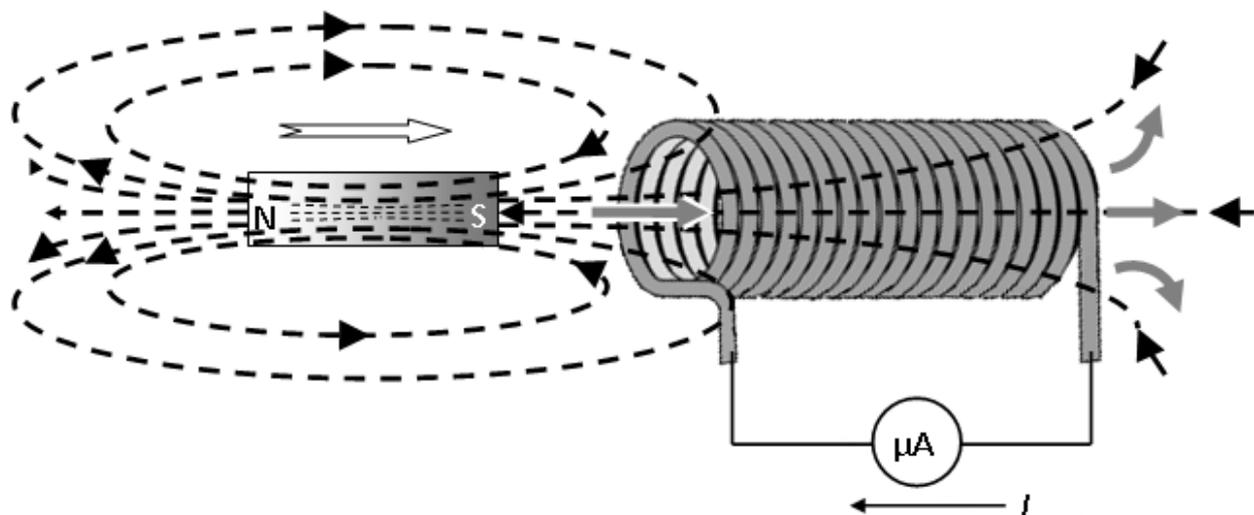


К ЕГЭ ГОТОВ!



Ф И З И К А

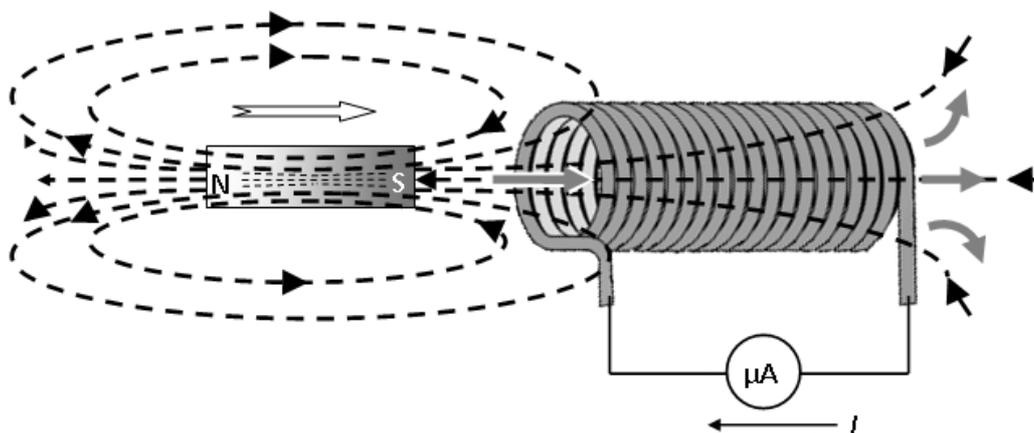
ЧАСТЬ III

Электродинамика

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет  
технологии и дизайна»

О. Н. Урюпин К. О. Урюпина

К ЕГЭ ГОТОВ!



Ф И З И К А

Часть III

Электродинамика

Утверждено Редакционно-издательским советом  
университета в качестве учебного пособия

Санкт-Петербург

2012

УДК 53  
ББК 22.3я73  
У73

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей  
и экспериментальной физики РГПУ им. Герцена

*В. М. Грабов;*

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики СПГУТД

*Е. П. Романова*

**Урюпин, О.Н.**

**У73** К ЕГЭ готов! Физика. Ч. III. Электродинамика: учеб. пособие /  
О. Н. Урюпин, К. О. Урюпина. – СПб.: ФГБОУВПО «СПГУТД», 2012. –  
128 с.

**ISBN 978-5-7937-0791-3**

Данное пособие является третьей частью учебного пособия по физике и адресовано слушателям факультета довузовского образования, абитуриентам и выпускникам школ для подготовки к сдаче Единого государственного экзамена. Оно также может быть полезно студентам технических специальностей 1–2 курсов для проверки уровня остаточных знаний по электродинамике перед изучением соответствующего вузовского курса.

Пособие включает краткое, но емкое изложение теоретических основ электростатики, электродинамики и магнетизма. Кроме того в него включено большое количество практических заданий различного уровня сложности, выстроенных с учетом плавного нарастания умений и навыков, необходимых для их решения, с одной стороны, и с учетом требований Единого государственного экзамена – с другой.

УДК 53

ББК 22.3я73

**ISBN 978-5-7937-0791-3**

© ФГБОУВПО «СПГУТД», 2012

© Урюпин О. Н., 2012

© Урюпина К. О., 2012



# СОДЕРЖАНИЕ

## ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

Введение . . . . .	6
Раздел VI. ЭЛЕКТРОСТАТИКА . . . . .	8
63. Электрический заряд . . . . .	8
64. Закон Кулона . . . . .	10
65. Электрическое поле . . . . .	11
66. Напряженность электрического поля . . . . .	12
67. Силовые линии электрического поля . . . . .	15
68. Работа по перемещению заряда в электрическом поле . . . . .	16
69. Потенциал. Разность потенциалов . . . . .	18
70. Диэлектрики и проводники в электрическом поле . . . . .	21
71. Емкость . . . . .	22
72. Конденсатор . . . . .	23
73. Соединение конденсаторов . . . . .	24
74. Энергия электрического поля . . . . .	27
Раздел VII. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК . . . . .	28
75. Электрический ток . . . . .	28
76. Сила тока . . . . .	29
77. Закон Ома для участка цепи . . . . .	31
78. Электрическое сопротивление . . . . .	32
79. Электродвижущая сила . . . . .	34
80. Закон Ома для полной цепи . . . . .	35
81. Работа и мощность постоянного тока . . . . .	39
Раздел VIII. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ. . . . .	40
82. Электрический ток в металлах . . . . .	40
83. Электрический ток в электролитах . . . . .	41
84. Электрический ток в газах . . . . .	43
85. Электрический ток в вакууме . . . . .	45
86. Электрический ток в полупроводниках . . . . .	48
87. Контакт полупроводников n- и p-типов . . . . .	51

Раздел IX. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ . . . . .	. 53
88. Постоянные магниты . . . . .	. 53
89. Магнитное поле постоянного электрического тока . . . . .	. 55
90. Сила Ампера. . . . .	. 57
91. Сила Лоренца . . . . .	. 58
92. Магнитное поле кругового тока. . . . .	. 59
93. Магнитные свойства вещества . . . . .	. 60
Раздел X. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ. . . . .	. 61
94. Магнитный поток . . . . .	. 61
95. Правило Ленца . . . . .	. 62
96. Закон электромагнитной индукции . . . . .	. 64
97. ЭДС индукции в движущихся проводниках . . . . .	. 66
98. Самоиндукция. Индуктивность . . . . .	. 67
99. Энергия магнитного поля . . . . .	. 68
Раздел XI. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ . . . . .	. 70
100. Закрытый колебательный контур . . . . .	. 70
101. Частота собственных колебаний колебательного контура . . . . .	. 72
102. Вынужденные электромагнитные колебания. . . . .	. 72
103. Реактивное сопротивление . . . . .	. 73
104. Закон Ома для переменных токов . . . . .	. 74
105. Работа и мощность переменного тока . . . . .	. 75
106. Трансформатор . . . . .	. 76
Раздел XII. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ. . . . .	. 77
107. Открытый колебательный контур . . . . .	. 77
108. Распространение электромагнитных волн . . . . .	. 78
109. Принцип радиосвязи . . . . .	. 80
Раздел XIII. ЗАДАЧИ . . . . .	. 83
110. Электрический заряд. Закон Кулона . . . . .	. 83
111. Напряженность электрического поля . . . . .	. 87
112. Потенциал электрического поля. Конденсатор. Энергия плоского конденсатора . . . . .	. 90
113. Электрический ток. Сила тока. Закон Ома для участка цепи . . . . .	. 95
114. Электрическое сопротивление. ЭДС. Закон Ома для полной цепи . . . . .	. 96

115. Работа электрического тока. Закон Джоуля – Ленца	. . .	99
116. Электрический ток в различных средах	. . .	99
117. Магнитное поле	. . .	105
118. Электромагнитная индукция	. . .	109
119. Электромагнитные колебания	. . .	112
120. Электромагнитные волны	. . .	114
121. Задачи повышенного и высокого уровня сложности	. . .	115
122. Справочные данные	. . .	126
123. Ключи к задачам	. . .	127
Заключение.	. . .	128

## ВВЕДЕНИЕ

Данное пособие по электродинамике продолжает издание серии учебных пособий по подготовке к Единому государственному экзамену по физике, ориентированных на изучение физики не только на факультете довузовской подготовки, но и при самоподготовке абитуриентов, а также при повторении и закреплении изученных ранее материалов непосредственно перед экзаменом. Особо полезным данная серия пособий окажется для тех, кто в силу различных причин, не имея достаточной школьной подготовки для сдачи ЕГЭ по физике, должен в сжатые сроки освоить большой объем теоретических знаний и получить необходимые для успешной сдачи экзамена навыки по их практическому применению при решении задач различного уровня сложности. Кроме того, у студентов 1-го и 2-го курсов появляется возможность проверить свои остаточные знания и умения решать физические задачи перед изучением соответствующих разделов вузовского курса по общей физике и восстановить знания по выявленным проблемным разделам.

Деление серии пособий на традиционные части по механике, молекулярной физике и термодинамике, электричеству, оптике и ядерной физике обеспечивает оптимальную последовательность изучения теоретического курса в сочетании с выполнением посильных практических заданий, выстроенных с учетом нарастания сложности. Основным отличием от традиционных аналогичных пособий является постоянное стимулирование учащихся к использованию наблюдений физических процессов и явлений в окружающей действительности для лучшего понимания теоретических основ физики. Для активного включения обучающихся в познавательный процесс авторам представляется необходимым обращение к учащимся о проведении простейших наглядных физических экспериментов в домашних условиях, сопровождаемое ёмкими объяснениями их физической сущности. Комплексный экспериментально-теоретический подход к построению данного курса повышает, по мнению авторов, интерес к изучению физики и является наиболее эффективным в сложившихся экономических реалиях нынешней системы финансирования образования.

Предлагаемое учебное пособие по электродинамике состоит из теоретических разделов и более 300 заданий различного уровня сложности по темам курса физики: электростатика; электрический ток; магнетизм; электромагнитная индукция; электромагнитные колебания и волны. В теоретических разделах кратко, ясным и доступным языком изложены основные физические понятия и законы.

Тестовые задания для развития умений и навыков в решении физических задач структурированы и выстроены с учетом непрерывного плавного повышения трудности. Каждое задание предполагает выбор правильного ответа из 4-х предлагаемых, что полностью соответствует государственным

стандартам. Оригинальное построение заданий, по мнению авторов, должно способствовать сохранению длительного интереса учащихся к решению физических задач. При включении графических заданий авторами использовался ступенчатый подход постепенного усложнения при необходимости использования результатов решения предыдущего задания для выполнения последующего. Тестовые задания целесообразно выполнять параллельно с изучением теоретических вопросов с целью оперативно применять полученные теоретические знания на практике и быстро выявлять возможные пробелы в знаниях.

Задачи повышенного и высокого уровня сложности выделены в отдельный раздел пособия. Такие задания являются преимущественно комплексными физическими задачами, для решения которых требуется освоение нескольких разделов электродинамики и магнетизма. Поэтому такие задания следует выполнять по окончании изучения теоретических разделов и выполнения тестовых заданий, когда учащиеся приобретают устойчивые навыки в решении базовых физических задач и оказываются подготовленными к качественному переходу на более высокий уровень освоения умений и навыков в анализе физических процессов и решении задач повышенного и высокого уровня сложности.

Требуемые для решения задач физические константы и величины сведены в таблицы, дополнены некоторыми полезными сведениями и приведены в конце сборника. Умение пользоваться этим разделом для поиска требуемых физических констант и величин является необходимым условием успешной подготовки к Единому государственному экзамену и последующему освоению курса общей физики в университете.

Авторы надеются, что данное пособие окажется интересным и полезным не только для учащихся, но и для широкого круга любителей физики.

## Раздел VI. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

### Электрический заряд

Изучение электродинамики – науки о свойствах и закономерностях поведения особого вида материи – электромагнитного поля мы начнем с раздела электростатики. Из основных положений молекулярно-кинетической теории Вы знаете, что вещество состоит из частиц – молекул, атомов, элементарных частиц. Теперь пришло время познакомиться с новой характеристикой таких частиц – электрическим зарядом.

**Электрический заряд – это величина, определяющая интенсивность электромагнитного взаимодействия.** Наличие электрического заряда ведет к появлению взаимодействия между частицами с силами, медленно уменьшающимися с увеличением расстояния между частицами, но значительно превосходящими силы тяготения.

В природе существуют частицы с электрическими зарядами противоположных знаков: **протон имеет положительный заряд ( $p^+$ )**, а **электрон – отрицательный ( $e^-$ )**. Кроме того, существуют частицы, не имеющие электрического заряда, к примеру – нейтрон ( $n^0$ ). В зависимости от соотношения количества частиц ( $p^+$ ) и ( $e^-$ ) в веществе, тело может иметь тот или иной знак электрического заряда, или быть электрически нейтральным. Большинство тел в обычном состоянии являются электрически нейтральными, так как имеют одинаковое количество заряженных частиц противоположных знаков.

Для придания электрического заряда телу, его необходимо наэлектризовать, т. е. провести электризацию. Существуют **два основных способа электризации**: а) **трением** и б) **через влияние**. Рассмотрим их подробнее.

а) Если стекло потереть бумагой, то между стеклом и бумагой **произойдет перераспределение электрических зарядов**. Обратите внимание – не возникновение зарядов, а лишь их перераспределение между этими телами так, что стекло окажется заряженным положительно (+), а бумага – отрицательно (-). Общий же суммарный заряд стекла и бумаги останется неизменным и, если оба тела были до электризации незаряженными, то суммарный заряд останется равным нулю.

Если пластмассу потереть мехом (или шерстью), то электрические заряды также перераспределятся, и пластмасса зарядится отрицательно (-), а мех – положительно (+).

В обоих описанных примерах, которые вы с легкостью можете воспроизвести у себя дома, из тела, приобретающего положительный электрический заряд (+), электроны переходят на тело, которое приобретает отрицательный заряд (-). При этом протоны и нейтроны никуда не переходят,

а остаются в том теле, в котором они находились до электризации. Поэтому после электризации отрицательно заряженное тело становится слегка тяжелее, а положительно заряженное – чуть легче на массу «сбежавших» электронов.

б) Нарвите незаряженную бумагу на мелкие кусочки, положите их на стол и плавно сверху приближайте к ним наэлектризованную отрицательно пластмассовую линейку. Вы увидите, как кусочки бумаги приподнимаются и затем прилипают к линейке, совершая работу против силы тяжести. Затем аккуратно наэлектризуйте положительно кусочек стекла (только не порежьтесь!) и проведите эксперимент со стеклом. Кусочки бумаги будут вести себя так же, как и с линейкой. Почему это происходит?

Дело в том, что электрические заряды взаимодействуют между собой. Заряды одного знака отталкиваются:

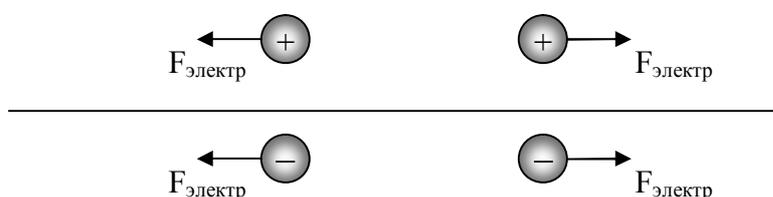


Рис. 1. Взаимодействие одноименных зарядов

Заряды разных знаков притягиваются между собой:

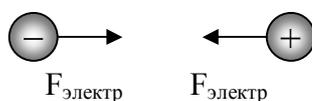


Рис. 2. Взаимодействие разноименных зарядов

Но ведь кусочки бумаги не заряжены! Почему же они притягиваются в обоих случаях?

Когда мы подносим пластмассовую линейку, то отрицательные заряды на кусочках бумаги перемещаются так, чтобы отодвинуться как можно дальше от линейки, т. е. ближний к линейке край бумажек имеет избыточный положительный заряд. А так как силы электрического взаимодействия убывают с расстоянием, то ближний край бумажек притягивается к линейке сильнее, чем отталкивается дальний, на котором оказывается избыток отрицательных зарядов. Следовательно, результирующая электрическая сила взаимодействия заряженного и незаряженного тела направлена на притяжение суммарно незаряженных тел.

Теперь Вы сами можете разобраться, что происходит с зарядами в эксперименте со стеклом, а нам пора сформулировать **закон сохранения электрического заряда**:

**В замкнутой (изолированной) системе тел при любых перераспределениях электрических зарядов их сумма остается неизменной.**

Учитывая, что электрический заряд принято обозначать буквой  $q$ , можно записать закон так:  $q_1 + q_2 + \dots + q_n = \sum_{i=1}^n q_i = \text{const.}$  (1)

Все задачи на электризацию тел необходимо анализировать на основании вышесказанного, тогда Вам непременно удастся избежать ошибок.

### Закон Кулона

Мы уже говорили о зависимости электрических сил от расстояния между зарядами, теперь пришло время сформулировать строгий закон о величине силы взаимодействия двух точечных зарядов: она прямо пропорциональна произведению величин зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

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

где  $q_1$  и  $q_2$  – точечные электрические заряды;  $F$  – сила взаимодействия электрических зарядов  $q_1$  и  $q_2$ ;  $r$  – расстояние между зарядами  $q_1$  и  $q_2$ ;

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \text{ – коэффициент пропорциональности в системе}$$

Си;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой происходит взаимодействие зарядов (для вакуума  $\epsilon = 1$ , для воздуха  $\epsilon \approx 1$ ).

Разберем написанное. Во-первых, этот закон (2) носит название закон Кулона. Во-вторых, он справедлив только для двух неподвижных точечных электрических зарядов, т. е. для материальных точек, обладающих электрическим зарядом. Это связано с тем, что между двумя точками расстояние  $r$  всегда четко определено и равно кратчайшему расстоянию между ними. При решении физических задач, по аналогии с законами механики, закон Кулона можно применять, если размеры заряженных взаимодействующих тел значительно меньше, чем расстояние между ними. В-третьих, закон Кулона определяет только величину сил взаимодействия и ничего не говорит о направлении этих сил. Направление сил взаимодействия определяется в соответствии с *рис. 1–2*, при этом всегда выполняется условие, показывающее, что на взаимодействующие заряды действуют равные по величине, но противоположные по знаку силы:

$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}. \quad (3)$$

А что делать, если взаимодействуют не два, а три или более точечных заряда? Как быть тогда? В этом случае, изображенном на *рис. 3*, силы взаимодействия по закону Кулона определяются для каждой пары в

отдельности, а затем по правилу параллелограмма находится равнодействующая сила, приложенная к каждому заряду.

Разберем обозначения, представленные на *рис. 3* на примере первого заряда  $q_1$ . На него действуют силы  $\vec{F}_{1,2}$  – сила, действующая на первый заряд  $q_1$  со стороны второго заряда  $q_2$  и  $\vec{F}_{1,3}$  – сила, действующая на первый заряд  $q_1$  со стороны третьего заряда  $q_3$ . Так как сам заряд  $q_1$  отрицательный, а заряды  $q_2$  и  $q_3$  – положительные, то первый заряд притягивается одновременно и ко второму и к третьему зарядам.

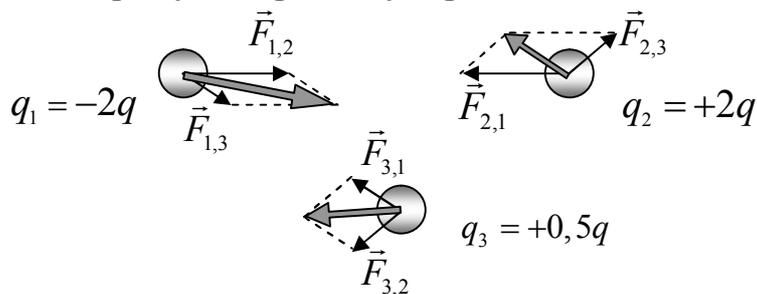


Рис. 3. Взаимодействие трех зарядов

Силы  $\vec{F}_{1,2}$  и  $\vec{F}_{1,3}$  – вектора и складываются по правилу параллелограмма. В результате сложения мы получаем вектор равнодействующей силы, изображенный широкой серой стрелкой и действующий на первый заряд  $q_1$ . Напомню, что равнодействующая – это не какая-то третья сила, действующая на заряд, а сила, заменяющая слагаемые и показывающая суммарное воздействие других зарядов на  $q_1$ . В задачах по электростатике все заряды неподвижны, величины сил  $\vec{F}_{1,2}$  и  $\vec{F}_{1,3}$  определяются по уравнению (2), а расстояния и силы взаимодействия зарядов не изменяются со временем, поэтому и равнодействующая сила будет неизменна в таких задачах.

Теперь аналогичным образом самостоятельно разберите силы, действующие на второй и третий заряды, после чего приступайте к выполнению заданий на закон Кулона. Только учтите, что если в задачах перед величиной заряда нет никакого знака, то он считается положительным.

А какими могут быть величины зарядов, и в каких единицах они измеряются? В системе Си заряды измеряются в Кулонах, краткое обозначение – Кл. Наименьшим электрическим зарядом считается **элементарный заряд** – заряд протона и заряд электрона.

Заряд протона  $p^+ = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, а заряд электрона  $e^- = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

### Электрическое поле

Вернемся к нашему эксперименту с пластмассовой линейкой и мелкими бумажками. Когда Вы плавно подносили наэлектризованную линейку к кучке бумажек, последние начинали приподниматься еще до соприкосновения с

линейкой. Что же получается? Воздействие электрических зарядов происходит на расстоянии, без непосредственного контакта? Да, и в этом нет ничего удивительного. Вы же не удивляетесь, когда выроненная монетка падает на Землю, – а ведь она также притягивается к ней без непосредственного контакта. И в том и в другом случае говорят о наличии силового поля – вокруг Земли – гравитационного, а вокруг электрических зарядов – электрического.

