласно последнему равенству ω очень велико. Таким образом, это равенство приводит к неправдоподобному выводу о том, что при очень слабых магнитах якорь будет вращаться с колоссальной скоростью. Дело в том, что по условию двигателя работает без нагрузки и, следовательно, на его якорь не действуют силы трения и сопротивления воздуха. В этом воображаемом случае равенство $\omega = U/kB$ верно при любых значениях индукции, и если B очень мало, то, хотя якорь будет разгоняться весьма медленно, он достигнет большой скорости. В реальных условиях равенство $\omega = U/kB$ верно лишь при не очень малых значениях индукции, а при очень малом B вращающий момент не сможет преодолеть сил трения и якорь останется неподвижным.

89. Вес груза остается неизменным, и поэтому вращающий момент двигателя не изменится. Следовательно, ток останется тем же. Если бы ток, идущий через двигатель, стал больше, то, помимо увеличения тока в якоре, произошло бы и усиление магнитного поля индуктора. Каждая из этих причин привела бы к увеличению вращающего момента.

90. Ток уменьшится.

Так как напряжение станет больше, то ток в цепи индуктора возрастет, и поэтому магнитное поле индуктора усилится. Но вращающий момент двигателя пропорционален индукции этого поля и току в якоре,

$$M = kBI.$$

Поэтому увеличение B приведет к уменьшению I , ибо вращающий момент M должен остаться неизменным.

Таким образом, в цепи индуктора ток станет больше, а в цепи якоря — меньше. Но так как ток в индукторе очень мал (несколько процентов от тока в якоре), то ток, потребляемый двигателем, уменьшится.

91. Сначала найдем зависимость вращающего момента двигателя от его угловой скорости. Этот момент пропорционален току в якоре и напряженности магнитного поля индуктора, причем последняя не зависит от угловой скорости; следовательно,

$$M = kI,$$

где I — ток в якоре, а k — постоянный коэффициент для данного двигателя при данном напряжении. Но

$$I = (U - E_i)/R,$$

где R — сопротивление якоря, а E_i — э. д. с. индукции, причем

$$E_i = k'\omega;$$

здесь k' — постоянный коэффициент для данного двигателя при заданном напряжении. Следовательно,

$$M = k \frac{U - k'\omega}{R} = \frac{kU}{R} - \frac{kk'}{R} \omega,$$

т. е.

$$M = A - B\omega, \quad (1)$$

где A и B — некоторые константы, определяемые параметрами двигателя и величиной подводимого напряжения. Полученное равенство показывает, что вращающий момент шунтового двигателя находится в линейной зависимости от его угловой скорости.

Найдем теперь зависимость скорости груза от радиуса шкива. Пусть вес груза равен P , а радиус шкива равен r . Тогда вращающий момент двигателя будет равен Pr , и так как $\omega = v/r$, то соотношение (1) примет вид

$$Pr = A - Bv/r,$$

откуда

$$v = \frac{A}{B} r - \frac{P}{B} r^2.$$

Такова зависимость v от r . График этой зависимости показан на рис. 57. Из него видно, что при увеличении r сначала v будет увеличиваться, а затем уменьшаться. Значит, если радиус шкива мал, то прав первый учащийся, а если этот радиус велик — второй учащийся.

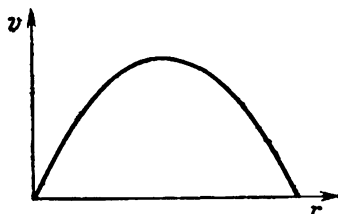


Рис. 57.

92. Пусть якорь шунтового двигателя имеет сопротивление R . Считая известными напряжение и момент нагрузки, найдем ток в якоре и угловую скорость якоря.

Режим работы шунтового двигателя определяется равенствами

$$U - E_i = IR, \quad E_i = k_1 \omega, \quad M = k_2 I,$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты, зависящие от напряженности магнитного поля индуктора, но не зависящие от ω , I и R . В этой системе уравнений фигурируют три неизвестные величины: I , E_i , ω . Решив ее, получим следующие значения I и ω :

$$I = \frac{M}{k_2},$$

$$\omega = \frac{U}{k_1} - \frac{M}{k_1 k_2} R.$$

Пусть теперь $R = 0$. Тогда

$$I = \frac{M}{k_2},$$

$$\omega = \frac{U}{k_1}.$$

Таким образом, ток в цепи якоря имеет конечную величину, а скорость вращения якоря не зависит от момента нагрузки.