Что же такое электрическое поле? Оказывается, определить это совсем не просто, потому что электрическое поле нельзя определить через ранее известные понятия, оно не сводится к более простым вещам. В таких случаях ученые ограничиваются простым описанием явления или предмета. Итак, электрическое поле:

1. Материально – оно существует независимо от нас, от наших знаний о нем.
2. Обладает определенными специфическими свойствами, к изучению которых мы вскоре и приступим. Установление этих свойств и сформирует наши представления об электрическом поле.
3. С главным свойством электрического поля – действием его на электрические заряды с некоторой силой, мы уже частично познакомились.
4. Электрическое поле неподвижных зарядов потенциально, называется электростатическим и неразрывно связано с создающими его зарядами.

### Напряженность электрического поля

Продолжим изучение свойств электростатического поля с силовой характеристики – напряженности электрического поля. Напряженность поля можно определить в любой точке пространства. Для этого достаточно измерить силу, с которой электрическое поле действует на единичный точечный электрический заряд. Единичный заряд – это заряд  $q_0 = 1$  Кл. А если нет под рукой единичного заряда, как быть тогда? Тогда для определения напряженности поля силу воздействия на заряд надо разделить на значение вносимого пробного заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_q}{q}, \quad \left[ \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \right], \quad (4)$$

где  $\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля;  $\vec{F}_q$  – сила, с которой электрическое поле воздействует на внесенный заряд  $q$ ;  $\left[ \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \right]$  – единицы измерения напряженности электрического поля.

Из уравнения (4) видно, что вектор напряженности совпадает с вектором силы, действующей на внесенный положительного заряда, и противоположен вектору силы, если в поле вносят отрицательный заряд.

$$\vec{E} \uparrow\uparrow \vec{F}_{q>0}, \quad (5)$$

$$\vec{E} \uparrow\downarrow \vec{F}_{q<0}. \quad (6)$$

Если же по условиям задачи известна напряженность поля и требуется определить действующую на заряд силу, то необходимо (4) преобразовать:

$$\vec{F}_q = q\vec{E}. \quad (7)$$

Мы ввели общее понятие напряженности электрического поля, а можно ли что-то более конкретное сказать о **напряженности точечного заряда**? Для этого достаточно рассмотреть систему уравнений (2) и (7) для случая, когда  $q_2$  – заряд, вносимый в электрическое поле, созданное зарядом  $q_1$ :

$$\left. \begin{array}{l} \vec{E}_{q_1} = \frac{\vec{F}_{q_2}}{q_2} \\ F_{q_2} = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2} \end{array} \right\} \Rightarrow E_{q_1} = k \frac{|q_1|}{\epsilon r^2}. \quad (8)$$

Уравнение (8) позволяет вычислить напряженность электрического поля, создаваемого зарядом  $q_1$  в любой точке пространства. Из этого уравнения видно, что напряженность поля убывает при удалении от создающего это поле электрического заряда обратно пропорционально квадрату расстояния

$E \sim \frac{1}{r^2}$ , а график такой зависимости представлен на *рис. 4*.

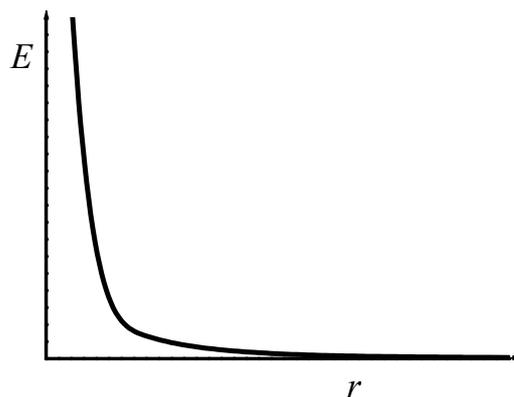


Рис. 4. Изменение напряженности электрического поля  $E$ , создаваемого точечным зарядом, в зависимости от расстояния до точки измерения  $r$

А как определить напряженность электрического поля в точке пространства, вблизи которой расположены два разных заряда  $q_1$  и  $q_3$ ? Попробуем найти суммарную напряженность поля в точке  $(\bullet)A$  при расположении зарядов  $q_1$  и  $q_3$  в ситуации, показанной на *рис. 5*.

Для начала используем знания, приобретенные при анализе *рис. 3*. Ведь согласно (4)  $\vec{E} \sim \vec{F}$ , только для определения направления необходимо учесть условия (5) и (6). Расстояние  $r_1$  – это расстояние между точкой расположения заряда  $q_1$  и  $(\bullet)A$  (*рис. 5*), а  $r_3$  – соответственно между  $q_3$  и  $(\bullet)A$ . Величины напряженности  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_3$  можно определить по уравнению (8). Направление напряженностей  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_3$  иллюстрирует общий принцип построения вектора напряженности для электрического поля точечного заряда. Если заряд положительный ( $q_3$ ), то вектор напряженности ( $\vec{E}_3$ ) направлен вдоль  $r$  от заряда, создающего данную напряженность. Если заряд отрицательный ( $q_1$ ), то вектор напряженности поля ( $\vec{E}_1$ ) направлен вдоль  $r$  к самому заряду. Оба эти условия справедливы, независимо от положения точки  $(\bullet)A$  – справа или слева, сверху или снизу относительно заряда она будет находиться.

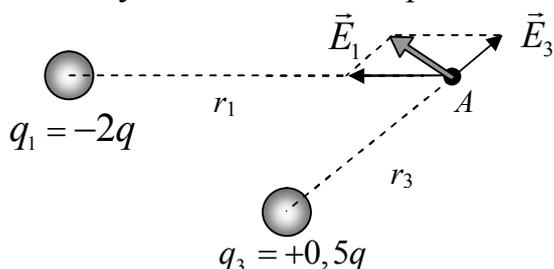


Рис. 5. Напряженность поля, создаваемого зарядами  $q_1$  и  $q_3$  в точке расположения заряда  $q_2$

Из *рис. 5* видно, что напряженности, так же как и силы, складываются векторно, и результирующая напряженность поля показана широкой серой стрелкой. Следовательно, электрические поля, сколько бы источников поля не оказалось поблизости, подчиняются принципу суперпозиции (векторного сложения):

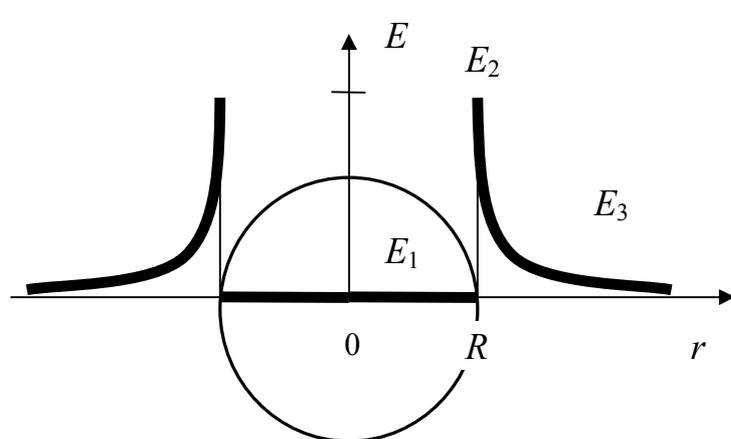
$$\vec{E}_{\text{результующая}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i. \quad (9)$$

Если у Вас в задаче имеется не точечное, а пространственное электрически заряженное тело, то его можно представить как набор точечных зарядов и, используя правило суперпозиции, определить результирующую напряженность в той или иной точке пространства. Для примера приведем результат такого рассмотрения для заряженного по поверхности зарядом  $q$

однородного шара. Изменение напряженности электрического поля, создаваемого поверхностными зарядами, показано на *рис. 6*.

По вертикальной оси отложены значения напряженности электрического поля, по горизонтальной – расстояние от центра заряженного по поверхности шара. Видно, что внутри такого шара результирующая напряженность равна нулю, а снаружи описывается уравнением для точечного заряда при его расположении в центре шара.

Заканчивая знакомство с вектором напряженности, следует запомнить, что реально в каждой точке пространства существует только один вектор напряженности электрического поля – результирующий вектор  $\vec{E}$  результирующая. Именно он определяет силу, действующую на заряд, оказавшийся в данной точке.



Внутри шара ( $r < R$ )  
 $E_1 = 0$ .

На поверхности шара ( $r = R$ )

$$E_2 = k \cdot \frac{|q_{\text{шара}}|}{\varepsilon R^2}.$$

Вне шара ( $r > R$ )

$$E_3 = k \cdot \frac{|q_{\text{шара}}|}{\varepsilon r^2}.$$

Рис. 6. Напряженность электрического поля вокруг поверхностно заряженного шара

### Силовые линии электрического поля

Для графического изображения электрических полей используются силовые линии (линии напряженности). Силовые линии проводят с учетом следующих факторов:

- а) это воображаемые линии, в природе их не существует;
- б) их строят выводя из положительных зарядов ( $q_+$ ) и заканчивая на отрицательных зарядах ( $q_-$ ), поэтому линии никогда не замыкаются;
- в) они непрерывны от начала и до конца;
- г) строятся так, чтобы вектор напряженности  $\vec{E}$  в каждой точке этих линий являлся бы касательной к ним;
- д) густота силовых линий характеризует величину напряженности электрического поля.

Варианты построения силовых линий для различных случаев приведены на *рис. 7*.

На *рис. 7, а* приведены примеры построения силовых линий для изображения электрических полей вокруг положительно и отрицательно заряженных тел малых размеров. Видно, что силовые линии выходят из положительно заряженного тела и входят в отрицательно заряженное. На *рис. 7, б* представлены силовые линии электрического поля, образуемого двумя заряженными плоскими пластинами. Видно, что силовые линии непрерывны, начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных. Кроме того, можно выделить две области, в которых плотность силовых линий ведет себя по-разному. В области 1 плотность силовых линий одинакова в любой точке, поэтому электрическое поле однородно, а вектор напряженности сохраняет постоянную величину и направление. В области 2 плотность силовых линий в среднем меньше, чем в области 1, и неодинакова в различных ее точках, поэтому вектор напряженности принимает различные значения в этой области. Значит, электрическое поле во второй области неоднородно. Имеется строгий критерий неоднородности поля – если силовые линии искривлены, то электрическое поле обязательно неоднородно. Однако неоднородным поле может быть и при прямолинейных линиях напряженности (*рис. 7, а*) в случае их неравномерного распределения.

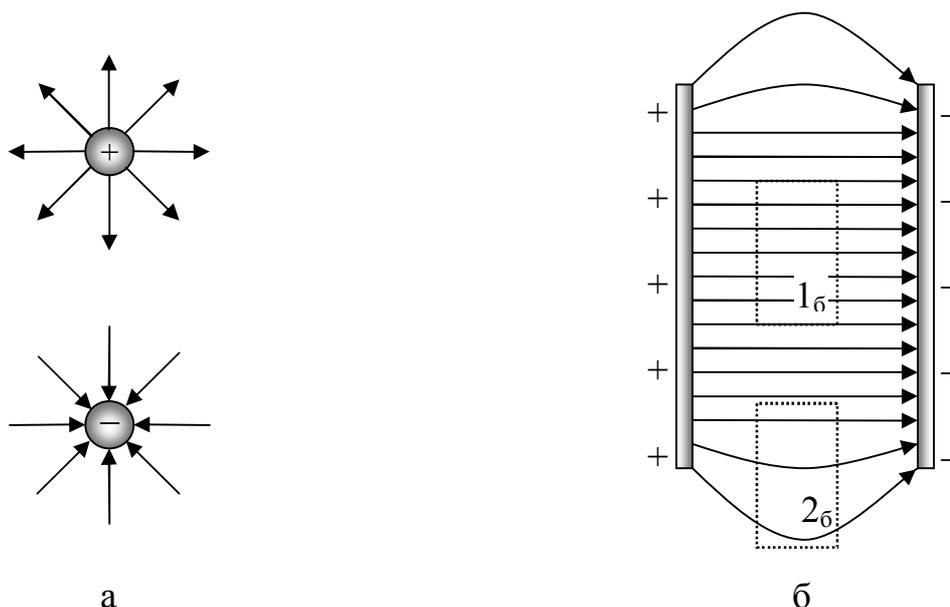


Рис. 7. Построение силовых линий для различных случаев неоднородных (а), (2<sub>б</sub>) и однородных (1<sub>б</sub>) электрических полей

### Работа по перемещению заряда в электрическом поле

Вспомним еще раз эксперимент с заряженной линейкой и кучкой мелких бумажек. Что происходило с бумажками при приближении зарядов, расположенных на поверхности линейки? Они приподнимались,

следовательно, с физической точки зрения что-то (или кто-то) совершал работу по перемещению бумажек. Незаряженная линейка такое действие не производила, значит, указанную работу совершало электрическое поле зарядов (ведь сами заряды бумажек не касались!). Можно утверждать, что электрическое поле способно совершать работу по перемещению. Но что же перемещает электрическое поле? Вспомним объяснение, приведенное после *рис. 2*: «Когда мы подносим пластмассовую линейку, то отрицательные заряды на кусочках бумаги перемещаются так, чтобы отодвинуться как можно дальше от линейки...». Вот Вам и ответ на вопрос – электрическое поле перемещает электрические заряды, следовательно, заряды, расположенные в электрическом поле, обладают потенциальной энергией. Не зря же, отмечая свойства электрического поля, мы говорили, что оно потенциально!

Рассмотрим случай перемещения заряда в однородном электрическом поле (*рис. 8*). Поместим положительный заряд в  $(\bullet)A$  однородного поля. Пусть под действием поля заряд переместится в  $(\bullet)B$  (ведь он отталкивается от положительно заряженной пластины). За начало отсчета выберем отрицательно заряженную пластину, тогда работу поля по перемещению заряда можно записать в соответствии с законами механики, как

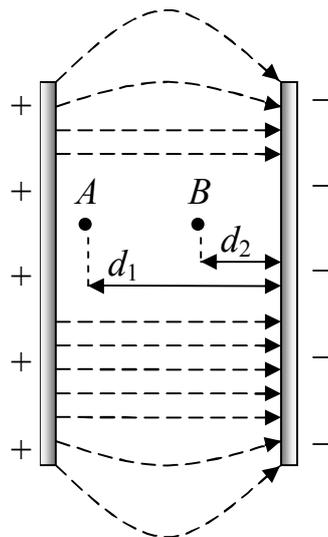


Рис. 8. Перемещение положительного электрического заряда в электрическом поле из  $(\bullet)A$  в  $(\bullet)B$

$A = \vec{F} \cdot \Delta d$ , только сила эта имеет электрическое происхождение:  $\vec{F} = q\vec{E}$ . Тогда, с учетом совпадения направления силы и перемещения:

$$A = -(qEd_2 - qEd_1) = -W_{II2} + W_{III} \Rightarrow W_{II} = qEd. \quad (10)$$

Мы получили выражение (10) для потенциальной энергии, которой обладает электрический заряд во внешнем (не им созданном) электрическом поле. Однако физический смысл имеет не сама потенциальная энергия заряда  $W_{\Pi}$ , а изменение потенциальной энергии  $\Delta W_{\Pi} = A_{\text{поля}}$ , равное работе поля по перемещению заряда из начального положения в конечное. Это связано с тем, что абсолютное значение потенциальной энергии относительно и определяется выбором нулевого уровня, а само изменение потенциальной энергии абсолютно, и от выбора нулевого уровня не зависит. Единица измерения и энергии и работы такие же, как в механике – Джоуль.

Что еще следует знать о работе поля? Работа по перемещению заряда, исходя из (10), не зависит от формы траектории движения заряда, а определяется его начальным и конечным положением. При этом если траектория оказывается замкнутой, то  $d_2 = d_1$  и работа поля равна нулю  $A_{\text{поля}} = 0$ .

### Потенциал. Разность потенциалов

С потенциальной энергией заряда в электрическом поле мы разобрались и можем сравнить эти характеристики у различных зарядов, но для характеристики самого внешнего поля введем понятие потенциала (обозначается буквой  $\varphi$ ) как отношение потенциальной энергии заряда к величине самого заряда:

$$\varphi = \frac{W_{\Pi}}{q}. \quad (11)$$

Исходя из выражения (11) определим потенциал как потенциальную энергию единичного положительного заряда  $q_0$  в данной точке внешнего электрического поля. Теперь, исходя из (11), можно записать потенциальную энергию заряда как

$$W_{\Pi} = q\varphi. \quad (12)$$

В отличие от вектора напряженности электрического поля, представляющего его силовую характеристику, потенциал – скаляр, выражающий энергетический параметр поля. А теперь запишем работу поля (10) через потенциалы начальной точки  $(\bullet)A (\varphi_1)$  и конечной точки  $(\bullet)B (\varphi_2)$ :

$$A = -W_{\Pi 2} + W_{\Pi 1} = -q\varphi_2 + q\varphi_1 = -q(\varphi_2 - \varphi_1) \Rightarrow A = -q\Delta\varphi. \quad (13)$$

Так как под разностью потенциалов, обозначаемой  $U$ , понимают разность значений потенциала в начальной и конечной точках расположения переносимого заряда, то  $U = \varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi$ , и, подставляя этот результат в (13), получим

$$A = qU. \quad (14)$$

Следовательно, работа по перемещению заряда во внешнем электрическом поле равна произведению величины этого заряда на разность потенциалов, которую часто называют напряжением.

Что же такое напряжение, и в каких единицах измеряется? Напряжение равно работе поля по перемещению единичного положительного заряда из начальной точки в конечную:

$$U = \frac{A}{q} \quad (15)$$

и измеряется в вольтах [В]. Значит, и потенциал  $\varphi$  тоже измеряется в вольтах и  $1\text{В} = 1\text{Дж/Кл}$ .

Теперь определим связь между потенциалом и напряженностью поля, рассмотрев систему из (10) и (12) уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} W_{\text{П}} = qEd \\ W_{\text{П}} = q\varphi \end{array} \right\} \Rightarrow \varphi = Ed \Rightarrow E = \frac{\varphi}{d}, \quad \left[ \frac{\text{В}}{\text{м}} \right]. \quad (16)$$

Данное выражение, напомню, получено для однородного электрического поля. Выражение для потенциала точечного заряда из уравнений (8) и (16) постарайтесь вывести сами. У Вас должно получиться:

$$\varphi = k \frac{q}{\varepsilon r}. \quad (17)$$

Для графического представления потенциала часто используют эквипотенциальные поверхности, которые на плоскости изображаются линиями. Такая поверхность или линия образуется точками, в которых электрическое поле имеет одинаковый потенциал, т. е. на эквипотенциальной поверхности  $\varphi = \text{const}$  и определяется величиной заряда  $\varphi \sim q$ , расстоянием до него  $\varphi \sim \frac{1}{r}$  и относительной диэлектрической проницаемостью  $\varphi \sim \frac{1}{\varepsilon}$  (см. (17)). На *рис. 9* приведены несколько примеров эквипотенциальных поверхностей.

Пунктирными линиями на этом рисунке обозначены линии напряженности, а сплошными – эквипотенциальные поверхности. На всех рисунках в любом месте можно убедиться, что эквипотенциальные поверхности при пересечении с линиями напряженности всегда им перпендикулярны. Это неизменное и необходимое условие нахождения и правильного построения эквипотенциальных поверхностей. Кроме того, в однородном поле эквипотенциальные поверхности представляются на плоском рисунке, как серия прямых линий, а при неоднородном поле такие поверхности представляются на плоском рисунке, как серия обязательно изогнутых линий. Вокруг точечных зарядов эквипотенциальные поверхности

образуют ряд concentрических сфер, которые на рисунке изображены concentрическими кругами. Не надо думать, что вокруг зарядов всего две эквипотенциальные поверхности, как это изображено на рисунке, таких поверхностей бесконечное множество, и все изобразить невозможно. Но каждая такая поверхность имеет свое значение потенциала  $\varphi$ .

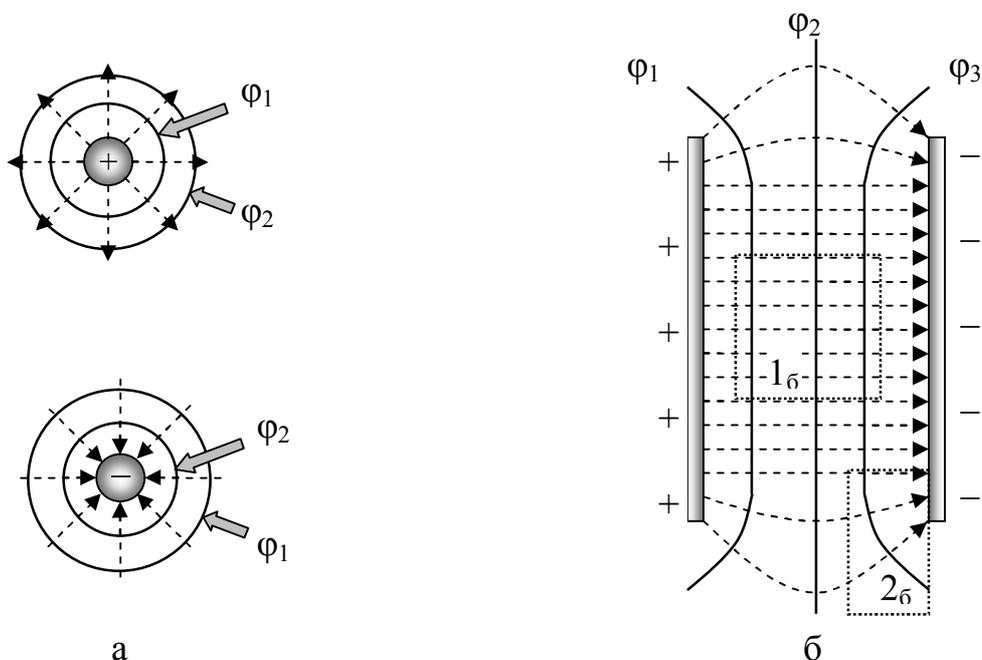


Рис. 9. Эквипотенциальные поверхности для различных случаев неоднородных (а), (2б) и однородных (1б) электрических полей

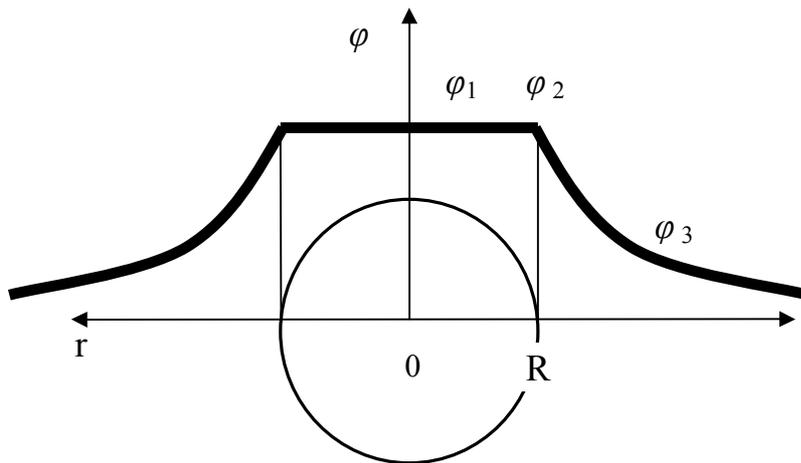
На рис. 9 номера потенциалов расставлены в порядке убывания, т. е.  $\varphi_1 > \varphi_2 > \varphi_3$ . Значит, по мере удаления от положительного заряда потенциал убывает, и по мере приближения к отрицательному заряду он убывает так же. Кроме того, можно сказать, что напряженность поля направлена в сторону убывания потенциала.

Какую же работу совершает поле при перемещении заряда по эквипотенциальной поверхности? А никакой! Ведь потенциал не меняется, даже если заряд непрерывно скользит вдоль эквипотенциальной поверхности, поэтому и работа поля равна нулю.

На рис. 10 приведен пример изменения потенциала электрического поля вокруг поверхностно заряженного шара.

Сравним изменение потенциала с изменением напряженности поля, представленного для этого случая на рис. 6. Видно, что напряженность внутри шара равна нулю, а потенциал – постоянная конечная величина. Вне шара, по мере удаления от него, потенциал уменьшается медленнее, чем

напряженность, так как  $\varphi \sim \frac{1}{r}$ , а  $E \sim \frac{1}{r^2}$ . При решении физических задач часто необходимо выбрать начало отсчета величины потенциала – точку в пространстве с нулевым потенциалом  $\varphi_0 = 0$ . Этот выбор определяется простотой и удобством при решении задачи. В соответствии с (17) можно выбрать бесконечно удаленную от заряда точку, но чаще всего за  $\varphi_0 = 0$  принимается потенциал Земной поверхности.



Внутри шара ( $r < R$ ) и на поверхности шара ( $r = R$ ), т. е. при  $r \leq R$

$$\varphi_1 = \varphi_2 = k \frac{q}{\varepsilon R}.$$

Вне шара ( $r > R$ )

$$\varphi_3 = k \frac{q}{\varepsilon r}.$$

Рис. 10. Потенциал электрического поля вокруг поверхностно положительно заряженного шара

### Диэлектрики и проводники в электрическом поле

Диэлектрики – материалы, в которых все электрические заряды связаны с атомами и молекулами, поэтому не могут под действием внешнего электрического поля перемещаться внутри материала и менять своё местоположение. Однако в таких материалах нейтральные молекулы и атомы под действием поля деформируются, поляризуются, превращаются в диполи и ориентируются вдоль приложенного электрического поля. (Заметим, что диполь – это частица, имеющая на противоположных концах различные знаки одинаковых по величине электрических зарядов ( $+q$  и  $-q$ ), которые суммарно могут нейтрализовать друг друга ( $+q + (-q) = 0$ ) при снятии внешнего поля. Такие заряды называют связанными.) Возникает собственное электрическое поле внутри диэлектрика  $E_d$ , которое направлено противоположно внешнему, и ослабляет его:  $\vec{E}_{\text{результатирующая}} = \vec{E}_{\text{внешнее}} + \vec{E}_{\text{самого диэлектрика}} \Rightarrow E_p = E_B - E_{\text{сд}}$ .  
Отношение  $\frac{E_B}{E_p} = \varepsilon$  и является диэлектрической проницаемостью среды – параметром, указывающим, во сколько раз ослабляется внешнее

электрическое поле в данном диэлектрике по сравнению с вакуумом. Этот параметр не может быть меньше единицы  $\epsilon \geq 1$ .

В проводниках картина принципиально иная. Проводники – материалы, в которых обязательно существуют носители заряда, имеющие возможность свободно перемещаться под действием внешнего электрического поля. Это приводит проводник, попавший под влияние поля, в наэлектризованное состояние, при котором свободные заряды перемещаются внутри проводника под действием внешнего поля до тех пор, пока суммарное электрическое поле, создаваемое перемещенными свободными зарядами не компенсирует внешнее поле внутри проводника:  $\vec{E}_{\text{результатирующая}} = \vec{E}_{\text{внешнее}} + \vec{E}_{\text{самого проводника}} \Rightarrow E_{\text{P}} = E_{\text{B}} - E_{\text{СП}} = 0$ . Следовательно, внутри проводника электрическое поле отсутствует, независимо от того, есть вокруг внешнее поле, или его нет. На этом, кстати, основан принцип «экранирования» приборов от внешних электрических помех.

### Електроёмкость

Теперь, разобравшись в особенностях поведения диэлектриков и проводников в электрическом поле, разберём способность этих тел запасать электрический заряд. В соответствии с (17) при увеличении электрического заряда, находящегося на проводнике потенциал растёт пропорционально заряду  $\varphi \sim q$ , следовательно, отношение  $\frac{q}{\varphi} = \text{const}$  и не меняется в процессе зарядки проводника (при увеличении заряда на проводнике). Это отношение назвали электроёмкостью и обозначили  $C$ :

$$C = \frac{q}{\varphi}, \quad (18)$$

которая измеряется в Фарадах (обозначается  $\Phi$ ). 1 $\Phi$  – это очень большая электроёмкость, поэтому часто электроёмкость обозначают в кратных единицах – мк $\Phi$  ( $=10^{-6}$   $\Phi$ ), п $\Phi$  ( $=10^{-12}$   $\Phi$ ) и т. п. Получается, что электроёмкость – это физическая величина, численно равная заряду проводника, изменяющему потенциал этого проводника на 1В. Она зависит только от геометрических размеров проводника, его формы, пространственного расположения и диэлектрической проницаемости среды, в которой проводник находится. От материала проводника и его агрегатного состояния электроёмкость не зависит. К примеру, ёмкость уединенного проводящего шара равна

$$C = \frac{\epsilon R}{k}. \quad (19)$$

Как видно из уравнения (19), электроёмкость уединенного шара определяется только его радиусом и диэлектрической проницаемостью среды, в которую шар погружен. При переносе шара из одной среды в другую его

электроёмкость изменится, так при переносе шара из воздуха в воду его электроёмкость при комнатной температуре возрастет примерно в 80 раз ( $\epsilon_{H_2O} \approx 80$ ).

### Конденсатор

Однако для запасания зарядов используют не отдельные проводники, а пары проводников. Два проводника, разделенные слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников, называют конденсатором. При этом сами проводники носят название обкладки конденсатора. На *рис. 11* представлены два вида конденсаторов – цилиндрический (а) и плоский (б).

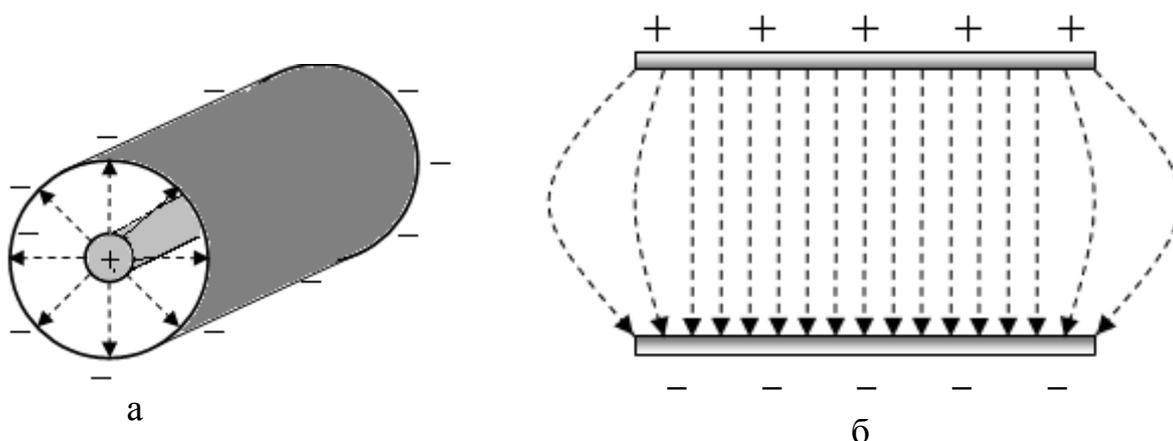


Рис. 11. Цилиндрический (а) и плоский (б) конденсаторы

Из *рис. 11* видно, что практически все электрическое поле сосредоточено внутри конденсаторов и их электроёмкость определяется как отношение запасенного заряда к разности потенциалов между обкладками конденсатора (19). Только следует всегда помнить, что под зарядом конденсатора понимают заряд только одной обкладки конденсатора, так как они всегда равны и противоположны по знаку. Если же брать суммарный заряд обоих обкладок конденсатора, то он всегда равен нулю.

$$C = \frac{q}{U}. \quad (20)$$

Рассмотрим более подробно электроёмкость плоского конденсатора. Для начала введем понятие поверхностной плотности электрического заряда  $\sigma$  как отношение заряда на пластине к площади ее поверхности:

$$\sigma = \frac{q}{S}. \quad (21)$$

Так как размеры пластин и заряды на них одинаковы по величине, то напряженность поля внутри конденсатора для положительно заряженной и

отрицательно заряженной пластин совпадают, поэтому напряженность поля внутри конденсатора является суммой напряженностей, создаваемых каждой из пластин (конечное выражение в этой строке в пособии не выводится):

$$\vec{E}_{\text{конденсатора}} = \vec{E}_{+\text{ пластины}} + \vec{E}_{-\text{ пластины}} = E_{+} + E_{-} \Rightarrow 2E_{\text{одной пластины}} = k \frac{4\pi\sigma}{\varepsilon}.$$

Учитывая (21) и что  $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ , получим  $E_{\text{конденсатора}} = \frac{q}{\varepsilon_0\varepsilon S}$ . Обозначим

расстояние между обкладками конденсатора за  $d$ , тогда напряжение на конденсаторе можно выразить как  $U = Ed = \frac{qd}{\varepsilon_0\varepsilon S}$ . Используя выражение (20),

получаем искомый результат:

$$C = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d}. \quad (22)$$

Анализируя уравнение (22) можно сделать следующие выводы:

- а) электроёмкость конденсатора не зависит от материала обкладок;
- б) с увеличением площади обкладок электроёмкость растёт;
- в) с увеличением расстояния между обкладками электроёмкость падает;
- г) с увеличением диэлектрической проницаемости зазора между обкладок электроёмкость растёт.

Теперь на вопрос о том, какими параметрами должен обладать наилучший конденсатор, вы, надеюсь, найдете ответ самостоятельно.

### Соединение конденсаторов

Промышленность производит большое количество разнообразных конденсаторов, однако для бесперебойной работы вновь разрабатываемых электронных устройств требуются конденсаторы с точно подобранной электроёмкостью. Для этого вместо производства узкоспециализированных конденсаторов используют особенности изменения ёмкости при последовательном и параллельном соединении конденсаторов. Соединенные между собой конденсаторы называют батареей конденсаторов.

Для начала рассмотрим электроёмкость батареи, состоящей из двух параллельно соединенных одинаковых конденсаторов, каждый из которых имеет электроёмкость  $C$ . Такое соединение показано на *рис. 12*. Из *рис. 12, а* видно, что при параллельном соединении двух одинаковых конденсаторов суммарная площадь обкладок увеличивается в два раза. Меняются ли остальные параметры, включенные в уравнение (22), от которых зависит величина электроёмкости? Оказывается, нет! Значит, в приведенном случае результирующая электроёмкость батареи возрастает в два раза! Если подключить параллельно пять одинаковых конденсаторов, то результирующая электроёмкость батареи возрастет в пять раз. А если конденсаторы неодинаковые? Как рассчитать результирующую электроёмкость батареи?

Практически так же, только умножение необходимо заменить сложением электроёмкостей отдельных конденсаторов:

$$C_{\text{при } \parallel \text{соединении}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i. \quad (23)$$

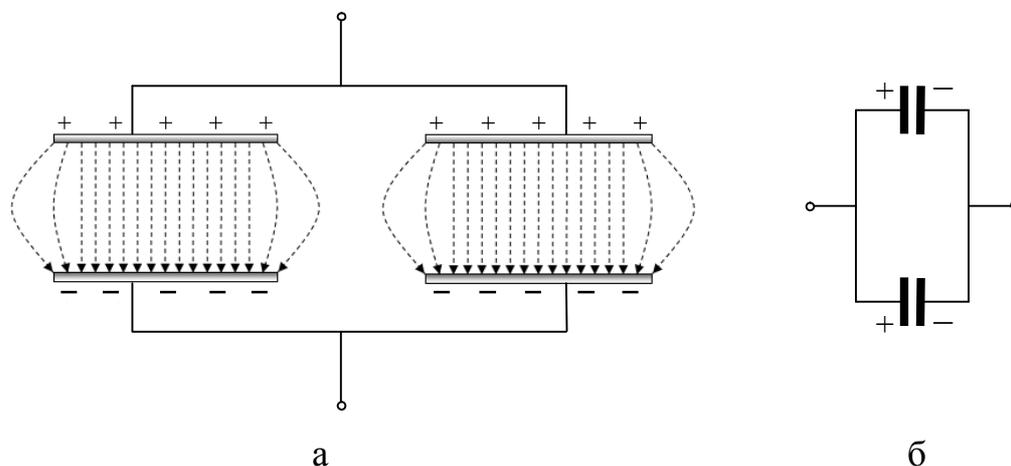


Рис. 12. Параллельное соединение конденсаторов (а) и его схематическое изображение (б)

Какой можно сделать вывод из уравнения (23)? При параллельном соединении конденсаторов результирующая электроёмкость всегда возрастает, значит, для увеличения электроёмкости необходимо использовать параллельное соединение.

За счет чего возрастает электроёмкость батареи с электрической точки зрения (см. (20))? Напряжение на батарее и на всех конденсаторах одинаково, так как они подсоединены к одним и тем же точкам электрической схемы (рис. 12, б)  $U_{\text{при } \parallel \text{соединении}} = U_1 = U_2 = \dots = U_n$ , а электрический заряд батареи складывается из зарядов на конденсаторах  $q_{\text{при } \parallel \text{соединении}} = q_1 + q_2 + \dots + q_n = \sum_{i=1}^n q_i$ .

Теперь рассмотрим электроёмкость батареи, составленной из двух одинаковых последовательно соединенных конденсаторов, представленных на рис. 13. Из рис. 13, а видно, что внутренние пластины такой батареи конденсаторов имеют разные знаки зарядов, а так как конденсаторы одинаковые, то и заряды на пластинах по величине тоже одинаковые. При соединении двух проводников с одинаковыми противоположными зарядами суммарный заряд оказывается скомпенсированным и равным нулю  $q_+ + q_- = 0$ . Можно утверждать, что на внутренних пластинах при последовательном соединении двух одинаковых конденсаторов заряд не накапливается, а накапливается только на внешних обкладках, толщина диэлектрика между

которыми (а следовательно, и расстояние  $d$  в уравнении (22)) в результате соединения увеличивается в два раза. Меняются ли остальные параметры, включенные в уравнение (22), от которых зависит величина электроёмкости? Оказывается, нет! Значит, в данном случае результирующая электроёмкость уменьшится в два раза! Если подключить последовательно пять

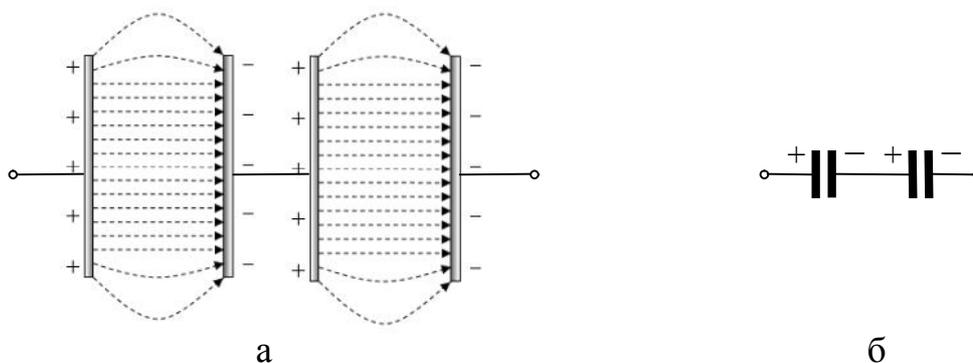


Рис. 13. Последовательное соединение конденсаторов (а) и его схематическое изображение (б)

одинаковых конденсаторов, то результирующая электроёмкость батареи уменьшится в пять раз. А если конденсаторы неодинаковые? Как рассчитать результирующую электроёмкость? Для этого используется выражение:

$$\frac{1}{C_{\text{при последовательном соединении}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}. \quad (24)$$

Какой можно сделать вывод из уравнения (24)? При последовательном соединении конденсаторов результирующая электроёмкость батареи всегда уменьшается, значит, для уменьшения электроёмкости необходимо использовать последовательное соединение.

За счет чего же уменьшается электроёмкость батареи с электрической точки зрения (см. (20))? Заряд на батарее и на каждом из конденсаторов одинаков, даже если конденсаторы различны по своим параметрам,  $q_{\text{при последовательном соединении}} = q_1 = q_2 = \dots = q_n$ , а напряжение на батарее складывается из напряжений на каждом из конденсаторов

$$U_{\text{при последовательном соединении}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n = \sum_{i=1}^n U_i.$$

Одновременным использованием последовательного и параллельного соединения стандартно выпускаемых промышленностью конденсаторов в различных сочетаниях всегда можно добиться искомой результирующей электроёмкости батареи. Этот способ подбора требуемой электроёмкости и используется при разработке электронных схем.

## Энергия электрического поля

Мы установили, что в конденсаторах запасается электрический заряд, а между обкладок сосредоточено электрическое поле. А как вычислить запас электрической энергии внутри заряженного плоского конденсатора? Рассмотрим *рис. 14* и попробуем применить уравнение (10) для изображенного конденсатора, считая, что всё электрическое поле сосредоточено между обкладками внутри конденсатора.

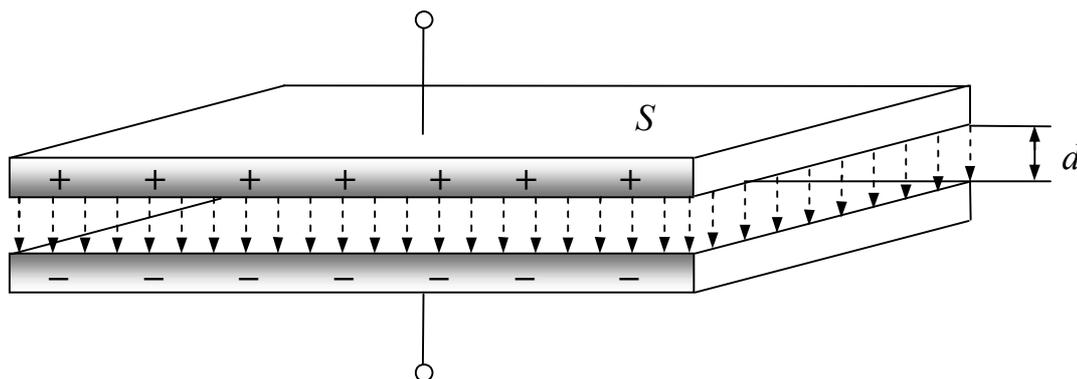


Рис. 14. Плоский заряженный конденсатор с площадью пластин  $S$  и толщиной изолятора  $d$

Для начала определимся с величинами, определяющими потенциальную энергию в уравнении (10)  $W_{\Pi} = qEd$ . Параметр  $d$  сомнений не вызывает, это толщина изолятора в конденсаторе (расстояние между обкладок). С  $q$  тоже вроде бы ясно – это заряд конденсатора, т. е. заряд одной пластины. А вот над  $E$  стоит призадуматься – ведь это напряженность поля, которое воздействует на заряд  $q$ . Значит, для правильной интерпретации уравнения (10) надо представить, что заряд одной пластины конденсатора находится в однородном поле другой пластины. Следовательно,  $E$  – это напряженность только одной пластины и она равна  $E = \frac{E_{\text{конденсатора}}}{2}$ . Теперь, используя (16), (20) и (22), можно записать:

$$W_{\Pi} = q \frac{d \cdot E_{\text{конденсатора}}}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} Sd. \quad (25)$$

Для проверки собственного понимания материала попробуйте преобразования (25) провести самостоятельно, используя необходимые выражения.

Но что же мы получили? Во-первых, равноправие всех выражений, входящих в (25). Это значит, что при решении задач оптимальное выражение надо выбирать с учетом известных по условию задачи величин. Во-вторых, учитывая, что реальные конденсаторы имеют в отличие от нашего рисунка очень тонкие обкладки и толщина изолятора  $d$  сравнима с толщиной всего

конденсатора, произведение  $Sd$  – это объем конденсатора  $V_{\text{конденсатора}} = Sd$ . Поэтому энергия конденсатора зависит от диэлектрической проницаемости диэлектрика  $\epsilon$ , значения напряженности поля в конденсаторе  $E$  и его объема  $V$ . В-третьих, энергия конденсатора численно равна работе, которую совершит электрическое поле, если притянет обкладки конденсатора вплотную друг к другу. Данные выводы справедливы для всех типов конденсаторов.

Но разве энергия электрического поля может существовать только в конденсаторах? Отнюдь. Всю энергию в случае свободного распространения поля посчитать крайне сложно, так как надо суммировать её по всему пространству. В этом случае вычисляют плотность энергии электрического поля  $w_e$ . Для получения необходимого результата проведем следующие преобразования, используя выражение (25):

$$w_e = \frac{W_{\Pi}}{V} = \frac{W_{\Pi}}{Sd} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}. \quad (26)$$

Из выражения (26) хорошо видно, что плотность энергии поля  $w_e$  зависит только от его напряженности  $E$  и диэлектрической проницаемости среды  $\epsilon$ , в которой поле распространено. Эти выводы справедливы для любых, даже изменяющихся во времени, электрических полей при необходимом условии однородности и изотропности диэлектрика, в котором поле распространяется.

На этом мы и закончим изучение основ электростатики. Теперь Вам необходимо прорешать приведенные в данном пособии задачи и упражнения, относящиеся к этому разделу электродинамики. При возникновении трудностей еще раз пройдитесь по соответствующим теоретическим разделам и освежите свои знания.

## Раздел VII. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

### Электрический ток

Вот теперь, разобравшись с физическими свойствами неподвижных зарядов и создаваемого ими электростатического поля, рассмотрим, что будет происходить, когда заряды начнут двигаться. Причем нас интересует не столько тепловое, колебательное движение зарядов или заряженных частиц, а их **направленное движение, которое носит название электрического тока**. Сразу возникает вопрос, всякое ли направленное движение зарядов создает электрический ток? Нет. Если Вы возьмете карандаш и начнете его перемещать в пространстве от одного края стола к другому, то никакого электрического тока не будет. Его не будет, даже если место карандаша, который, как известно, является изолятором, займет авторучка с металлическим корпусом. Дело в том, что при таком направленном движении количество положительных перемещенных зарядов равно количеству

отрицательных перемещенных зарядов и суммарный перенесенный заряд в любой момент времени будет равен нулю. А вот если Вы сначала наэлектризуете карандаш, сообщив ему избыточный электрический заряд любого знака, а затем начнете перемещать, то можно говорить о наличии электрического тока до тех пор, пока движение не прекратится. Теперь мы готовы сформулировать первый вывод: электрический ток – это направленное движение электрических зарядов при условии неравенства количества положительных и отрицательных перенесенных зарядов в одном направлении. Только в этом случае возникает электрический ток. Надеюсь, всем ясно, что мы рассмотрели необычный, экзотический способ создания электрического тока, а можно ли сформулировать условия возникновения электрического тока для любых, даже традиционных способов его получения? Давайте попробуем.