93. Неверно, так как равенство $P' = I^2 R$ нельзя применять к разветвленной цепи, на участках которой

действуют э. д. с. (в данном случае — э. д. с. индукции в якоре).

Приведем правильный расчет искомой мощности.
Мощность, потребляемая двигателем,

$$P = UI = 120 \cdot 11 = 1320 \text{ Вт.}$$

Мощность тепловых потерь в цепи индуктора

$$P_1 = \frac{U^2}{R_1} = \frac{120^2}{120} = 120 \text{ Вт.}$$

Ток в цепи индуктора

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{120}{120} = 1 \text{ А.}$$

Ток в цепи якоря

$$I_2 = I - I_1 = 11 - 1 = 10 \text{ А.}$$

Мощность тепловых потерь в цепи якоря

$$P_2 = I_2^2 R_2 = 10^2 \cdot 1 = 100 \text{ Вт.}$$

Механическая мощность двигателя

$$N = P - P_1 - P_2 = 1320 - 120 - 100 = 1100 \text{ Вт.}$$

94. Передается второму генератору, который работает в режиме электродвигателя и, следовательно, совершает какую-то работу. (См. Примечание 7 на стр. 62).

95. Да, так как полное сопротивление

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

может при этом уменьшиться. (R — омическое сопротивление, X_L — индуктивное, X_C — емкостное.)

96. Сопротивление катушек будет больше 10 Ом.

Ток в городской сети является переменным, и поэтому сопротивление катушки равно

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2},$$

где R — ее омическое сопротивление, а X_L — индуктивное. После того как на первую катушку намотали вторую, R стало вдвое меньше, а X_L осталось прежним (роль второй катушки сводится к увеличению поперечного сечения первой). Следовательно, сопротивление Z уменьшится менее чем в два раза, т. е. будет больше 10 Ом.

97. Это зависит от того, как понимать символ Φ . Кроме внешнего магнитного поля, в котором находится проводник, имеется магнитное поле, создаваемое током в самом проводнике. Складываясь, эти поля дают некоторое суммарное поле. Если под Φ понимать магнитный поток суммарного поля, то прав первый учащийся, а если под Φ понимать поток только внешнего поля, то прав второй учащийся.

98. Так как $0,3 + 0,4 \neq 0,5$, то токи I_1, I_2 сдвинуты по фазе. Поскольку $(0,3)^2 + (0,4)^2 = (0,5)^2$, этот сдвиг равен 90° . Значит, в «ящиках» находятся какие-то активные и реактивные сопротивления, обеспечивающие такой сдвиг. Простейший вариант ответа: в одном из «ящиков» находится только омическое сопротивление, в другом — только индуктивное или емкостное. Этот вариант можно осуществить лишь приближенно, так как каждый дроссель и каждый конденсатор обладают некоторым — хотя бы очень небольшим — активным сопротивлением.

99. Сопротивление рассматриваемого участка равно

$$Z = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C},$$

и, следовательно,

$$U = I \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right).$$

Отсюда видно, что U не зависит от I только тогда, когда

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

В таком случае $U = 0$ при любом I . Это верно лишь в том идеальном случае, когда на рассматриваемом участке отсутствуют активные омические сопротивления. Практически катушка и конденсатор обладают некоторым омическим сопротивлением, но если оно очень мало, то напряжение U близко к нулю.

100. Через катушку идет ток

$$I_L = \frac{U}{\omega L},$$

а через конденсатор — ток

$$I_C = \frac{U}{1/\omega C} = U\omega C.$$

Но первый из них на 90° отстает от U , а второй на 90° опережает U . Значит, фазы этих токов противоположны и, следовательно,

$$I = I_L - I_C = U \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right).$$

Из полученного выражения видно, что I не зависит от U лишь тогда, когда

$$\frac{1}{\omega L} = \omega C.$$

В этом случае $I = 0$ при любом напряжении U .

Следовательно, ток идет лишь в контуре $ALBCA$. Это объясняется тем, что в такой идеализированной цепи омические сопротивления на участках ALB и ACB равны нулю. Практически такие сопротивления всегда отличны от нуля, но если они очень малы, то ток I незначителен по сравнению с токами I_L и I_C .

1. К решению задачи 39. Ток, протекающий во время разрядки,

$$I = - \frac{dq}{dt}.$$

Поэтому равенство $I = q/CR$ (стр. 10) можно записать в виде

$$- \frac{dq}{dt} = \frac{q}{CR}, \quad \text{или} \quad \frac{dq}{dt} + \frac{q}{CR} = 0.$$

Полученное дифференциальное уравнение определяет изменение заряда q со временем. Решив это уравнение с учетом начального условия $q(0) = q_0$, получим следующую зависимость q от t :

$$q = q_0 e^{-t/CR}.$$

Из этого равенства видно, что q монотонно убывает, обращаясь в нуль только при $t \rightarrow \infty$.