#### **Условия возникновения электрического тока:**

1. Наличие свободных заряженных частиц – частиц, имеющих избыточный электрический заряд и способных перемещаться в пространстве (главным образом – в проводниках).
2. Наличие силы, действующей на заряженные частицы в определенном направлении (в большинстве случаев – наличие силы электрического поля (7)).
3. Замкнутая электрическая цепь (лампочка не загорится, пока не замкнут выключатель, хотя в сети есть и свободные заряды, и электрическое поле).

Ну, что же, теперь мы знаем условия возникновения электрического тока, но как убедиться, идет ток или нет? На самом деле это не трудно. Достаточно обнаружить его действия на окружающие предметы.

#### **Действия электрического тока:**

1. Нагрев проводников (выделение теплоты, разогрев нити в лампочке).
2. Изменение химического состава некоторых проводников (в частности электролитов при зарядке аккумуляторных батарей).
3. Магнитное действие (поворот магнитной стрелки, или магнитное взаимодействие с окружающими предметами).

Еще необходимо разобраться с направлением электрического тока. В механике за положительное направление движения вы можете сами выбирать то, которое наиболее удобно для решения задачи. С электрическим током так поступать нельзя, в чем мы убедимся несколько позже. За **направление электрического тока** всегда принимается направление движения положительно заряженных частиц.

#### **Сила тока**

Однако одни и те же действия электрического тока могут проявляться ярко, а могут быть едва заметны в аналогичных условиях. Чем в этих случаях отличается один электрический ток от другого? Силой тока! Что же это такое?

Сила тока – это скаляр, численно равный переносу электрического заряда через поперечное сечение проводника за 1 с:

$$I = \frac{q}{\Delta t}. \quad (27)$$

Если сила тока не меняется со временем, то электрический ток называют постоянным электрическим током. Такой ток возможен, если за любые равные промежутки времени по проводнику переносится одинаковый заряд.

От чего же зависит сила тока? Давайте, исходя из определения силы тока (27), рассмотрим простейший случай движения положительных зарядов в проводнике, показанный на *рис. 15*. Подсчитав заряды, которые пройдут через поперечное сечение  $S$  за 1с, мы и получим силу тока. Первые из зарядов «убегут» от нашего сечения на расстояние, численно равное их скорости движения (ведь прошла только 1с), а последние практически окажутся в плоскости самого сечения. Как подсчитать всё это количество зарядов? Надо получившийся объем части проводника с указанными зарядами умножить на концентрацию  $n$  этих зарядов в проводнике. Для тех, кто забыл, концентрация – это количество зарядов в единице объёма  $n = \frac{N_q}{V}$ . В следующую секунду все повторится, так как ток постоянный.

$$I = q_0 n v_q S, \quad (28)$$

где  $q_0$  – величина заряда одной движущейся частицы или, лучше сказать, носителя тока;  $v_q$  – средняя скорость направленного движения заряда. Сила тока измеряется в амперах [А].

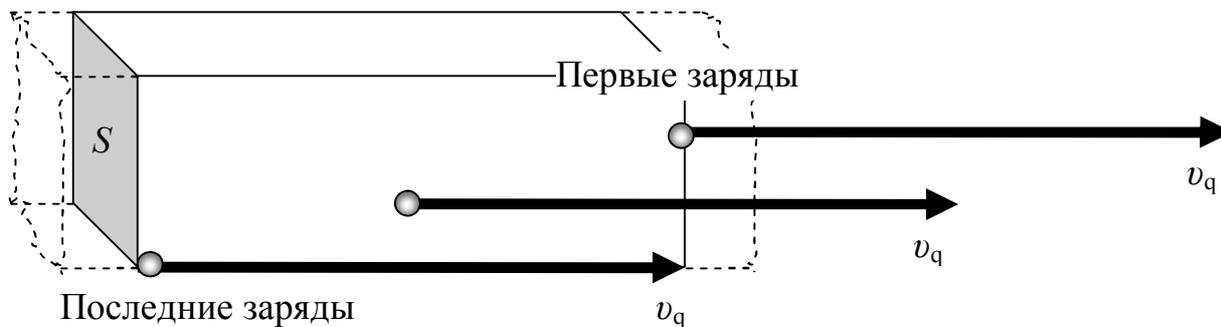


Рис. 15. Движение зарядов в проводнике через его сечение  $S$  за 1с

Какие выводы можно сделать из выражения (28)? Сила тока зависит:

1. От заряда каждой частицы (носителя тока)  $q_0$ . Чем больший заряд переносит одна частица, тем выше сила тока.
2. От концентрации частиц (носителей тока)  $n = \frac{N_q}{V}$ . Чем выше концентрация носителей тока, тем выше сила тока.

3. От скорости направленного движения носителей тока  $v_q$ . Чем выше эта скорость, тем выше сила тока.
4. От направления движения носителей тока. Сила тока максимальна, если заряды движутся вдоль проводника.
5. От площади сечения проводника  $S$ . Но об этом поговорим чуть позже.

Чтобы исключить размеры сечений проводника, часто пользуются не силой тока, а его плотностью – величиной, равной отношению силы тока к площади сечения проводника.

$$j = \frac{I}{S} = q_0 n v_q. \quad (29)$$

Это уравнение справедливо для любых токов в любых проводниках, и немного позже мы разберем особенности плотности тока в различных проводниках, а сейчас изучим, как связаны между собой напряжение и сила тока.

### Закон Ома для участка цепи

Экспериментально исследуя прохождение токов через различные материалы (рис. 16, а), немецкий ученый Ом получил вольтамперные характеристики, примеры которых представлены на рис. 16, б.

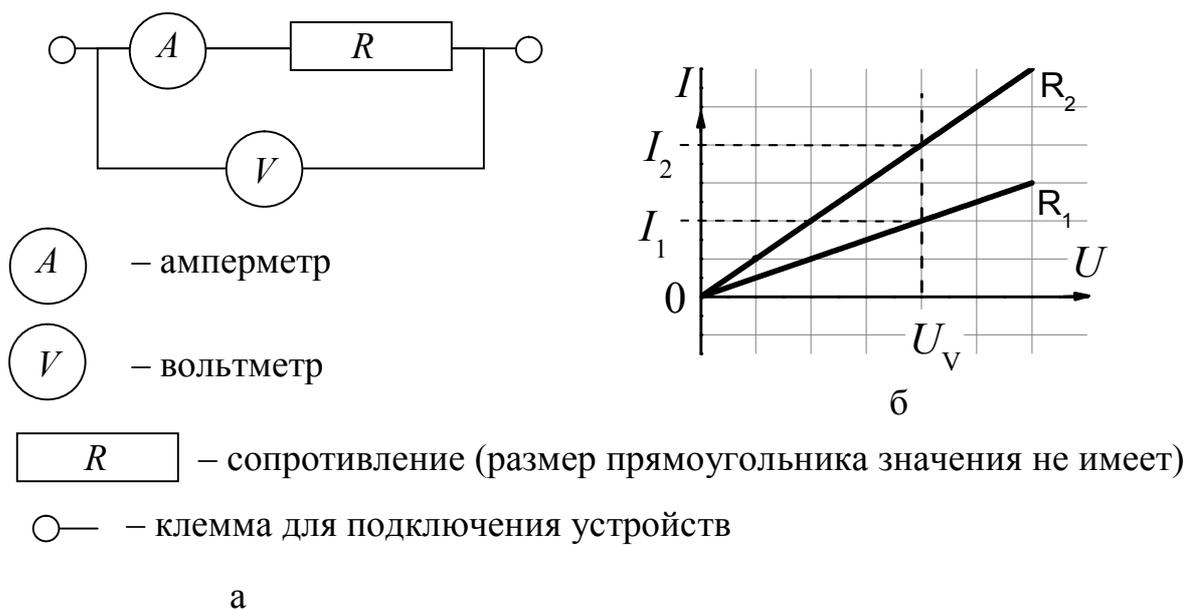


Рис. 16. Схема эксперимента по проверки закона Ома для участка цепи (а) и пример результатов измерений вольтамперных зависимостей для двух сопротивлений (б)

Оказалось, что ток растет прямопропорционально с ростом напряжения. Коэффициент пропорциональности назвали электропроводностью  $G$ , но чаще стали использовать параметр  $R = 1/G$  – электросопротивление, который измеряют в омах [Ом]. При одном и том же напряжении  $U_V$  чем выше

электросопротивление  $R_2 > R_1$ , тем меньше сила тока  $I_2 < I_1$  (рис. 16), поэтому закон Ома записывается:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (30)$$

### Электрическое сопротивление

Рассчитать электрическое сопротивление проводника можно, зная его площадь сечения  $S$ , длину  $\ell$  и удельное электросопротивление  $\rho$ , значения которого для различных материалов можно посмотреть в приложении.

$$R = \rho \frac{\ell}{S}. \quad (31)$$

Из (31) видно, что при  $\ell = 1$  м и  $S = 1$  м<sup>2</sup> сопротивление проводника  $R$  численно равно его удельному сопротивлению  $\rho$ .

При изменении температуры удельное электрическое сопротивление  $\rho(t^\circ)$  у всех материалов меняется по определенному закону, представленному ниже, поэтому сопротивление проводника  $R(t^\circ)$  будет меняться аналогично:

$$\rho(t^\circ) = \rho_0(1 + \alpha t^\circ), \quad R(t^\circ) = R_0(1 + \alpha t^\circ), \quad (32)$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление при 0 °С;  $\alpha$  – термический коэффициент сопротивления, который может быть как положительным, так и отрицательным у разных материалов;  $t^\circ$  – температура проводника, °С.

Так же, как и конденсаторы, промышленность выпускает электросопротивления стандартных номиналов, которые называют резисторами. Для получения требуемых точных значений электросопротивления резисторы соединяют последовательно и параллельно между собой.

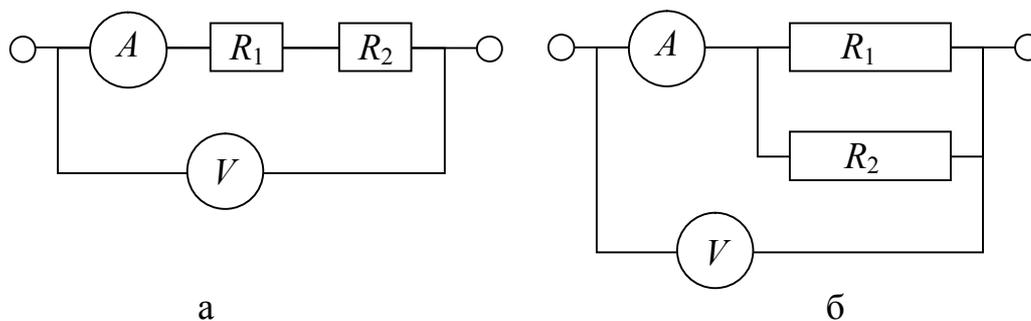


Рис. 17. Электрические схемы с последовательным (а) и параллельным (б) соединением резисторов

При **последовательном соединении** (рис. 17, а) сила тока, проходящего через все резисторы, одинакова:  $I_{\text{при последовательном соединении}} = I_1 = I_2 = \dots = I_n$  (резисторы образуют единственный «коридор» для носителей тока и каждый из них, попав в «коридор», должен добраться до «выхода», ведь у тока нет «обходных путей»); общее сопротивление участка цепи  $R$  равно сумме сопротивлений отдельных резисторов:

$$R_{\text{при последовательном соединении}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i. \quad (33)$$

(Можно сравнить с количеством ступенек, ведущих наверх, – чем их больше, тем большие усилия требуются для их преодоления, чем выше ступенька, тем труднее на нее забраться); а, как следствие из закона Ома,

$$U_{\text{при последовательном соединении}} = IR = I \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n IR_i = \sum_{i=1}^n U_i = U_1 + U_2 + \dots + U_n. \text{ Однако}$$

следует запомнить, что при последовательном соединении резисторов электросопротивление всего участка цепи всегда возрастает (будто лестница из ступенек, ведущая вверх!), и при постоянстве напряжения сила тока будет ослабевать. Так, при последовательном соединении двух одинаковых резисторов общее сопротивление участка возрастет в два раза и при неизменном напряжении на участке сила тока уменьшится в два раза. При этом на каждом резисторе будет падать половина общего напряжения участка. Попробуйте все эти ответы рассчитать самостоятельно, исходя из приведенных выше формул, а затем рассмотреть случай с пятью последовательными резисторами.

При **параллельном соединении** (рис. 17, б) напряжение  $U$  на всех резисторах одинаковое, так как они подключены к одним и тем же точкам цепи, поэтому  $U_{\text{при } \parallel \text{ соединении}} = U_1 = U_2 = \dots = U_n$ ; общая сила тока  $I$ , проходящего через весь участок, распределяется между резисторами обратно пропорционально их сопротивлениям:  $I_{\text{при } \parallel \text{ соединении}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n = \sum_{i=1}^n I_i$  (подобно распределению воды между рукавами Невы в её дельте); а в

$$\text{соответствии с законом Ома сила тока } I_{\text{при } \parallel \text{ соединении}} = \frac{U}{R} = \sum_{i=1}^n I_i = U \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}.$$

Отсюда следует, что общее сопротивление участка цепи можно рассчитать исходя из

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (34)$$

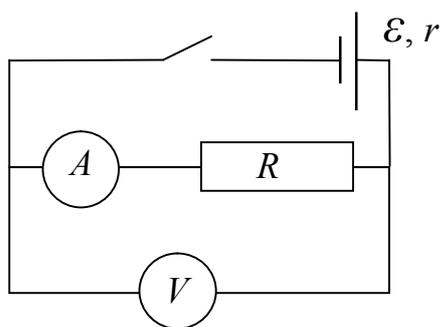
Запомните, что при параллельном соединении резисторов электросопротивление всего участка цепи всегда уменьшается (по аналогии с включением дополнительного эскалатора для пассажиров на станции метро), и при постоянстве напряжения сила тока будет возрастать (по аналогии с потоком пассажиров, выходящих на улицу со станции в описанном выше случае). Так, при параллельном соединении двух одинаковых резисторов общее сопротивление участка уменьшается в два раза и при неизменном напряжении общая сила тока на участке увеличивается в два раза. При этом через каждый резистор идет половина общего тока участка. Попробуйте все

эти ответы рассчитать самостоятельно, исходя из приведенных формул, а затем рассмотреть случай с пятью параллельными резисторами.

Одновременным использованием последовательного и параллельного соединения стандартно выпускаемых промышленностью резисторов в различных сочетаниях всегда можно добиться искомого результирующего электросопротивления. Этот способ подбора требуемого сопротивления используется при разработке электронных схем. Кроме резисторов в электрические цепи могут подключаться выключатели  и различные потребители тока – звонки , лампочки , нагреватели, излучатели, компьютеры и т. д. При подсоединении любых потребителей тока к участку цепи выведенные выражения для последовательного и параллельного соединения полностью справедливы.

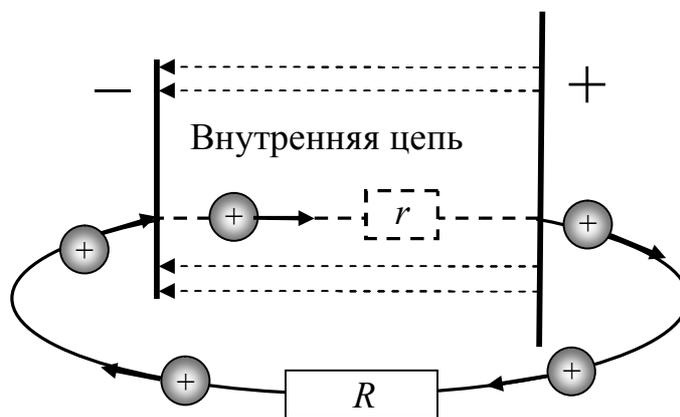
### Электродвижущая сила

Мы рассмотрели прохождение тока по участку цепи, но ведь третьим условием возникновения тока у нас записана замкнутость электрической цепи. Как же её замкнуть? Соединить проводом правую и левую клеммы участка на *рис. 17*? Ток в таком случае не пойдет, так как будет нарушено второе условие прохождения тока – будет отсутствовать сила, действующая на заряды в определенном направлении. Чтобы преодолеть это противоречие и одновременно выполнить оба указанных условия, необходимо к клеммам подключить источник тока (сами клеммы в этом случае можно уже не изображать). Такая электрическая цепь показана на *рис. 18* и называется полной (замкнутой) цепью.



$\mathcal{E}$  – электродвижущая сила  
источника тока  
 $r$  – внутреннее сопротивление  
источника тока

а



Внешняя цепь  
 $R$  – внешнее сопротивление

б

Рис. 18. Полная (замкнутая) цепь (а) и направление движения по ней тока (положительных зарядов) (б)

Давайте разберёмся, что же происходит с зарядами в замкнутой цепи. Из *рис. 18, б* видно, что вся замкнутая цепь делится на два участка – внешний и внутренний. Во внешней цепи, в которой заряды двигаются вдоль силового электрического поля, положительные заряды перемещаются электрическим полем от положительного электрода к отрицательному, и этот участок соответствует рассмотренному ранее (*рис. 17*) случаю. Во внутренней цепи, расположенной внутри источника тока, всё не так. В источнике постоянного тока происходит преобразование различных видов энергии в электрическую, которая в виде разделенных зарядов накапливается на разных электродах. Положительные заряды переносятся внутри источника на анод, который обозначается (+) и изображается на схемах длинной вертикальной линией. Отрицательные заряды переносятся внутри источника на катод, который обозначается (–) и изображается на схемах короткой вертикальной линией (*рис. 18*). Любой источник тока характеризуется электродвижущей силой (ЭДС)  $\mathcal{E}$  и внутренним электрическим сопротивлением  $r$ . ЭДС численно равна работе, совершаемой внутри источника по переносу единичного заряда от одного электрода к другому и измеряемой в вольтах (35). А внутреннее сопротивление характеризует электросопротивление направленному движению зарядов внутри источника и, как любое сопротивление, измеряется в омах.

$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}. \quad (35)$$

Кто или что переносит заряды внутри источника? Из *рис. 18, б* следует, что внутри источника положительные заряды двигаются от отрицательного электрода к положительному, т. е. идут против сил электрического поля. Такое движение зарядов обусловлено воздействием неэлектрических (сторонних) сил, которые имеют в разных источниках различную природу – механическую, тепловую, световую, химическую. Именно сторонние силы внутри источника совершают работу по переносу зарядов против электрических сил. Только сторонние силы создают возможность замкнуть цепь, по которой движутся заряды, и могут переносить внутри источника заряды обоих знаков. В *табл. 1* даны характеристики основных типов источников тока, обязательно познакомьтесь с ними.

### **Закон Ома для полной цепи**

Осталось сформулировать закон, которому подчиняется сила тока, проходящего по замкнутой цепи. Этот закон называется закон Ома для полной цепи и записывается как

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}. \quad (36)$$

Таблица 1. Характеристики

Тип источника электрического тока	Используемое физическое явление	Вид энергии, которая превращается в электрическую
<b>Аккумулятор кислотный</b>  <b>Аккумулятор щелочной</b>	Химические реакции	Химическая (внутренняя)
<b>Гальванический элемент</b>	Химические реакции	Химическая (внутренняя)
<b>Генератор</b>	Движение электрических зарядов в магнитном поле	Механическая или тепловая
<b>Пьезоэлектрик</b>	Пьезоэлектрический эффект	Механическая
<b>Термоэлемент</b>	Термоэлектрический эффект	Тепловая
<b>Фотоэлемент</b>	Фотоэлектрический эффект	Световая
<b>Электрофорная машина</b>	Электризация трением и через влияние	Механическая

источников тока

Основные части конструкции	Принцип работы	Область применения
<p>Свинцовые пластины, помещенные в раствор серной кислоты.</p> <p>Пластины из пероксида никеля и опрессованного железа, помещенные в щелочной раствор</p>	<p>Предварительное накопление электрических зарядов при пропускании через аккумулятор электрического тока и затем использование его как источника тока</p>	<p>Аккумуляторы транспортных средств (автомобилей, мотоциклов и т. д.)</p> <p>Железнодорожные фонари у проводников вагонов</p>
<p>Угольный стержень (+) и цинковый сосуд (-)</p>	<p>От цинкового сосуда отделяются положительные ионы и переходят к угольному стержню</p>	<p>Бытовые батарейки</p>
<p>Статор, якорь, электрощетки</p>	<p>Якорь вращается в магнитном поле и происходит разделение электрических зарядов</p>	<p>Электростанции, транспортные средства (автомобили и т. д.)</p>
<p>Кристалл диэлектрика (кварца) и деформирующее устройство</p>	<p>Разделение электрических зарядов при деформации кристаллической решетки</p>	<p>Пьезоразжигатели, микрофоны, звуко-сниматели</p>
<p>Два разных полупроводника или полуметалла</p>	<p>Возникновение электрического тока при разности температур контактов</p>	<p>Космические аппараты, удаляющиеся от Солнца</p>
<p>Полупроводники: селен, оксид меди</p>	<p>Появление электрического тока при освещении поверхности полупроводника</p>	<p>Турникеты в метро; космические аппараты, приближающиеся к Солнцу</p>
<p>Два вращающихся диска</p>	<p>Разделение зарядов при вращении дисков относительно друг друга</p>	<p>Физические демонстрации</p>

Ясно, что ток будет прямо пропорционален ЭДС и обратно пропорционален сумме внешнего и внутреннего сопротивлений. Вроде бы всё просто, но как быть, если в цепь включены несколько источников тока? В этом

случае  $\mathcal{E} = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i$ , а  $r = \sum_{i=1}^n r_i$ . Однако следует знать, как складывать ЭДС

источников с учетом направления их подсоединения. Надо выбрать источник с наибольшим ЭДС и начать обход цепи в направлении движения тока. Если при обходе ток внутри источника идет от (-) к (+), то ЭДС такого источника прибавляем к первому, если при обходе ток внутри источника идет от (+) к (-), то ЭДС такого источника вычитаем из первого. Обойдя все имеющиеся источники получим искомый результат – суммарную ЭДС в цепи. При последовательном соединении источников (рис. 19, а) их внутренние сопротивления всегда складываются, независимо от направления ЭДС источника, поэтому, чем больше источников включено в цепь, тем больше внутреннее сопротивление замкнутой цепи. При параллельном соединении источников (рис. 19, в) общее внутреннее сопротивление цепи вычисляется подобно (34). Если два одинаковых источника соединены последовательно (рис. 19, а) друг за другом, их ЭДС складываются и суммарная ЭДС цепи равна:  $\mathcal{E}_{\text{цепи}} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_1 = 2\mathcal{E}_1$ . Если одинаковые источники включены навстречу друг другу (рис. 19, б), их ЭДС вычитаются и суммарная ЭДС цепи равна 0:  $\mathcal{E}_{\text{цепи}} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_1 = 0$ . Однако внутреннее сопротивление цепи в обоих случаях одинаково  $r = r_1 + r_1 = 2r_1$ . При сложении ЭДС нескольких источников замкнутой цепи можно получить в итоге и отрицательное значение. Это означает, что электрический ток будет идти по цепи в противоположном направлении по отношению к направлению предпринятого обхода. При параллельном соединении двух одинаковых источников (рис. 19, в) ЭДС в цепи не меняется, только в два раза уменьшается внутреннее сопротивление батареи источников.

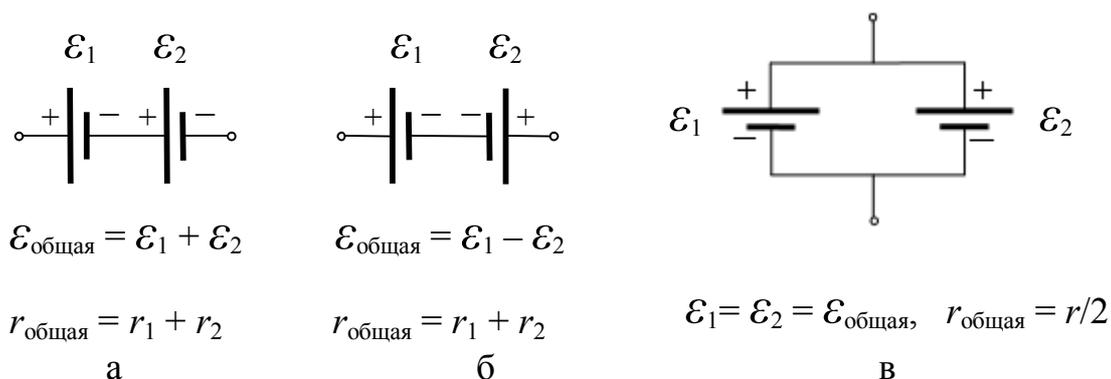


Рис. 19. Соединение источников тока последовательно (а), навстречу друг другу (б) и параллельно (в)

Осталось разобраться с вопросом о напряжении. Куда оно пропало из закона, где спряталось? Исходя из (30)  $U = I \cdot R$ , следовательно, напряжение относится только к внешнему участку цепи. Преобразуем (36) так, чтобы найти  $I \cdot R$  и заменить его на  $U$ :  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \Rightarrow \mathcal{E} = I(R+r) = I \cdot R + I \cdot r = U + I \cdot r$ .

Теперь можно окончательно записать, что напряжение в замкнутой цепи равно

$$U = \mathcal{E} - I \cdot r \quad (37)$$

и всегда меньше ЭДС источника на величину потерь во внутренней цепи. Эти потери энергии внешне проявляются, как разогрев батареек или аккумуляторов в процессе работы.

Выделим несколько основных режимов работы источников тока. Когда источник не подключен в цепь, ток равен нулю  $I = 0$  и из (37) получаем  $U = \mathcal{E}$ . В этом режиме измеряют вольтметром ЭДС источника. Второй режим – это режим короткого замыкания, отсутствие внешнего сопротивления,  $R = 0$ . В этом случае  $U = I \cdot R = 0$ , а сила тока определяется только внутренним сопротивлением  $I = \frac{\mathcal{E}}{r}$ . Источники с малым внутренним сопротивлением быстро выходят из строя при коротком замыкании. Прежде, чем поговорить о третьем режиме – режиме максимальной выделяемой мощности источника, познакомимся с работой и мощностью тока.

### Работа и мощность постоянного тока

Как Вы уже знаете, при перемещении зарядов электрическое поле совершает работу, которую можно рассчитать по формулам (10) и (14). Но ведь электрический ток – это и есть перемещение зарядов! Поэтому при прохождении тока работу электрического поля принято называть работой тока, и запись этой работы, с учетом закона Ома, выглядит так:

$$A = qU = UI\Delta t = I^2 R \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t. \quad (38)$$

Обычно работа вычисляется в джоулях, но работа тока может вычисляться во внесистемной единице киловатт-час:  $1 \text{ кВт} \cdot \text{час} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 3,6 \text{ МДж}$ . Для расчета работы тока в конкретных задачах необходимо выбирать наиболее удобную форму записи. Так, при последовательном соединении резисторов удобнее  $A = I^2 R \Delta t$ , а при параллельном –  $A = \frac{U^2}{R} \Delta t$ .

Так как работа – это мера изменения энергии, то при прохождении тока энергия проводников должна изменяться, и по закону сохранения энергии работа тока за время  $\Delta t$  равна энергии, выделяемой на данном участке цепи. Как обнаружить эту выделяемую энергию? По нагреву проводников! Закон, по которому происходит нагрев проводников, носит название закон Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 R \Delta t. \quad (39)$$

Мощность тока, исходя из (38), можно вычислить по одной из следующих формул:

$$N = \frac{A}{\Delta t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (40)$$

Так же, как и для работы, при решении задач необходимо выбирать из (40) наиболее удобную форму записи.

Вот теперь пора вспомнить о режиме максимальной выделяемой мощности во внешней цепи. Единственным условием этого режима является равенство внешнего и внутреннего сопротивлений. При этом ток в цепи равен половине тока короткого замыкания  $I_{N_{\max} \text{ внешней цепи}} = \frac{\mathcal{E}}{2r}$ .

## Раздел VIII. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

### Электрический ток в металлах

В металлах при прохождении тока перемещаются только свободные электроны. Атомы металлов, расположенные в узлах кристаллической решётки, превращаясь в положительные ионы, остаются на своих местах. Такой характер проводимости называют электронной проводимостью, и ток в металлах не сопровождается переносом вещества. Электроны под действием электрического поля движутся в металлах равноускоренно до столкновения с ионами. Среднюю скорость движения электронов, исходя из законов динамики, можно записать как

$$\bar{v} = \frac{eE}{2m_e} \tau = \frac{eU}{2m_e \ell} \tau, \quad (41)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $E$  – напряженность электрического поля в металле;  $m_e$  – масса электрона;  $\tau$  – среднее время движения электрона между столкновениями;  $\ell$  – длина металлического проводника;  $U$  – напряжение на его концах.

Подставим (41) в (28) и получим

$$I = env_q S = \frac{e^2 n S \tau}{2m_e \ell} U \quad \Rightarrow \quad I = kU, \quad (42)$$

где  $k = \frac{e^2 n S \tau}{2m_e \ell}$ . Следовательно, в металлах зависимость между током и

напряжением подчиняется закону Ома. Физики такие зависимости называют вольтамперными характеристиками (рис. 16, б).

Сравнивая (30) и (42), можно получить для сопротивления металлов  $R = \frac{1}{k} = \frac{2m_e \ell}{e^2 n \tau S}$ , и, учитывая (31), получим

$$\rho = \frac{RS}{\ell} = \frac{2m_e}{e^2 n \tau}. \quad (43)$$

Так как масса и заряд электрона неизменны, то удельное сопротивление металлов обратно пропорционально только концентрации носителей заряда и среднему времени их ускоренного движения. Следовательно, ток лучше проводят те металлы, у которых эти параметры выше.

Что происходит в металлах при увеличении температуры? Концентрация носителей практически не меняется, но уменьшается среднее время ускоренного движения электронов из-за увеличения амплитуды теплового движения ионов металла, поэтому удельное сопротивление металлов растет с ростом температуры. Следовательно, термический коэффициент сопротивления металлов  $\alpha_m > 0$ .

### Электрический ток в электролитах

Электролитами называются расплавы и растворы веществ, состоящих из нейтральных молекул, которые диссоциируют в растворах под действием внешнего электрического поля, т. е. распадаются на ионы противоположных знаков, способные создавать электрический ток. Значит, электролиты обладают ионной проводимостью, положительных и отрицательных ионов в них одинаковое количество, и, в отличие от металлов, электрический ток создают носители зарядов обоих знаков.

Как же ионы движутся в растворах? Движение любых объектов в жидкости характеризуется увеличением силы сопротивления движению  $F_{\text{сопр}}$  с увеличением скорости объекта  $v$ . Поэтому ионы в электролитах движутся ускоренно, пока  $F_{\text{электр}} > F_{\text{сопр}}$ , а после выравнивания сил ( $F_{\text{электр}} = F_{\text{сопр}}$ ) равномерно  $v_{\text{max}} = \text{const}$ . Время разгона мало, так как силы сопротивления нарастают очень быстро, поэтому можно считать, что ионы направлены движутся с постоянной скоростью

$$v_{\text{max}} = \frac{q_0 E}{k'} = \frac{q_0}{k' \ell} U, \quad (44)$$

прямо пропорциональной заряду иона  $q_0$  и напряженности поля  $E$  ( $k'$  – коэффициенты сопротивления движению ионов в жидкости, которые мы для простоты будем считать равными для ионов разных знаков).

Подставим (44) в (28) и получим

$$I = q_0 n v_{\text{q}} S = \frac{q_0^2 n S}{k' \ell} U \quad \Rightarrow I = k U, \quad (45)$$

где  $k = \frac{k' \ell}{q_0^2 n S}$ . Следовательно, так же, как и в металлах, в электролитах

зависимость между током и напряжением подчиняется закону Ома, а вольтамперные характеристики соответствуют *рис. 16, б*.

Сравнивая (30) и (45), можно получить для сопротивления металлов

$$R = \frac{1}{k} = \frac{k' \ell}{q_0^2 n S}, \text{ и, учитывая (31), получим}$$

$$\rho = \frac{RS}{\ell} = \frac{k'}{q_0^2 n}. \quad (46)$$

Так как заряды ионов и сопротивление движению в конкретном электролите неизменны, то удельное сопротивление зависит только от концентрации ионов (носителей заряда) и обратно пропорционально ей. Следовательно, ток лучше проводят электролиты, имеющие более высокую степень диссоциации.

Что происходит в электролитах при увеличении температуры? За счет объемного расширения уменьшается коэффициент сопротивления движению ионов  $k'$ , возрастает степень диссоциации молекул и, как следствие, концентрация носителей  $n$ . Эти процессы приводят к уменьшению сопротивления электролита и повышению тока при том же напряжении. Следовательно, в отличие от металлов, термический коэффициент сопротивления электролитов  $\alpha_{эл} < 0$ .

Ещё одним существенным отличием прохождения тока через электролиты является перенос ионами вещества с выделением его на электродах. Такой процесс, связанный с окислительными (на аноде) и восстановительными (на катоде) реакциями, назвали электролиз. Законы электролиза сформулировал Фарадей. Последуем его примеру и определим массу вещества  $m$ , которая выделится за время  $\Delta t$  на электроде:

$$m = m_0 N_i = \frac{M}{N_A} N_i, \quad (47)$$

где  $m_0$  – масса одного иона;  $N_i$  – число ионов, достигших электрода;  $M$  – молярная (атомная) масса вещества;  $N_A$  – число Авагадро.

А можно ли связать количество ионов  $N_i$ , достигших электрода, с силой тока в электролите  $I$ ? Давайте попробуем:

$$N_i = \frac{q}{q_0} = \frac{I \Delta t}{ne}, \quad (48)$$

где  $q$  – перенесенный ток заряд за время  $\Delta t$ ;  $q_0 = ne$  – заряд одного иона, выраженный через валентность иона  $n$  и заряд электрона  $e$ .

Для получения закона Фарадея осталось объединить (47) и (48):

$$m = \frac{M}{N_A} \frac{I \Delta t}{ne} = \frac{M}{ne N_A} I \Delta t = k I \Delta t, \quad (49)$$

где  $k = \frac{M}{neN_A}$  является константой для конкретного вещества, носит название

электрохимический эквивалент и численно равно массе вещества, выделяющегося на электроде при прохождении 1 Кл электричества через электролит. Произведение двух констант называют постоянной Фарадея  $F = eN_A = 9,65 \cdot 10^4$  Кл/моль. В этом случае закон Фарадея можно записать как:

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} I \Delta t. \quad (50)$$

В зависимости от условий конкретной задачи для её оптимального решения необходимо выбрать наиболее удобную форму записи закона Фарадея.

### Электрический ток в газах

В обычном состоянии газы являются изоляторами и ток не проводят. Поэтому гнезда для подключения приборов в комнатных электрических розетках расположены так близко друг к другу. Однако думаю, все наблюдали грозу, когда молния пронизывает воздух от облаков до Земли, а молния – это ведь кратковременный ток. При каких же условиях через газы может проходить электрический ток? Давайте в этом разберёмся.

Как Вы помните, первым условием возникновения тока является наличие свободных электрических зарядов, а газы обычно состоят из нейтральных молекул, расположенных достаточно далеко друг от друга. Как получить в газах свободные заряды? Ионизировать молекулы, т. е. оторвать электрон (а может быть и больше) от молекулы, совершив работу ионизации  $A_i$  против сил внутримолекулярного взаимодействия и получить сразу два заряда – положительный ион и электрон. Однако такая работа требует затраты соответствующей энергии. А откуда её взять, как передать молекулам? В газовую среду требуется внести внешний ионизатор – высокотемпературный нагреватель (свечку), ультрафиолетовое излучение (бактерицидную лампу), рентгеновское или радиоактивное излучение. Следовательно, в ионизированных газах могут существовать одновременно и ионы, и электроны, т. е. проводящие газы обладают электронно-ионной проводимостью.

Как же носители заряда движутся в газах под действием внешнего электрического поля? Ионы и электроны движутся ускоренно навстречу друг другу до столкновений между собой или с молекулами. Столкновений мало, так как плотность газов мала. При столкновении иона и электрона возможна как рекомбинация молекулы (восстановление) с её ионизацией при следующем столкновении, так и усиление ионизации с отрывом ещё одного электрона (ударная ионизация). Это определяется комплексом целого ряда

факторов: типом газа, температурой, плотностью и т. д. Для нас главное, что в газах удалось получить свободные носители тока, и они стали проводящими.

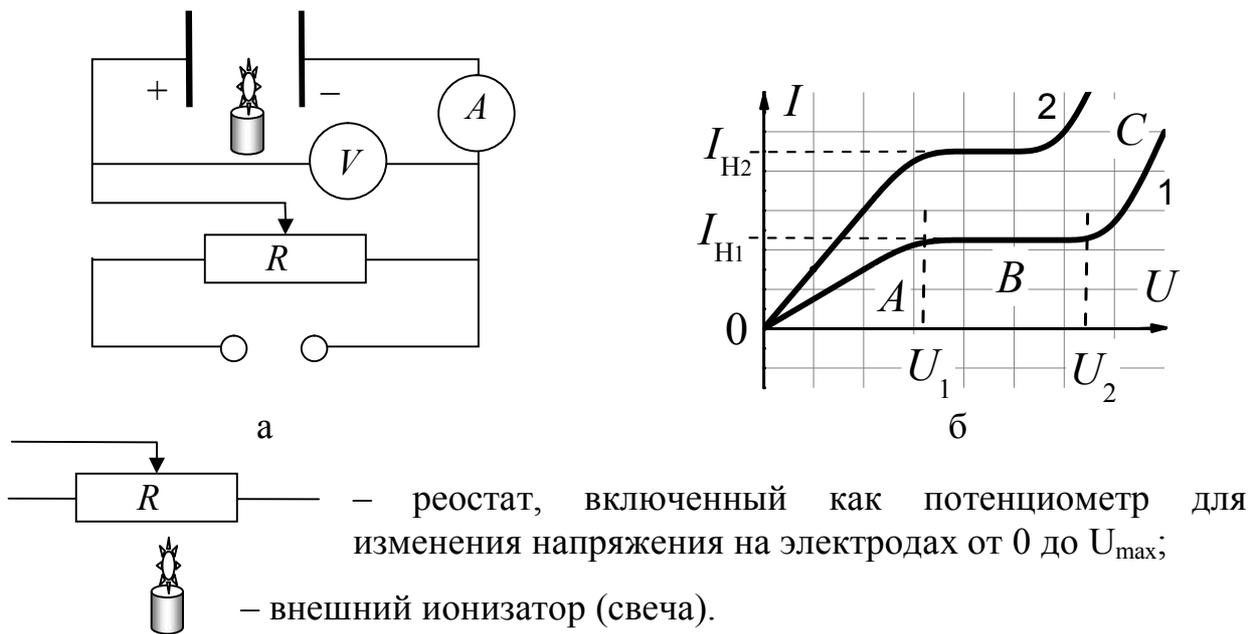


Рис. 20. Схема эксперимента (а) и пример результатов измерений вольтамперных зависимостей для тока в газах (б)

Как же меняется сила тока в проводящем газе при увеличении напряжения? Рассмотрим вольтамперную характеристику тока в газах (рис.20).

На первом этапе (рис. 20, б) электрический ток увеличивается пропорционально приложенному напряжению, т. е. подчиняется закону Ома. Это объясняется тем, что с увеличением напряжения на электродах увеличивается скорость движения носителей заряда обоих типов, соответственно этому растет и ток. Однако при напряжении  $U_1$  ток перестаёт расти (кривая 1) и не меняется до напряжения  $U_2$ . Это можно понять, если учесть, что количество электронов и ионов, создаваемых конкретным внешним ионизатором, ограничено его энергетической мощностью и не может превзойти  $n_{\max}$ , а ударная ионизация при этих напряжениях, определяющих скорость электронов, еще отсутствует. Поэтому величина заряда, переносимого между электродами за 1с, выходит на насыщение, и дальнейшее увеличение скорости носителей приводит к пропорциональному уменьшению количества ионов и электронов, достигающих электродов за 1с. Следовательно, произведение  $nv_q$  не меняется, и, согласно уравнениям (28) и (29), сила и плотность тока остаются неизменными  $j_{\text{насыщения}} = \frac{I}{S} = q_0nv_q$ . Если

подключить дополнительный ионизатор, то ток насыщения возрастет  $I_{H2} > I_{H1}$ , если плавно уменьшать напряжение, то сила тока будет уменьшаться в соответствии с тем же графиком, т. е. участки А и В являются обратимыми и

описывают **несамостоятельный газовый разряд**. Такое название связано с тем, что при отключении ионизатора электрический ток прекратится.

При дальнейшем увеличении напряжения выше  $U_2$  электрический ток в газах начинает быстро возрастать, так как начинается новый процесс – ударная ионизация, при которой электроны, двигающиеся с большими скоростями, сталкиваясь с молекулами газа, ионизируют их. Растет не только скорость носителей заряда, но и количество электронов и ионов, проходящих между электродов за 1с, поэтому в уравнениях (28) и (29) произведение  $nv_q$  начинает непрерывно возрастать. Этим объясняется быстрый рост тока на участке  $C$  (рис. 20, б). Теперь даже при удалении внешнего ионизатора ток может лишь понизиться, но не прекратится. Это **самостоятельный газовый разряд**.

При одном и том же ионизаторе один и тот же газ будет иметь разное электрическое сопротивление при различных температурах. При увеличении температуры газа возрастает энергия молекул, усиливается ионизация, возрастает концентрация носителей и растет ток. Поэтому для газов температурный коэффициент сопротивления меньше нуля  $\alpha_{эл} < 0$ .

В заключении следует сказать, что электрический ток, проходя через газы, всегда сопровождается звуковыми или световыми эффектами, независимо от типа разряда: тлеющий, дуговой, коронный или искровой.

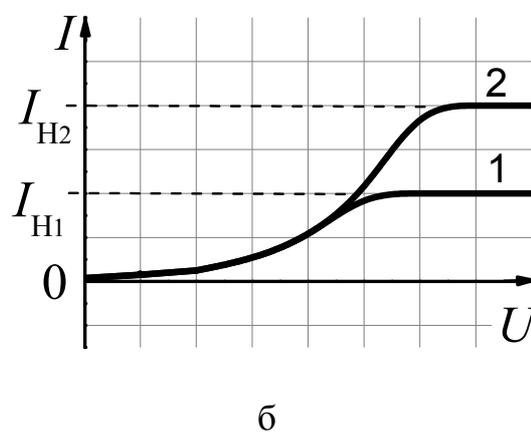
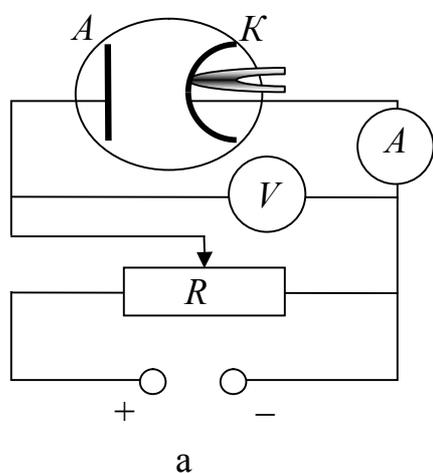
### Электрический ток в вакууме

А теперь давайте откачаем газ из газоразрядной трубки – стеклянного замкнутого сосуда с впаянными электродами (примером газоразрядной трубки служит лампа дневного света). Откачку газа проведем до получения технического вакуума – состояния, при котором молекулы газа за счет своего теплового хаотичного движения пролетают расстояние между электродами (если их нет – стенками сосуда) без столкновений. В такой среде даже ионизатор не поможет создать электрический ток – раз нет соударений между молекулами, значит, отсутствует ионизация, нет свободных зарядов. Как же решить эту проблему в вакууме, откуда взять заряды? Единственное, что у нас есть в трубке, – это электроды, вот и попробуем использовать хотя бы один из них. Начнем его нагревать, разогреем докрасна и, о чудо! В вакууме появились свободные электроны. О том, что они были в металлических электродах, мы знали, но как они попали в вакуум? Они в прямом смысле слова вышли из металла, совершили работу выхода  $A_{\text{вых}}$ , затратив на это свою энергию. Условие появления эмиссии (выхода) электронов из металла

$$E_e = \frac{mv^2}{2} \geq A_{\text{вых}}. \quad (51)$$

Этот способ получения свободных носителей называется термоэлектронной эмиссией.

Теперь ясно, для чего необходимо нагревание электрода – для увеличения энергии электронов выше их работы выхода из металла (51). Если не предпринять необходимых мер и не подключить этот электрод к отрицательному полюсу источника тока, то по мере выхода электронов он начнет заряжаться положительно (появится недостаток электронов) и электроны начнут возвращаться в металл за счет сил электростатического притяжения. Поэтому в вакуумной лампе – стеклянном откаченном баллоне с электродами, разогретый электрод – это катод ( $K$ ), подключенный к отрицательному полюсу источника. Второй электрод остаётся без нагрева и подключается к положительной клемме источника – аноду, поэтому и сам называется анод вакуумной лампы ( $A$ ). Получившаяся вакуумная лампа носит название вакуумного диода (рис. 21). Следовательно, характер проводимости в вакууме – электронный.



 – электронагреватель катода

Рис. 21. Схема эксперимента (а) и пример результатов измерений вольтамперных зависимостей для тока в вакууме (вакуумном диоде) (б)

Как же электроны движутся в вакууме? Они летят от катода к аноду без столкновений с постоянным ускорением, определяемым напряженностью электрического поля между электродами (4). Чем выше напряженность, тем выше ускорение электронов, тем выше средняя скорость их движения и, следовательно, выше ток при прочих равных условиях (28).