2. К решению задачи 43. Покажем, что полная энергия этой системы (энергия поля двух шариков) уменьшается.

Из равенств (1) и (2) на стр. 11 видно, что увеличение потенциальной энергии шариков равно

$$\Delta W = \frac{(q_1 - q_2)^2}{16\pi\epsilon_0 r}.$$

В то же время уменьшение собственной энергии этих шариков равно

$$\Delta U = \frac{1}{2C} \left[q_1^2 + q_2^2 - 2 \left(\frac{q_1 + q_2}{2} \right)^2 \right],$$

что можно представить в виде

$$\Delta U = \frac{(q_1 - q_2)^2}{4C},$$

и так как $C = 4\pi\epsilon_0 R$, где R — радиус шарика, то

$$\Delta U = \frac{(q_1 - q_2)^2}{16\pi\epsilon_0 R}.$$

Сравнивая ΔW с ΔU , видим, что так как $r > R$, то $\Delta W < \Delta U$. Таким образом, полная энергия этой системы уменьшается (частично переходит в джоулево тепло).

3. К решению задачи 54. Найдем ток I в общем случае, т. е. при произвольных E_1, E_2 .

Пусть потенциал точки A равен нулю, а потенциал точки B равен φ (рис. 19). Тогда согласно закону Ома будем иметь:

$$E_1 - \varphi = I_1 r_1, \quad E_2 - \varphi = I_2 (r_2 + r), \quad \varphi = IR, \quad I_1 + I_2 = I.$$

Получилась система четырех уравнений с четырьмя неизвестными: φ, I_1, I_2, I . Решив ее, найдем

$$I = \frac{E_1 (r_2 + r) + E_2 r_1}{(r_1 + R)(r_2 + r) + R r_1}.$$

Мы видим, что ток I в общем случае зависит от сопротивления $r_2 + r$ нижней ветви участка AB (и тем самым зависит от r). Но так как числитель и знаменатель полученной дроби являются линейными функциями от $r_2 + r$, то I не будет зависеть от этой суммы, если коэффициенты этих функций будут пропорциональны. Таким образом, рассмотренный в задаче эффект будет наблюдаться, если

$$\frac{E_1}{E_2 r_1} = \frac{r_1 + R}{R r_1},$$

т. е. если

$$E_2 = E_1 \frac{R}{R + r_1}.$$

4. К решению задачи 56 Ток I можно найти, не решая системы четырех уравнений с четырьмя неизвестными. Для этого достаточно воспользоваться формулами

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n}, \quad (1)$$

$$\frac{E}{r} = \frac{E_1}{r_1} + \frac{E_2}{r_2} + \dots + \frac{E_n}{r_n}, \quad (2)$$

где r и E — внутреннее сопротивление и э. д. с. батареи, получающейся при параллельном соединении нескольких источников тока. Пользуясь формулой (1), можно вычислить внутреннее сопротивление батареи, показанной на рис. 20, а затем, пользуясь формулой (2), — э. д. с. этой батареи. После этого, зная внешнее сопротивление R , можно с помощью закона Ома найти ток I .

Докажем равенства (1) и (2). Пусть несколько источников соединены параллельно и замкнуты на какое-то внешнее сопротивление. Тогда согласно закону Ома

$$\begin{aligned} E_1 - U &= I_1 r_1, \\ E_2 - U &= I_2 r_2, \\ &\dots\dots\dots \\ E_n - U &= I_n r_n, \end{aligned}$$

где U — напряжение на внешней цепи этой батареи. Следовательно, ток во внешней цепи равен

$$I = \sum I_i = \sum \frac{E_i - U}{r_i},$$

т. е.

$$I = \sum \frac{E_i}{r_i} - U \sum \frac{1}{r_i}. \quad (3)$$

Пусть теперь E и r — э. д. с. и внутреннее сопротивление источника, эквивалентного этой батарее. Тогда ток I будет равен

$$I = \frac{E - U}{r} = \frac{E}{r} - U \cdot \frac{1}{r}. \quad (4)$$

Сравнивая равенства (3) и (4), видим, что

$$\frac{E}{r} = \sum \frac{E_i}{r_i}, \quad \frac{1}{r} = \sum \frac{1}{r_i},$$

т. е. мы получили соотношения (1) и (2).