Схема эксперимента по измерению вольтамперной характеристики тока в вакууме аналогична предыдущему случаю и представлена на рис. 21, а. Электронагреватель для разогрева катода может иметь свой независимый источник питания, который определяет температуру нагревателя. Рассмотрим результаты эксперимента для двух различных температур катода.

Когда катод не разогрет и напряжение на электроды не подано, ток, естественно, равен нулю. Если разогреть катод и выполнить условия (51), то

даже при нулевом напряжении будет наблюдаться очень слабый ток, определяемый электронами, способными самостоятельно долететь до анода. Поэтому на графике *рис. 21, б* вольтамперная зависимость проходит над нулевой точкой, а не через неё. Иногда составители задач не акцентируют на этом внимание, так как при значительных токах это начальное смещение от нуля можно и не показывать. Далее, при увеличении напряжения на аноде сила тока на участке 1 возрастает, но при этом она не линейна и закону Ома не подчиняется. При дальнейшем росте анодного напряжения ток достигает максимального значения, называемого током насыщения  $I_H$ , и практически далее не меняется, что тоже противоречит закону Ома.

Если провести эксперимент с катодом, разогретым до более высокой температуры (кривая 2), то насыщение тока ( $I_{H2}$ ) произойдет при более высоких напряжениях на аноде. Начальный же участок второй кривой будет совпадать с первой.

Объяснение таких результатов аналогично объяснению тока в газах. Количество электронов, вылетевших с катода, зависит только от материала и температуры катода, но не зависит от анодного напряжения. На начальном этапе с увеличением напряжения растёт скорость электронов, поэтому растёт произведение  $nv_e$  и, как следствие, растёт сила и плотность тока (формулы (28), (29)). При токе насыщения количество электронов, достигающих анода за 1 с, становится равным количеству электронов, испускаемых катодом за 1 с, и, по определению (27), ток перестаёт расти  $I = \frac{q}{\Delta t}$ . Увеличение температуры катода увеличивает энергию электронов в металле, поэтому большее количество электронов может совершить работу выхода и стать носителями заряда в вакууме. Как следствие, возрастает ток насыщения.

Вакуумный диод – пример выпрямительного устройства, в котором ток может идти только в одном направлении – от горячего катода к холодному аноду. Если переключить полярность источника на обратную, термоэмиссионные электроны будут возвращаться на горячий анод, и ток в вакууме не пойдёт.

В старых компьютерах и телевизорах можно встретить электронно-лучевые трубки для воспроизведения изображений (*рис. 22*). Такие трубки являются тоже вакуумными приборами, и на их примере мы рассмотрим принципы управления электронным лучом.

Катод ( $K$ ) испускает электроны во все стороны, поэтому его помещают внутрь модулятора ( $M$ ), имеющего более низкий потенциал ( $\varphi_M < \varphi_K$ ) и отталкивающего электроны к центру. В центре модулятора по оси электронно-лучевой трубки находится небольшое отверстие, через которое выходят электроны, формирующие электронный луч. На пути луча стоят два анода ( $A_1$  и  $A_2$ ), представляющие полые цилиндры с разными потенциалами  $\varphi_{A_1} < \varphi_{A_2}$ .

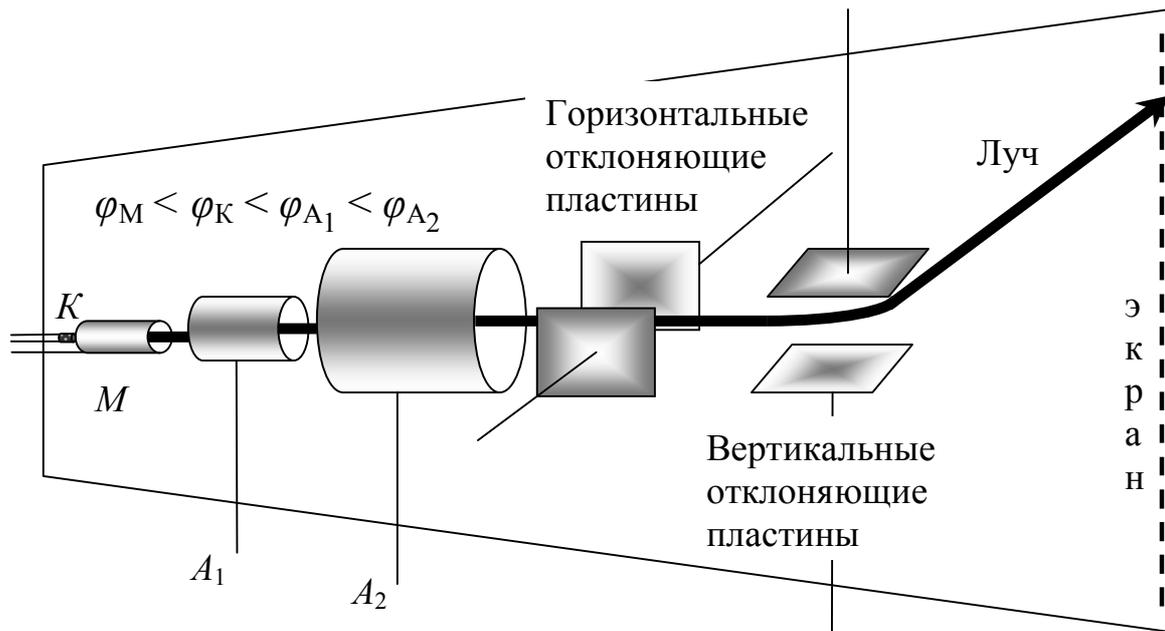


Рис. 22. Электронно-лучевая трубка

Первый анод главным образом разгоняет луч, при помощи второго анода луч фокусируется и разгоняется. Далее луч проходит через две пары отклоняющих пластин, напряжение на которых определяет точку попадания луча на флюоресцирующем экране. Для смещения по вертикали, подавая (+) на верхнюю пластину (как на *рис. 22*), заставим электроны, а значит луч, смещаться вверх, подав (+) на нижнюю пластину, сместим луч вниз. Работу горизонтальных пластин разберите самостоятельно. Перемещаясь, луч вызывает в точках падения на экран свечение, которое длится до следующего прохода луча. Так формируется картинка на экране. Напоследок перечислим особенности электронного луча:

- 1) это поток электронов;
- 2) распространяется прямолинейно;
- 3) отклоняется от прямолинейности в электрическом и магнитном полях;
- 4) несет значительную энергию;
- 5) может возбуждать люминесценцию – свечение некоторых материалов.

### Электрический ток в полупроводниках

Кажется, уж всё разобрали, от металлов до вакуума, ан, нет! Оказывается, мы не тронули самый мощный и многообразный класс материалов – полупроводники. Почему они полу? Потому, что при комнатных температурах проводят электричество в сотни раз хуже металлов, но в сотни

раз лучше диэлектриков. Классическими представителями полупроводников являются германий (Ge) и кремний (Si), а главная область их применения – микроэлектронные блоки и чипы.

В чём же особенность прохождения тока через полупроводники? Начнём с характера их проводимости, который принципиально отличается от всего, изученного Вами ранее. Если взять монокристалл чистого *Ge*, то при температуре  $T = 0$  К он окажется диэлектриком, так как концентрация положительных и отрицательных носителей тока будет равна нулю  $n_{Ge}^{T=0} = 0$ . С увеличением температуры начнётся тепловое колебание атомов *Ge*, приводящее к отдельным разрывам ковалентных связей между ними с одновременным переходом валентного электрона в свободное состояние и появлением свободного места от этого электрона в системе связи атомов *Ge – Ge*. Свободный электрон уносит на себе отрицательный заряд, поэтому свободное место от электрона оказывается заряжено положительно. Такое место «сбежавшего» электрона называли **дыркой**. Если другой валентный электрон из соседних связей перескочит в эту дырку, то получится, что электрон перенёс отрицательный заряд ( $e^-$ ) в одну сторону, а дырка перенесла положительный заряд ( $p^+$ ) в другую сторону, ведь теперь дырка находится на месте этого валентного электрона. Количество дырок и электронов в таких монокристаллических полупроводниках при любых температурах будет равно между собой  $N_p = N_e$ , и при наличии внешнего электрического поля они создадут электрический ток. Проводимость в таких чистых полупроводниках носит название **собственная проводимость**, а концентрация носителей невелика  $n_p = n_e \approx 10^{11} \text{ см}^{-3}$ .

Как же повысить концентрацию носителей заряда в полупроводниках? Для этого используют два различных способа, каждый из которых увеличивает концентрацию одного типа носителей. Используя *рис. 23* разберем оба случая, которые объединяет единый принцип – введение в чистые полупроводники примесных атомов как способ получения **примесных полупроводников**.

На *рис. 23, а* показан случай введения в четырёхвалентный *Ge* примеси с большей валентностью (пятивалентного *As*). В этом случае пятый валентный электрон *As* не создает ковалентной связи и становится свободным без образования дырки. Следовательно, при  $T = 0$  концентрация носителей тока будет состоять из свободных электронов, количество которых определяется количеством примесных атомов. С увеличением температуры рост носителей заряда будет аналогичен собственным полупроводникам, но при любой температуре  $n_e > n_p$ . Такие полупроводники называются **донорными** или **электронными**, или ***n*-типа**, а электроны в них – основными носителями (дырки – неосновные).

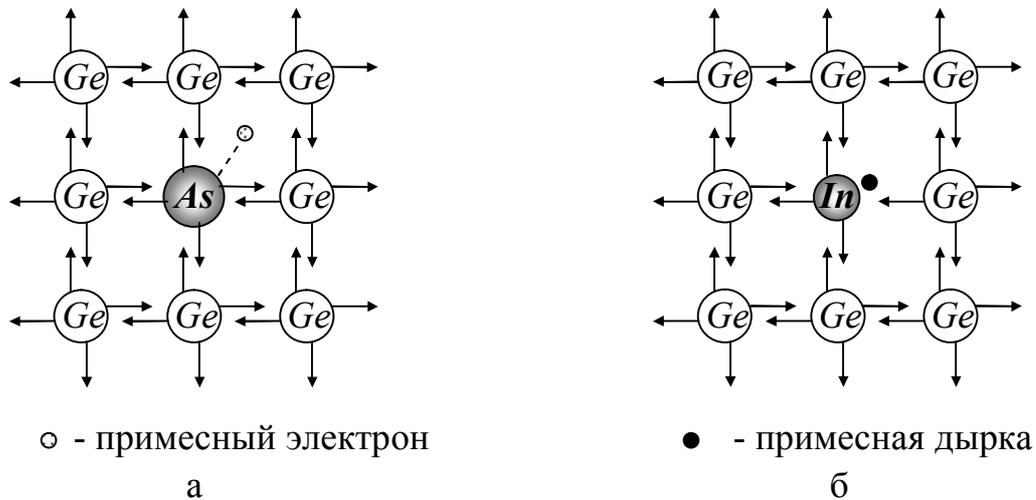


Рис. 23. Примесные полупроводники донорного (а) и акцепторного (б) типа

На рис. 23, б показан случай введения в четырёхвалентный *Ge* примеси с меньшей валентностью (трёхвалентного *In*). В этом случае одна из ковалентных связей оказывается незамкнутой из-за отсутствия необходимого электрона, фактически образуется дырка без появления свободного электрона. Следовательно, при  $T = 0$  концентрация носителей тока будет состоять из дырок, количество которых определяется количеством примесных атомов. С увеличением температуры рост носителей заряда будет аналогичен собственным полупроводникам, но при любой температуре  $n_p > n_e$ . Такие полупроводники называются **акцепторными** или **дырочными**, или **p-типа**, а дырки в них – основными носителями (электроны – неосновные).

Всё это делает привлекательным использование полупроводников, так как в отличие от металлов мы можем регулировать их электрические свойства введением различных примесей.

Несмотря на такое разнообразие типов полупроводников у них много общего:

- 1) электронно-дырочная проводимость;
- 2) при наличии электрического поля носители движутся так же, как в металлах – равноускоренно, до столкновений;
- 3) вольтамперная характеристика линейна – подчиняется закону Ома (рис. 16, б);
- 4) концентрация носителей обоих типов растет с ростом температуры  $n \sim T$ ;
- 5) удельное электросопротивление при увеличении температуры падает  $\rho \sim \frac{1}{T}$  (следствие из п. 4.);

- б) термический коэффициент сопротивления (32) отрицательный  $\alpha_{\text{т}} < 0$  и очень большой по величине.

### Контакт полупроводников $n$ - и $p$ -типов

Перечисленные выше особенности приводят к ряду интересных явлений при контакте полупроводников с различной проводимостью. Разберём простейший случай контакта двух полупроводников, один из которых  $n$ -типа, а другой  $p$ -типа. Технически такой контакт выполняют легируя соседние области единого полупроводникового кристалла различными типами примесей, поэтому на границе  $n$ - и  $p$ - областей нет припоев или других материалов. В этом случае в области контакта ( $p$ - $n$  перехода) сразу же, без подключения внешнего источника тока, возникает диффузия основных носителей в соседний полупроводник и, как следствие, заполнение избыточных дырок избыточными электронами. Этот процесс приводит к резкому понижению концентрации носителей заряда в приграничной области контакта и возрастанию его электросопротивления, что останавливает дальнейшую диффузию носителей тока. Так в приграничной области  $p$ - $n$  перехода возникает запирающий электрический слой, препятствующий движению основных носителей тока.

Если теперь к области  $p$ - $n$  перехода приложить внешнее электрическое поле, подключив отрицательный электрод к электронному полупроводнику, а положительный – к дырочному (рис. 24, а), то по мере роста напряжения запирающий слой будет уменьшаться, и через контакт пойдет электрический ток (основные заряды пересекают  $p$ - $n$  переход). Вольтамперная зависимость

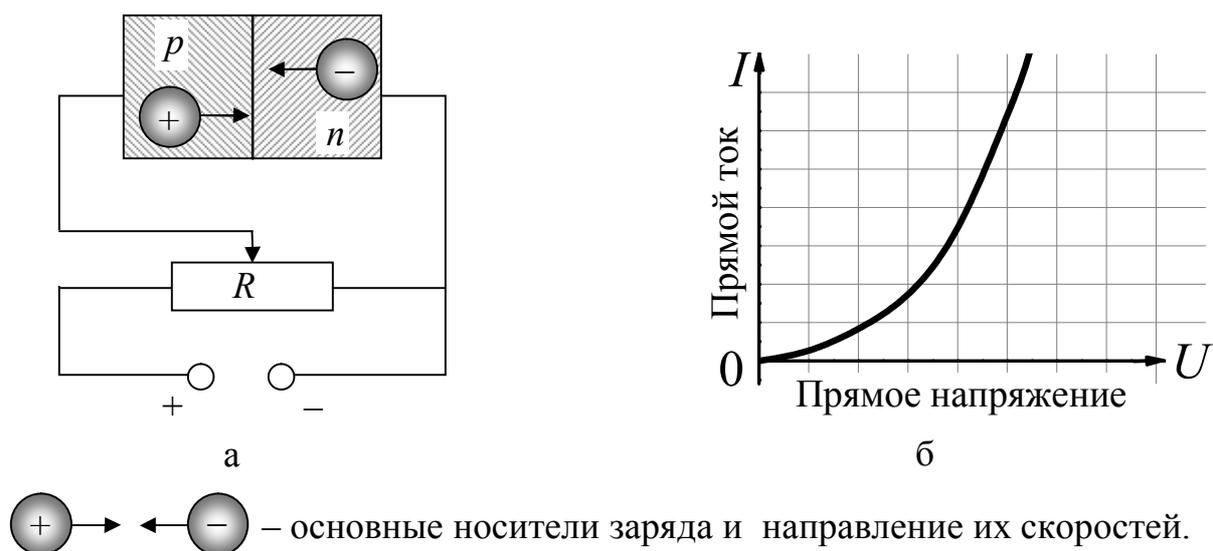
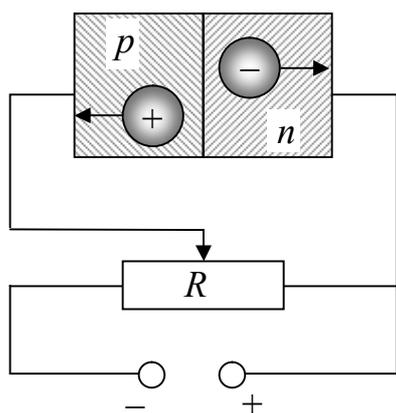


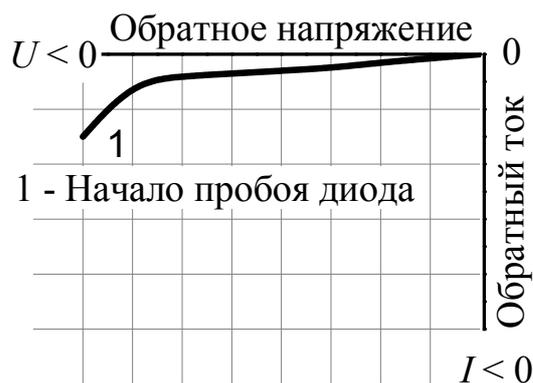
Рис. 24. Схема подключения (а) и вольтамперная зависимость (б) прямого  $p$ - $n$  перехода

такого тока показана на рис. 24, б. Такое подключение внешнего источника тока к  $p-n$  переходу называется прямым подключением, а ток – прямым током  $p-n$  перехода.

Если к области  $p-n$  перехода приложить внешнее электрическое поле, подключив положительный электрод к электронному полупроводнику, а отрицательный – к дырочному (рис. 25, а), то по мере роста напряжения запирающий слой будет увеличиваться, и через контакт  $p-n$  перехода электрический ток не пойдет (основные заряды не пересекают  $p-n$  перехода). Вольтамперная зависимость такого тока показана на рис. 25, б. Такое подключение внешнего источника тока к  $p-n$  переходу называется обратным подключением, а ток – обратным током  $p-n$  перехода. Поэтому на рис. 25, б знак напряжения примем за отрицательный (противоположный прямому подключению) и ток будет идти в противоположную основному току сторону, поэтому его также покажем со знаком минус. В этом случае для получения общей вольтамперной зависимости  $p-n$  перехода рис. 24, б и 25, б можно просто совместить, совместив соответствующие оси.



а



б

← ⊕ ⊖ → – основные носители заряда и направление их скоростей.

Рис. 25. Схема подключения (а) и вольтамперная зависимость (б) обратного  $p-n$  перехода

Следовательно,  $p-n$  переход обладает односторонней проводимостью подобно вакуумному диоду и к настоящему времени практически вытеснил последний из употребления в выпрямительных электронных устройствах. Если создать два  $p-n$  перехода подряд, то мы получим  $p-n-p$  транзистор – электронный переключатель, который можно использовать как усилитель электрических сигналов.

## Раздел IX. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

### Постоянные магниты

Думаю, что с постоянными магнитами в детстве играли почти все, поэтому для Вас не новость, что магнитами называют тела, способные притягивать к себе небольшие железные предметы. Не сложно запомнить, что все постоянные магниты делятся на естественные – куски руды, обладающей магнитными свойствами, и искусственные – тела, сохранившие магнитные свойства после взаимодействия с другими магнитами. Общеизвестно, что магниты имеют два полюса:

северный (N) – полюс, который поворачивается к северу;

южный (S) – полюс, который поворачивается к югу.

Не могут существовать тела с одним магнитным полюсом, так же не может существовать избытка северного или южного магнетизма в одном теле, т. е. магнитные полюса одного тела действуют с равными силами на любое другое тело. Из этого следует, что при делении магнита пополам мы получим два одинаковых магнита с двумя полюсами каждый. Если поделить пополам и эти половинки – получим четыре одинаковых двухполюсных магнита и т. д. Если продолжать этот процесс деления сколь угодно долго, что останется в итоге? АТОМ + АТОМ!!! Следовательно, атом должен представлять из себя двухполюсный магнит, поэтому **элементарный** (наименьший) **магнит** – это атом, в котором электроны вращаются вокруг ядра и создают круговой электрический ток. Сформулируем основные положения гипотезы Ампера о природе магнетизма:

1. Никаких магнитных зарядов не существует.
2. Каждый атом вещества можно рассматривать как круговой ток.
3. Магнитное поле намагниченного тела складывается из магнитных полей этих круговых токов.
4. В ненамагниченном теле все эти элементарные токи направлены хаотично, и их суммарное магнитное поле равно нулю.
5. Намагничивание тела – процесс ориентации элементарных токов под действием внешнего магнитного поля и создание собственного магнитного поля этого тела.

С природой магнетизма разобрались, теперь остановимся на особенностях взаимодействия магнитов. Разноименные магнитные полюса притягиваются (*рис. 26*), одноименные – отталкиваются (*рис. 27*).



Рис. 26. Взаимодействие разноименных магнитных полюсов

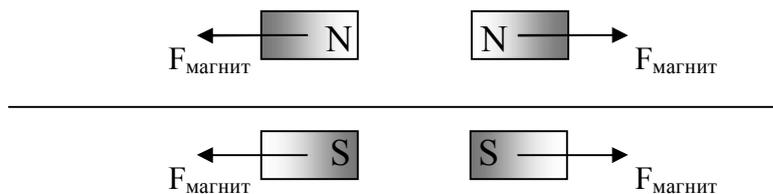


Рис. 27. Взаимодействие одноименных магнитных полюсов

Очень важно, что они начинают взаимодействовать (притягиваться или отталкиваться) на некотором расстоянии без непосредственного контакта. В этом случае, по аналогии с электрическим полем, есть основания ввести понятие магнитного поля. Что же это такое? **Магнитное поле** – это особая форма материи, существующая независимо от нашего знания о нём и осуществляющее взаимодействие между движущимися электрическими зарядами, оно не сводится к более простым вещам, поэтому ограничимся перечислением его основных свойств:

1. Магнитное поле порождается движущимися зарядами (электрическим током).
2. Магнитное поле обнаруживается по действию на движущиеся заряды (электрический ток).
3. Магнитное поле является вихревым полем (не существует магнитных зарядов).

Рассмотрим, как графически изображают магнитные поля на рисунках. По аналогии с линиями напряженности электрического поля (см. *рис. 7*) введем понятие магнитных линий как воображаемых линий, указывающих направление сил, действующих в магнитном поле на магнитные тела.

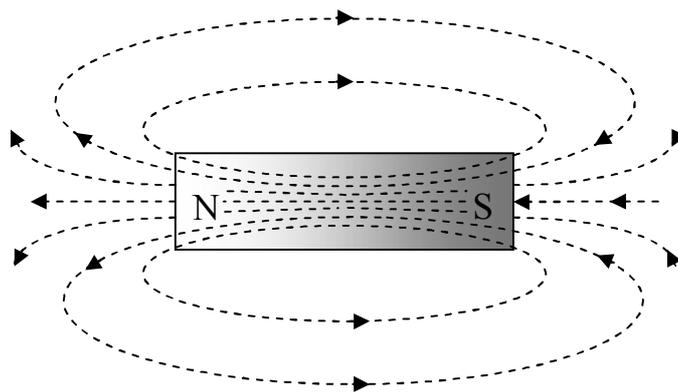


Рис. 28. Изображение магнитного поля плоского магнита при помощи магнитных линий

Каковы свойства магнитных линий? Некоторые из них аналогичны линиям напряженности электрического поля:

а) это воображаемые линии, в природе их не существует;  
б) они непрерывны от начала и до конца;  
в) густота линий характеризует величину магнитных сил, а их равномерность распределения – однородность магнитного поля.