Формулы (1), (2) полезны при решении многих задач, в которых фигурируют параллельно соединенные источники тока.

З а м е ч а н и е. Э. д. с. E , определяемая формулой (2), не равна отношению N/I , где N — полная мощность батареи, а I — протекающий через нее ток. Следовательно, эта э. д. с. не является электродвижущей силой батареи в буквальном смысле слова. Однако, если заменить эту батарею одним источником, э. д. с. которого определяется формулой (2), а внутреннее сопротивление — формулой (1), то токи, протекающие во внешней цепи батареи, останутся прежними, какой бы ни была эта цепь. Таким образом, формулы (1), (2) определяют внутреннее сопротивление и э. д. с. источника, эквивалентного данной батарее. Это обстоятельство позволяет рассматривать E как э. д. с. данной батареи, а r — как ее внутреннее сопротивление.

Б. К решению задачи 62. Может показаться, что полученный ответ противоречит принципу суперпозиции, ибо при замыкании контактов K_1, K_2 ток генерируется одновременно двумя источниками. Но дело в том, что, замыкая контакт K_1 или K_2 , мы не только вводим э. д. с. E_1 или E_2 , но и вводим в рассматриваемую цепь сопротивление r_1 или r_2 . Следовательно, токи I_1, I_2 протекают здесь

в *различных* цепях (хотя это токи, протекающие по одному и тому же участку). Именно поэтому $I \neq I_1 + I_2$.

В применении к данной цепи принцип суперпозиции заключается в следующем. Вообразим, что контакты K_1, K_2 замкнуты и в цепи имеются сопротивления r_1, r_2 , но ток генерируется одной лишь э. д. с. E_1 (т. е. что $E_2 = 0$). Пусть ток, протекающий в этом случае через сопротивление R , равен I' . Вообразим теперь, что ток генерируется одной лишь э. д. с. E_2 (т. е. что $E_1 = 0$). Ток, протекающий при этом через сопротивление R , равен I'' . Тогда согласно принципу суперпозиции $I = I' + I''$.

6. К решению задачи 85. Может возникнуть вопрос: что было бы, если бы электромагнит включался и выключался мгновенно? (Вообразим, что такой электромагнит возможен). Ясно, что звонок в этом случае работать не будет, однако в каком положении будет при этом находиться якорь? Очевидно, он не может быть замкнут, так как, тогда по цепи электромагнита M будет протекать ток и якорь L , притягиваясь к электромагниту, разорвет цепь. Но контакт K не может быть и разомкнут, ибо тогда электромагнит не будет притягивать якорь и пружина S замкнет этот контакт. Каким же будет положение контакта K ? Нетрудно видеть, что контакт будет замкнут, но замкнут лишь «чуть-чуть», т. е. будет прижат к штифту B очень слабо. Вследствие этого в точке касания пластинки K с штифтом B возникнет значительное сопротивление, а ток в цепи якоря будет очень мал. Поэтому сила, притягивающая якорь к электромагниту, тоже будет очень мала, и якорь не сможет разорвать имеющийся слабый контакт.

7. К решению задачи 94. Так как ток I направлен противоположно э. д. с. E_2 , то мощность, развиваемая вторым генератором, отрицательна. Следовательно, он не производит электроэнергию, а потребляет ее, т. е. работает как электродвигатель. При этом э. д. с. E_2 будет электродвижущей силой индукции, возникающей в любом электродвигателе постоянного тока. Она направлена противоположно току, протекающему через электродвигатель, и имеет тенденцию уменьшать этот ток.

СОДЕРЖАНИЕ

ЗАДАЧИ

Электростатика ,	3
Электрический ток	11
Электромагнетизм ,	18

РЕШЕНИЯ

Электростатика ,	25
Электрический ток	39
Электромагнетизм	49
Примечания	59

Борис Юрьевич Коган

Сто задач по электричеству

(Серия: «Библиотечка физико-математической школы»)

М., 1976 г., 64 стр. с илл.

Редактор *Н. А. Райская*

Техн. редактор *Е. В. Морозова*

Корректоры *О. А. Бутусова, Е. Я. Строева*

Сдано в набор 23.03.76. Подписано к печати 13.08.76.
Бумага 84×108¹/₂ тип. № 3. Физ. печ. л. 2. Усл.
печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 2,83. Тираж 300 000 экз.
Цена книги 8 коп. Заказ № 104

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической
литературы

117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинград-
ская типография № 2 имени Евгения Соколовой
Союзполиграфпрома при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
198052, Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29

Цена 8 коп.