Но существуют и особые свойства магнитных линий:

г) магнитные линии замкнуты (они нигде не начинаются и нигде не заканчиваются, что указывает на вихревую природу магнитного поля);

д) вне магнита магнитные линии направлены от северного полюса к южному.

На основе полученных знаний разберем особенности земного магнетизма, ведь Земной шар – это наибольший магнит используемый человечеством. Раз южный полюс магнитной стрелки указывает на поверхности Земли на юг, значит, **в южном полушарии** в соответствии с *рис. 26* в точке с координатами  $70^{\circ}10'$  южной широты и  $150^{\circ}45'$  восточной долготы **находится Северный магнитный полюс Земли** (именно так, здесь нет никакой опечатки!). Соответственно в северном полушарии в точке с координатами  $70^{\circ}50'$  северной широты и  $96^{\circ}$  западной долготы находится Южный магнитный полюс Земли. При этом схождение магнитных линий земного магнитного поля лежит под поверхностью Земли в точках, расположенных на расстоянии 2300 км (при земном диаметре  $D_3 = 12\,000$  км). Эти точки схождения постоянно меняют свои координаты, а с периодом в 11,5 лет проходят Земные магнитные бури, интенсивно смещающие точки схождения. Сформулируем из сказанного общий вывод: в настоящее время магнитные полюса Земли не совпадают с её географическими полюсами.

### **Магнитное поле постоянного электрического тока**

Рассмотрим возникновение магнитного поля вокруг проводников. При включении тока через проводник близко расположенная магнитная стрелка приходит в движение и располагается по касательной к окружности, мысленно проводимой в поперечной току плоскости (перпендикулярно проводнику с током).

Для более детального изучения этого вопроса целесообразно провести ряд экспериментов, изображенных на *рис. 29* и посвященных исследованию влияния друг на друга двух немагнитных (к примеру – медных) бесконечно длинных проводников. Практическим условием бесконечной длины можно считать случай, когда два проводника расположены на расстоянии, много меньшем, чем их длины. На *рис. 29, а* имеются два близко расположенных проводника, по которым протекает электрический ток в одном и том же направлении – сверху вниз. В процессе эксперимента обнаруживается притяжение таких проводников. При смене в обоих проводниках (*рис. 29, б*) направления тока на противоположное никаких изменений во взаимодействии не наблюдается. Однако когда ток в соседних проводниках направлен в

противоположные стороны (рис. 29, в), проводники отталкиваются друг от друга. Если хотя бы в одном из проводников электрический ток отсутствует (рис. 29, г, д), то никакого взаимодействия между ними не наблюдается. Весь комплекс этих экспериментов показывает, что взаимодействия проводников с током нельзя объяснить электростатическими взаимодействиями, поскольку количество зарядов в проводниках во всех случаях одинаково, а взаимодействие различно. Изменения во взаимодействии происходили при изменении величины или направления тока, следовательно, именно взаимодействие токов вызывает притяжение или отталкивание проводников. Учитывая, что вокруг каждого проводника с током образуется своё магнитное поле (рис. 29, г), можно утверждать, что наблюдаемое явление это результат воздействия магнитного поля одного тока на другой ток, текущий в соседнем проводнике.

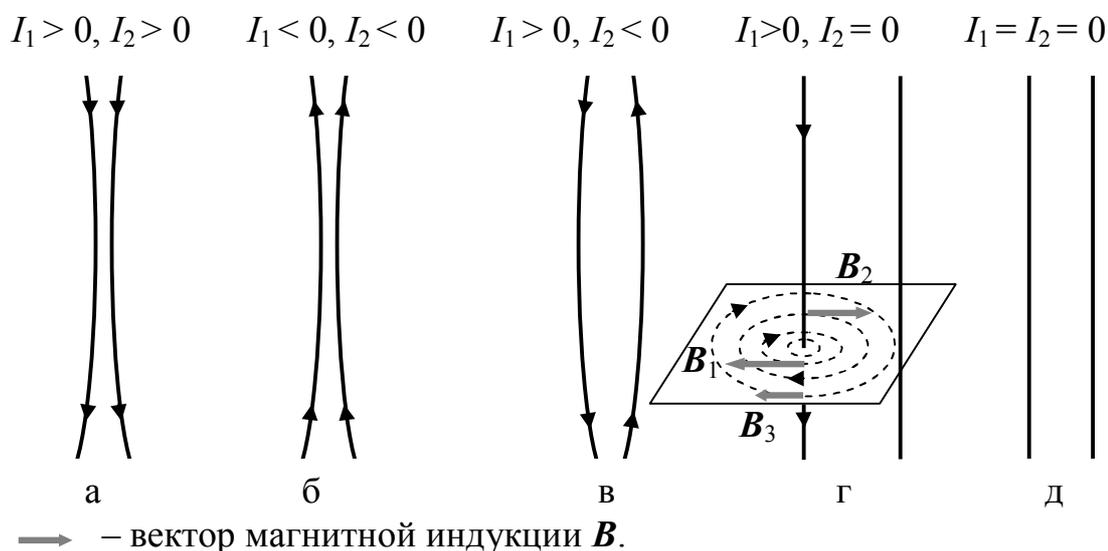


Рис. 29. Взаимодействие постоянных токов в немагнитных проводниках

Магнитное поле, создаваемое постоянным током, занимает всё пространство вокруг проводника и изображается концентрическими окружностями в плоскости, перпендикулярной проводнику с током (рис. 29, г). Определить направление магнитных линий такого поля можно, используя вращающийся колпачок любой авторучки. Для этого необходимо авторучку направить вдоль проводника с током так, чтобы свинчивающийся колпачок совпадал с направлением тока (ток вверх – колпачок сверху, ток вправо – колпачок справа). Удерживая корпус авторучки неподвижно, необходимо медленно скручивать колпачок, наблюдая за направлением его вращения. Это направление вращения и будет направлением магнитных линий поля вокруг проводника с током. Для тренировки определите этим способом направление магнитного поля на рис. 29, в и не забудьте взять на экзамен авторучку с

вращающимся колпачком – ведь никто Вам не запретит держать авторучку на экзамене в руках.

С направлением магнитных полей вокруг тока мы определились, но существуют ли количественные характеристики магнитного поля? Для этого вводят понятие вектора магнитной индукции  $\mathbf{B}$ , изображенного на *рис. 29, г* серыми стрелками. Эти вектора строятся по касательной к магнитным линиям и совпадают с их направлением в любой точке пространства. Длина вектора магнитной индукции  $\mathbf{B}$  характеризует его численное значение, которое можно рассчитать по формуле

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi R}, \quad (52)$$

где  $\mu = \frac{B}{B_0}$  – относительная магнитная проницаемость среды, равная

отношению магнитного поля в данной среде к этому же магнитному полю в вакууме;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $I$  – сила тока, создающего магнитное поле;  $R$  – расстояние от проводника с током до точки измерения магнитной индукции  $\mathbf{B}$  (радиус соответствующей магнитной линии). Единицей измерения вектора магнитной индукции является тесла [Тл].

В однородной среде ( $\mu = \text{const}$ ) в любой точке пространства вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}$  обратно пропорционален расстоянию до проводника (52). На *рис. 29, г* все изображенные вектора  $\mathbf{B}_i$  имеют различную длину так, что  $\mathbf{B}_1 > \mathbf{B}_2 > \mathbf{B}_3$ . Правильность этого подтверждают расчеты  $\mathbf{B}_i$  по (52), так как при одинаковом токе  $I$  соответствующие магнитные линии имеют разные радиусы  $R_1 < R_2 < R_3$ .

### Сила Ампера

А можно ли рассчитать силу взаимодействия бесконечно длинных проводников с током? В этом нет никакого смысла, так как бесконечность проводников приведет к бесконечно большой силе их взаимодействия. Но можно определить силу взаимодействия между участками длиной 1 м двух проводников с токами  $I_1$  и  $I_2$ , и эту силу можно описать следующей формулой:

$$F = \mu\mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi R} = B_1 I_2. \quad (53)$$

Из (53) следует, что вектор магнитной индукции численно равен силе, действующей на 1 м проводника с током в 1 А, перпендикулярным к магнитным линиям. А если проводник и плоскость магнитных линий расположены под углом? В этом случае для расчета силы воздействия магнитного поля необходимо воспользоваться законом Ампера:

$$F_A = IB\ell \sin \alpha, \quad (54)$$

где  $F_A$  – сила Ампера;  $\ell$  – длина участка проводника, подверженная воздействию магнитного поля;  $\alpha$  – угол между направлением тока  $I$  и

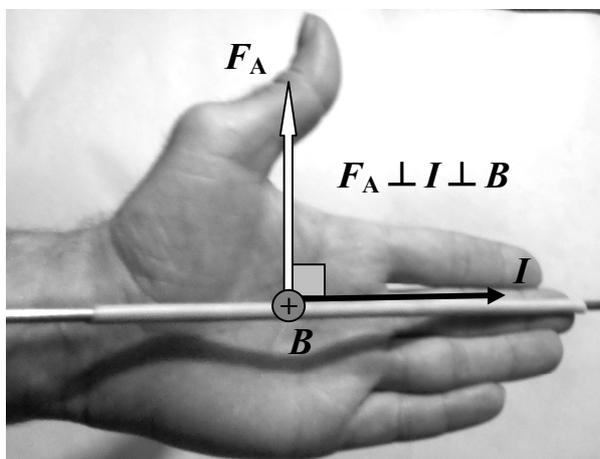
вектором магнитной индукции  $B$ . При  $\alpha = 90^\circ$  сила Ампера достигает максимального значения  $F_A = F_{\max}$ . На *рис. 30* приведены различные случаи применения правила левой руки, помогающего определению направления силы Ампера. Если пальцы сонаправлены с током  $I$ , а вектор  $B$  входит в ладонь под любым углом  $\alpha$ , то отогнутый большой палец сонаправлен с силой Ампера  $F_A$

### Сила Лоренца

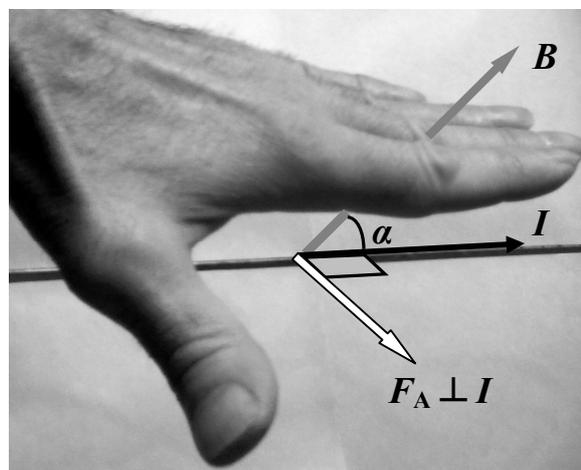
А как будет влиять магнитное поле на движущиеся заряды, если никакого проводника не будет? Вспомните, что ток в вакууме создают свободно летящие электроны! В этом случае необходимо рассчитать величину силы Лоренца, уравнение для которой легко выводится из закона Ампера (54). Силу Ампера  $F_A$  надо разделить на количество движущихся зарядов по участку проводника длиной  $\ell$ , выразив силу тока через (28). Проведя на досуге данные преобразования, Вы получите

$$F_L = \frac{F_A}{N} = \frac{F_A}{nS\ell} = qvB \sin \alpha, \quad (55)$$

где  $\alpha$  – угол между направлением вектора магнитной индукции  $B$  и направлением скорости заряда  $v$ ;  $n$  – концентрация носителей заряда в проводнике.



а



б

⊕ - обозначение вектора  $B$ , входящего остриём в открытую ладонь

Рис. 30. Определение направление силы Ампера  $F_A$  левой рукой

Направление силы Лоренца определяется левой рукой аналогично *рис. 30*, только сомкнутые пальцы направляют вдоль вектора скорости положительного заряда (это направление совпадает с направлением силы тока). Если же будут двигаться электроны, то сомкнутые пальца следует

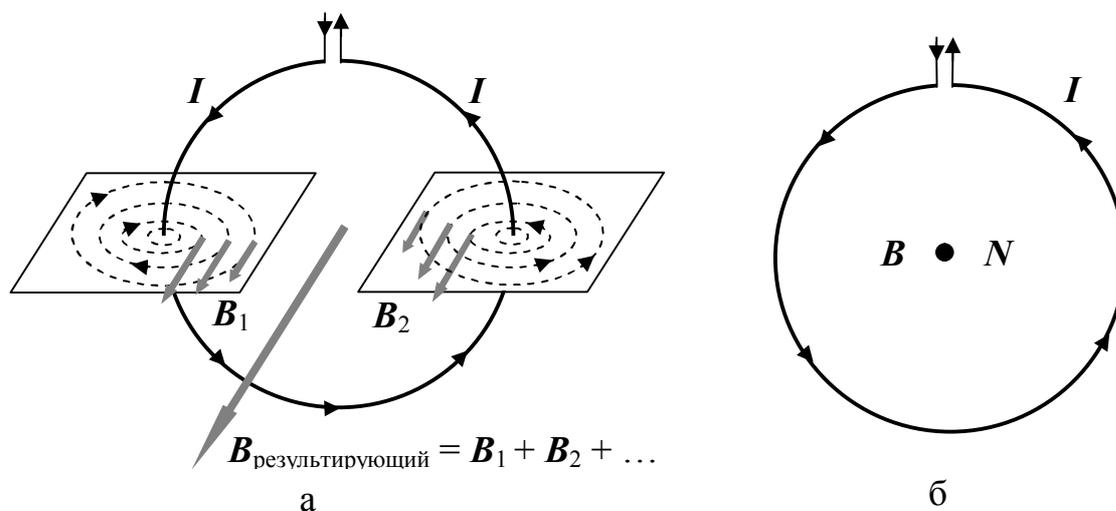
направлять в сторону, противоположную их скорости. В обоих случаях сила Лоренца оказывается перпендикулярна скорости частиц, поэтому сила  $F_{\text{Л}}$  является центростремительной силой. В однородном магнитном поле при  $\alpha = 90^\circ$  сила Лоренца приобретает максимальное значение и заставляет частицы двигаться по окружности радиуса  $R$ :

$$R = \frac{m_q v}{q B}, \quad (56)$$

где  $m_q$  – масса движущейся заряженной частицы. При других значениях угла  $\alpha$  частицы будут двигаться по более сложным траекториям в форме спирали.

### Магнитное поле кругового тока

Как уже говорилось, величина силы взаимодействия магнитного поля с прямым проводником прямо пропорциональна его длине (54). Однако с увеличением длины плотность силы, приходящейся на 1 м проводника, не меняется (53). Для увеличения этого параметра прямые длинные проводники сворачивают в кольца и пропускают по ним ток. В этом случае электрический ток становится круговым током. С особенностями магнитного поля таких токов мы сейчас и познакомимся. На *рис. 31* представлен один круговой виток



- - обозначение вектора  $B$ , выходящего остриём из плоскости листа

Рис. 31. Магнитное поле кругового тока

с током. Хорошо видно, что при круговом токе линии магнитной индукции (пунктирные линии) меняют своё направление в зависимости от участка витка вслед за током. И если в левой части они направлены по часовой стрелке (ток идёт сверху вниз), то в правой – против часовой (ток идёт снизу вверх). Поэтому внутри витка с током вектор магнитной индукции  $B$  суммируется от всех элементов с током и в данном случае будет выходить из витка (смотреть на нас остриём). Схематически такое направление вектора  $B$  можно

изображать точкой в центре витка (рис. 31, б) и сказать, что на нас смотрит северный полюс электромагнита, созданного током (рис. 31, б). При изменении направления тока на обратный вектор магнитной индукции так же изменит направление на противоположное, тогда к нам будет обращён южный полюс магнитного поля.

Численное значение вектора магнитной индукции в центре витка можно рассчитать по формуле

$$B_{\text{витка}} = \mu\mu_0 \frac{I}{2R}, \quad (57)$$

где  $R$  – радиус витка с током.

Если на некую основу намотать длинный провод так, чтобы витки плотно прилегали друг с другом в один ряд, а затем основу удалить, то при условии, что длина оси набора витков будет много больше их радиуса  $\ell \gg R$ , получится **соленоид**, магнитное поле внутри которого на оси симметрии можно рассчитать как

$$B_{\text{соленоида}} = \mu\mu_0 I \frac{N}{\ell}, \quad (58)$$

где  $N$  – количество витков провода;  $\ell$  – длина оси соленоида. Определение направления магнитного поля и магнитных полюсов соленоида полностью идентично случаю одного витка (рис. 31), ведь во всех витках соленоида ток течет в одну сторону. А если внутрь соленоида вставить сердечник с высоким значением магнитной проницаемости  $\mu$ , то получится электромагнит.

### Магнитные свойства вещества

Какими же бывают магнитные проницаемости  $\mu$  в различных веществах, и каких значений они достигают? Вот на эти вопросы давайте найдем ответы. Все вещества по своим магнитным свойствам делятся на три групп: **диамагнетики**, **парамагнетики** и **ферромагнетики**.

Диамагнетиками называют вещества, атомы которых без внешнего магнитного поля не обладают магнитными свойствами. Во внешнем магнитном поле у них возникает собственное магнитное поле, направленное всегда против внешнего, и оба поля внутри диамагнетиков вычитаются друг из друга. Для этих веществ магнитная проницаемость меньше единицы  $\mu_{\text{д}} \leq 1$  и слабо уменьшается от внешнего магнитного поля. Примерами диамагнетиков являются сера, медь, висмут. Для висмута  $\mu_{\text{Вi}} = 0.999824$ .

Парамагнетиками называют вещества, атомы которых без внешнего магнитного поля представляют собой элементарные магниты. Во внешнем магнитном поле по нему ориентируются собственные магнитные поля атомов, и поля внутри парамагнетиков складываются. Для этих веществ магнитная проницаемость больше единицы  $\mu_{\text{п}} \geq 1$  и слабо увеличивается от внешнего

магнитного поля. Примерами парамагнетиков являются натрий, калий, воздух. Для воздуха  $\mu_{\text{воздуха}} = 1,000038$ .

Ферромагнетиками являются вещества, имеющие доменную структуру. Домен – это ограниченная область с размерами  $10^{-2} - 10^{-3}$  см, имеющая самопроизвольную намагниченность, отличающуюся от направления намагниченности соседних областей (доменов). Без внешнего магнитного поля разориентация доменов приводит к отсутствию собственного магнитного поля внутри вещества. При внесении во внешнее магнитное поле ( $B_0 > 0$ ) в ферромагнетиках происходит самопроизвольная скачкообразная ориентация доменов по внешнему полю. Этот процесс при увеличении внешнего поля заканчивается переориентацией всех доменов, даже тех, которые были ориентированы противоположно внешнему полю. Наступает магнитное насыщение ферромагнетика. Внутри ферромагнетика внешнее поле складывается с полем всех доменов и достигает огромных значений, поэтому  $\mu_{\text{Ф}} \gg 1$ . Примерами ферромагнетиков являются кобальт, никель, железо. В ферритах  $\mu \geq 10\,000$ .

При уменьшении внешнего поля начинается самопроизвольная скачкообразная разориентация доменов, однако даже при уменьшении внешнего поля до нуля ( $B_0 = 0$ ) часть доменов сохранит полученную ориентацию. В этом случае образуется постоянный магнит за счёт остаточной намагниченности. Однако с повышением температуры остаточная намагниченность ослабевает, и при достижении определенной температуры  $T_K$ , называемой точкой Кюри (различной для различных ферромагнетиков), домены распадаются, вещество теряет ферромагнитные свойства и становится парамагнетиком.

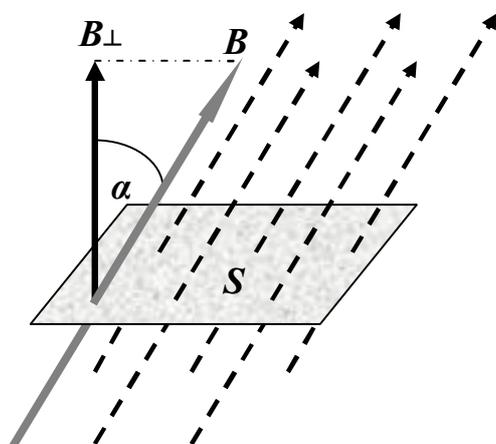
Есть и другой путь избавиться от намагниченности ферромагнетика – приложить противоположное внешнее поле ( $B_0 < 0$ ), увеличивая его по модулю до исчезновения остаточной намагниченности. Чем большее внешнее магнитное поле для этого требуется, тем выше энергия перемагничивания ферромагнетика, тем он жёстче. Для создания постоянных магнитов подходят жесткие ферромагнетики, для создания электромагнитов – мягкие.

## Раздел X. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

### Магнитный поток

Ранее мы выяснили, что вокруг проводников с током всегда возникает магнитное поле. В этом разделе Вы узнаете условия, при которых выполняется обратная задача – возникновение электрического тока в проводниках, находящихся в магнитном поле. Такое явление и называется **электромагнитной индукцией**. Сначала давайте введём новую магнитную скалярную величину – **магнитный поток**, который можно рассчитать по

уравнению представленному ниже, если поверхность площадью  $S$  пронизывает магнитное поле с вектором магнитной индукции  $\mathbf{B}$  (рис. 32).



$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha = B_\perp \cdot S. \quad (59)$$

Единица измерения – Вебер [Вб].

Рис. 32. Магнитный поток, пронизывающий площадь  $S$

Магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий поверхность, численно равен произведению перпендикулярной составляющей вектора магнитной индукции  $B_\perp$  на площадь поверхности  $S$  (59). Магнитный поток считают положительным, если угол  $\alpha$  острый ( $\alpha < 90^\circ$ ), и отрицательным, если  $\alpha > 90^\circ$ . При  $\alpha = 90^\circ$  вектор  $\mathbf{B}$  направлен вдоль поверхности и не пересекает её, поэтому  $B_\perp = 0$  и магнитный поток через поверхность отсутствует,  $\Phi = 0$ . Так как в расчете магнитного потока (59) участвуют три величины, то имеется **три способа изменения магнитного потока**: первый – изменение вектора магнитной индукции; второй – изменение площади поверхности; третий – изменение угла наклона вектора  $\mathbf{B}$  к поверхности. Разберите самостоятельно, к каким изменениям потока приводит увеличение каждой из этих величин, а к каким – их уменьшение.

### Правило Ленца

Электромагнитная индукция возникает при изменении магнитного потока, пронизывающего контур, ограниченный замкнутым электрическим проводом. При наблюдении электромагнитной индукции для усиления эффекта используют не один проволочный виток, а соленоид, замкнутый на микроамперметр (или гальванометр) (рис. 33). **Правило** русского ученого **Ленца** определяет направление индукционного тока в проволочном витке или соленоиде: **Индукционный ток имеет такое направление, что его собственный магнитный поток препятствует изменению магнитного потока, вызвавшего этот ток.**

Рассмотрим это правило подробнее. То, что ток имеет направление, сомнений ни у кого не возникает. Ясно, что ток будет идти по кругу, но в

каком направлении? Вот на этот вопрос и отвечает правило Ленца. В этом правиле упоминаются два различных магнитных потока. Один – это магнитный поток, вызвавший ток, т. е. внешний магнитный поток  $\Phi_B$ , пронизывающий контур (соленоид). Второй – собственный магнитный поток самого соленоида  $\Phi_C$ , возникший от протекания индукционного тока по контуру. Первый поток  $\Phi_B$  независим – он может меняться любым образом – оставаться постоянным, расти или уменьшаться, факторы, изменяющие его, мы уже разобрали ранее (59). Второй поток  $\Phi_C$  – зависим, он всегда препятствует изменению первого потока. Если внешний поток постоянен  $\Phi_B = \text{const}$ , то  $\Phi_C = 0$ . Если  $\Phi_B$  растёт, то  $\Phi_C$  будет иметь противоположное направление (и знак тоже)  $\Phi_B \uparrow \downarrow \Phi_C$ . Если  $\Phi_B$  уменьшается, то  $\Phi_C$  будет совпадать с ним по направлению  $\Phi_B \uparrow \uparrow \Phi_C$  и по знаку.

Разберём конкретный пример, приведенный на *рис. 33*. К соленоиду приближают постоянный магнит южным полюсом. Плотность магнитных линий, пронизывающих соленоид возрастает по мере приближения магнита, поэтому возрастает внешний магнитный поток  $\Phi_B$ . По правилу Ленца собственный магнитный поток соленоида  $\Phi_C$  будет препятствовать

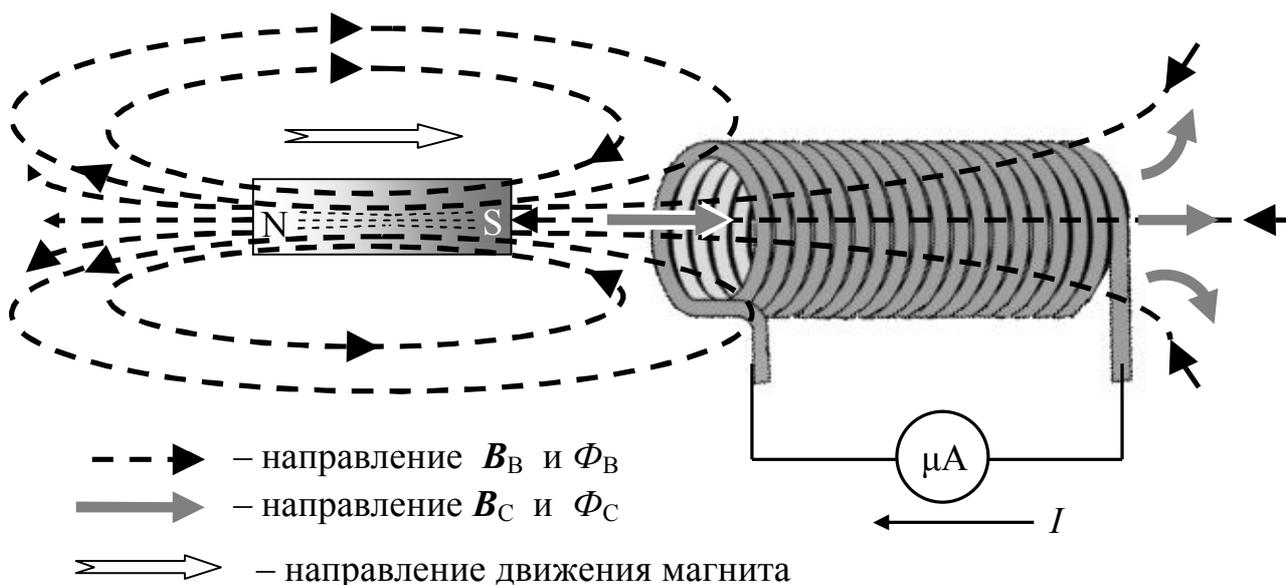


Рис. 33. Направление индукционного тока по правилу Ленца

увеличению  $\Phi_B$ , т. е. будет направлен в противоположную сторону. Это и иллюстрируется соответствующими стрелками на *рис. 33*. Видно, что  $B_C$  выходит из соленоида справа, следовательно, справа у соленоида северный полюс. Полюс соленоида всегда определяется по направлению его собственного магнитного поля. Теперь можно переходить к определению направления тока через микроамперметр. Используем правило колпачка и, направляя авторучку колпачком вправо (по направлению  $B_C$ ), начинаем

медленно вращать колпачок. Его направление вращения совпадает с направлением вращения электрического тока в соленоиде, поэтому ток по правому выходу из соленоида спускается по проводам к измерительному прибору и идет через микроамперметр слева направо. При увеличении скорости движения магнита индукционный ток, измеряемый прибором, будет возрастать. Учитывая относительность скорости (вспомните механику!) всё вышесказанное будет справедливо, если соленоид приближать к южному полюсу магнита. Если в случае, изображенном на *рис. 33*, мы начнём удалять магнит,  $\Phi_B$  начнёт уменьшаться,  $\Phi_C$ , препятствуя этому, будет сонаправлено с внешним полем и северный полюс соленоида окажется слева. Теперь самостоятельно завершите разбор и определите направление тока в этом случае.

Если проводящее кольцо свободно подвесить и приблизить к нему магнит, то в кольце возникнет индукционный ток и собственное магнитное поле.  $\Phi_B$  и  $\Phi_C$  будут направлены противоположно (т. е. иметь разные знаки), следовательно, появляются два магнита, направленные друг к другу одинаковыми полюсами, поэтому кольцо начнет отталкиваться от магнита. Такое взаимодействие возможно только при электрически замкнутом кольце, так как в любом другом случае индукционный ток из-за разрыва цепи не пойдёт. Случай удаления магнита разберите самостоятельно.

Вместо постоянных магнитов для создания индукционного тока можно использовать и электромагниты, всё сказанное выше будет справедливо и в этом случае.

### **Закон электромагнитной индукции**

Кое-кто из Вас видимо недоумевает, как может идти электрический ток по замкнутому контуру, если в электрической цепи отсутствует источник тока? Ведь это одно из необходимых условий появления тока в цепи. Вернитесь к *табл.1* и посмотрите на характеристики генератора. Всё, описанное нами при разборе *рис. 33*, совпадает с этими характеристиками: движение зарядов в магнитном поле, механическая работа по перемещению магнита. Главное отличие в способе изменения магнитного потока. В генераторе якорь, аналог нашего соленоида, вращается в магнитном поле, т. е. непрерывно меняет угол  $\alpha$ , что и приводит к разделению зарядов. Следовательно, на *рис. 33* приведена модель простейшего электрогенератора, так что источник тока у нас в цепи есть. Осталось разобраться с его электрическими параметрами.

Мы уже отмечали, что величина индукционного тока  $I_i$  зависит от скорости изменения магнитного потока  $\Delta\Phi$ :

$$I_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (60)$$

С другой стороны, в замкнутой цепи согласно закону Ома (36),  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ , следовательно, для нашего случая можно записать

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R} \quad \Rightarrow \quad I_i \sim \mathcal{E}_i, \quad (61)$$

где  $\mathcal{E}_i$  – электродвижущая сила электромагнитной индукции;  $R$  – электросопротивление контура (соленоида). Из (60) и (61) следует, что ЭДС индукции

$$|\mathcal{E}_i| \sim \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| \sim |\Phi'|, \quad (62)$$

где  $\Phi'$  – производная магнитного потока по времени. Почему в уравнении (62) поставлены модули величин? Потому, что знак ЭДС индукции определяется соотношением направлений  $\Phi_B$  и  $\Phi_C$ . Когда  $\Phi_B \uparrow \uparrow \Phi_C$   $\mathcal{E}_i > 0$ , но  $\Delta\Phi < 0$ , так как поток убывает. Когда  $\Phi_B \uparrow \downarrow \Phi_C$   $\mathcal{E}_i < 0$ , но  $\Delta\Phi > 0$ , так как поток возрастает. Можно сделать вывод, что ЭДС индукции и изменение магнитного потока всегда имеют разные знаки. Для случая одного витка можно записать

$$\mathcal{E}_i^0 = -\frac{\Delta\Phi_0}{\Delta t} = -\Phi_0', \quad (63)$$

где  $\mathcal{E}_i^0$  – ЭДС индукции одного витка,  $\Phi_0$  – магнитный поток, пронизывающий один виток. **Это уравнение является законом электромагнитной индукции.** ЭДС индукции равна скорости изменения магнитного потока с противоположным знаком. Если в контуре имеется несколько витков, как в соленоиде, то ЭДС индукции можно вычислить следующим образом:

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_i^0 N = -\frac{\Delta\Phi_0}{\Delta t} N = -\Phi_0' N, \quad (64)$$

где  $\mathcal{E}_i^0$  – ЭДС индукции одного витка;  $N$  – количество витков в соленоиде;  $\Phi_0$  – магнитный поток, пронизывающий один виток.

Вот мы и познакомились с **вихревым электрическим полем**, которое, в отличие от электростатического, не связано с неподвижными зарядами, а возникает при движении зарядов в магнитном поле. Каковы же основные **свойства вихревого электрического поля?**

а) поле безысточниковое, непотенциальное, некулоновское;

- б) ЭДС индукции численно равна работе вихревого поля по перемещению единичного положительного заряда на замкнутом пути;
- в) линии напряженности электрического поля замкнуты сами на себя;
- г) направление линий напряженности совпадает с направлением индукционного тока;
- д) величина вектора напряженности вихревого электрического поля  $E$  прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока  $\Phi$ .

### ЭДС индукции в движущихся проводниках

Если проводник движется в магнитном поле, следовательно, в магнитном поле движутся находящиеся в проводнике свободные носители заряда и под действием силы Лоренца (55) в зависимости от знака они должны смещаться к тому или иному концу проводника. Таким образом, в движущемся проводнике происходит разделение зарядов: отрицательные накапливаются на одном конце проводника, а положительные – на противоположном. Возникающая при этом ЭДС, определяется по закону электромагнитной индукции. Попробуем рассчитать её величину.

Пусть проводник длиной  $\ell$  движется в постоянном магнитном поле  $B$  со скоростью  $v$  и, следовательно, за 1 с проходит расстояние, численно равное  $v$  (рис. 34). Тогда площадь описанной проводником фигуры составит произведение  $S = \ell \cdot v$ , и проводник пересечёт магнитный поток, который можно определить по (59). В результате преобразований, используя (63) для ЭДС электромагнитной индукции, в проводнике получим (65).

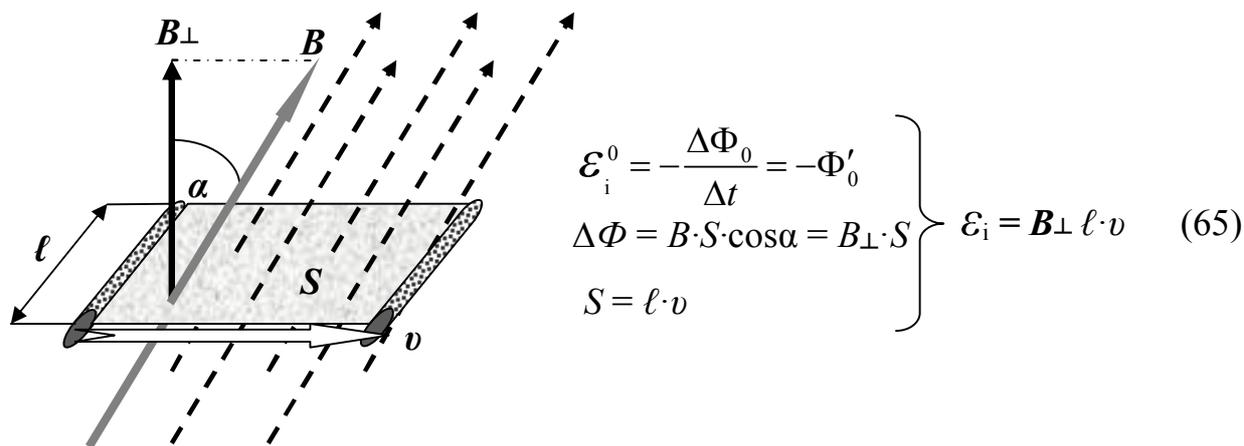


Рис. 34. ЭДС электромагнитной индукции при движении проводника

Для определения направления напряженности создаваемого электрического поля в проводнике используется то же правило, что и для силы Лоренца – правило левой руки (рис. 30). Только сомкнутые пальцы направлены по направлению скорости проводника  $v$ , тогда отогнутый большой

палец укажет направление напряженности стороннего электрического поля и направление смещения положительных зарядов в проводнике. Отрицательные заряды будут смещаться к противоположному концу проводника.

В заключение, забегаая немного вперед, отметим, что вращение проводящей рамки в магнитном поле – это тоже движение проводника. При вращении прямоугольной рамки площадью  $S$  в однородном магнитном поле с угловой скоростью  $\omega$  так, что ось вращения перпендикулярна  $\mathbf{B}$ , ЭДС индукции окажется равна

$$\mathcal{E}_i = BS \omega \sin \omega t. \quad (66)$$

Если же весь контур движется в однородном магнитном поле поступательно, сохраняя неизменной свою площадь и ориентацию по отношению к вектору  $\mathbf{B}$ , то согласно (62–64) ЭДС индукции возникать не будет,  $\mathcal{E}_i = 0$ .

### Самоиндукция. Индуктивность

Обращаю Ваше внимание, что изменение внешнего магнитного потока, пронизывающего контур или соленоид – признак переменного магнитного поля по отношению к соленоиду. Поэтому, можно сказать, что до сих пор мы изучали возникновение тока в контуре, находящемся в переменном магнитном поле. А что, если без всякого внешнего магнитного поля через соленоид пропустить электрический ток? Оказывается, это позволит обнаружить новое явление – плавное нарастание силы тока при подключении источника тока и плавное уменьшение тока при отключении источника. В чём здесь дело? Как может идти ток, если источник уже отключён и цепь разорвана? Давайте разберёмся.

До включения тока в соленоиде магнитное поле отсутствует. При подключении внешнего источника ток через соленоид растёт и, как следствие, изменяется магнитное поле в соленоиде – оно тоже растёт. Однако оно играет роль внешнего магнитного поля  $\mathbf{B}_B$ , которое увеличивается и вызывает появление собственного магнитного поля  $\mathbf{B}_C$  (см. рис. 33) в соленоиде, препятствующего дальнейшему росту тока. Поле  $\mathbf{B}_C$  вызвано появлением ЭДС индукции в соленоиде. Это явление называется самоиндукцией. Именно **самоиндукция** – возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нём силы тока – является причиной плавного нарастания тока при включении. Такую ЭДС принято называть ЭДС самоиндукции и обозначать  $\mathcal{E}_{si}$ .

$$\mathcal{E}_{si} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -L I' = -\Phi'_s, \quad (67)$$

где  $\frac{\Delta I}{\Delta t} = I'$  – скорость изменения силы тока в соленоиде;  $\Phi'_s$  – скорость изменения магнитного потока самоиндукции;  $L$  – индуктивность контура.

Как видно из (67), индуктивность  $L$  – это коэффициент пропорциональности, численно равный ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_{si}$  при скорости изменения силы тока на 1 А за 1 с. Кроме того, индуктивность численно равна магнитному потоку, создаваемому контуром при пропускании через контур тока силой 1 А

$$L = \frac{\Phi}{I} . \quad (68)$$

Независимо от выбора определения индуктивности через (67) или (68)  $L$  любого контура зависит от его формы, размеров и магнитной проницаемости среды, заполняющей пространство между витками, измеряется в Генри [Гн] и для соленоида может быть рассчитана как

$$L = \mu\mu_0 n^2 V = \mu\mu_0 N^2 \frac{S}{\ell}, \quad (69)$$

где  $n = \frac{N}{\ell}$  – плотность витков соленоида, т. е. количество витков, приходящихся на 1 м длины соленоида;  $N$  – общее количество витков в соленоиде;  $\ell$  – длина соленоида;  $S$  – площадь сечения одного витка;  $V = S \cdot \ell$  – объём соленоида. Чем меньше соотношение  $\frac{S}{\ell}$ , тем точнее результаты расчета.

При выключении тока от внешнего источника в соленоиде возникает индукционный ток, сонаправленный с током от внешнего источника, поэтому электрический ток будет идти в соленоиде после отключения внешнего источника тока, пока магнитный поток самоиндукции плавно не уменьшится до нуля. Получается, что энергия магнитного поля, созданного при включении тока, преобразуется в электрическую энергию при выключении тока. Кто-нибудь из нетерпеливых воскликнет: «А ведь об энергии магнитного поля мы еще ничего не сказали!»

### Энергия магнитного поля

А вот и неправда! Сказано главное – при выключении тока через соленоид энергия магнитного поля переходит в энергию тока, идущего после отключения источника тока. Если нам удастся написать выражение для энергии электрического тока, то останется приравнять к этой величине

энергию магнитного поля. Ток – это направленное движение зарядов и, согласно (28),  $I \sim v_q$ . Следовательно, электрический ток может играть роль скорости в уравнении энергии тока. С другой стороны, чем выше индуктивность соленоида, тем медленнее падает величина тока (читай – скорость зарядов) при выключении. Можно сделать вывод, что индуктивность играет роль массы. Не вдаваясь в детали, отметим, что энергия электрического тока соленоида  $W$  по аналогии с кинетической энергией в механике должна записываться как

$$W_I = \frac{LI^2}{2}, \quad (70)$$

где  $I$  – значение стационарного тока через соленоид перед отключением источника. Тогда, используя (69), можно получить энергию магнитного поля  $W_M$ , сосредоточенную в объеме  $V$ :

$$W_I = W_B = \frac{\mu\mu_0 n^2 I^2}{2} V. \quad (71)$$

Ну и что же в этом уравнении от магнитного поля кроме названия? Воспользуемся уравнением (58) и проведём преобразования:

$$\left. \begin{array}{l} W_B = \frac{\mu\mu_0 n^2 I^2}{2} V \\ B_{\text{соленоида}} = \mu\mu_0 I \frac{N}{\ell} = \mu\mu_0 I n \end{array} \right\} W_B = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} V. \quad (72)$$

Теперь нет сомнений, что энергия магнитного поля определяется только значением вектора магнитной индукции  $B$  внутри соленоида, объёмом этого соленоида  $V$  и магнитной проницаемостью среды внутри соленоида  $\mu\mu_0$ .

А разве магнитное поле может существовать только в соленоиде? Нет, конечно, выражение (72) справедливо только для однородных магнитных полей. Но, выбравшись в неограниченное ничем пространство, нельзя определить его объём и рассчитать энергию. Как же быть? Для таких случаев рассчитывают не энергию, а плотность энергии магнитного поля  $w$ :

$$w_B = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}. \quad (73)$$

Выражение (73), в отличие от (72), позволяет рассчитать значение плотности энергии любых, даже переменных магнитных полей.

В случае одновременного существования электростатического (26) и магнитного (73) полей плотности их энергий складываются в объёмную плотность электромагнитной энергии:

$$w_{EB} = w_E + w_B = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu\mu_0}. \quad (74)$$

## Раздел XI. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

### Закрытый колебательный контур

Теперь давайте изучим особенности перехода энергии электрического поля (формулы (25), (26)) в магнитную энергию (формулы (70) - (73)). Для этого соберём электрическую цепь, представленную на *рис. 35*, в которой конденсатор и соленоид соединены идеальными сверхпроводящими проводами, электрическое сопротивление которых равно нулю  $R = 0$ . Это избавит нашу схему от потери энергии на разогревание проводов за счёт джоулева тепла (39). Такая схема носит название **закрытый колебательный контур**.

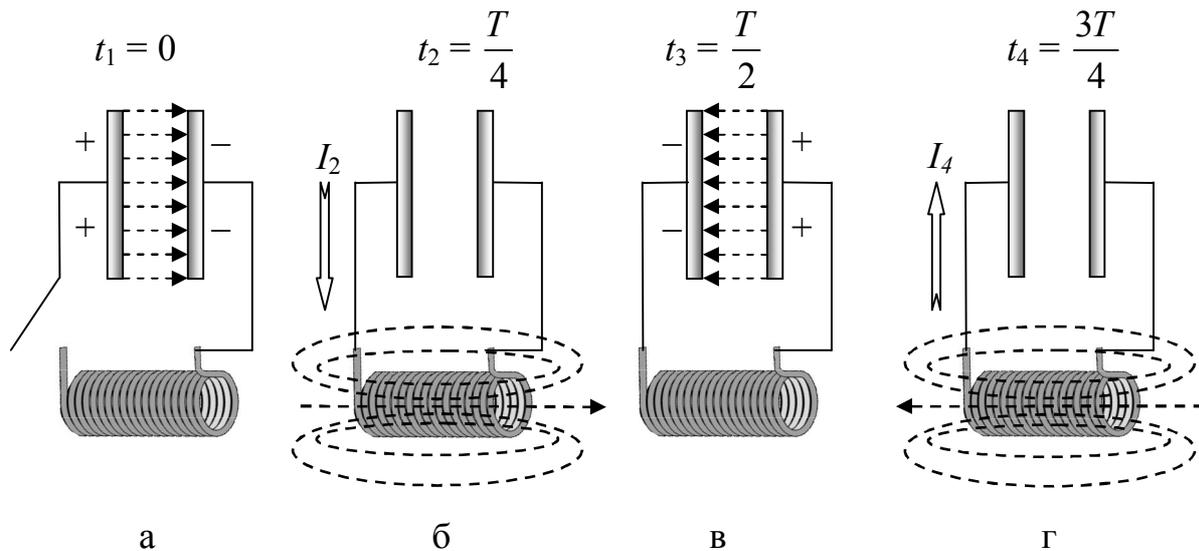


Рис. 35. Электромагнитные колебания в закрытом колебательном контуре

Рассмотрим **первое (начальное) состояние колебательного контура**. Если конденсатор перед подключением к цепи полностью зарядить, то в нём будет содержаться энергия электрического поля  $W_{E1} = W_{E_{\max}}$  (25), электрический заряд  $q_1 = q_{\max}$  и разность потенциалов  $U_1 = U_{\max}$  (20). Пока ключ разомкнут (*рис. 35, а*), электрический ток не идёт  $I_1 = 0$ , магнитное поле в колебательном контуре отсутствует  $B_1 = 0$ , и энергия магнитного поля

равна нулю  $W_{B_1} = 0$ . Значит, вся энергия системы сосредоточена в конденсаторе  $W_{EB_1} = W_{E_{\max}} = \frac{q^2}{2C}$ .

При замыкании ключа электрический ток из-за явления самоиндукции в соленоиде не сразу становится максимальным, а плавно нарастает до максимального значения  $I_2 = I_{\max}$ , при этом энергия окажется полностью сосредоточена в соленоиде  $W_{EB_2} = W_{B_{\max}} = \frac{LI^2}{2}$ . Наступает **второе состояние колебательного контура** (рис. 35, б). В этом случае электрические параметры равны нулю  $q_2 = 0$ ,  $U_2 = 0$ ,  $W_{E_2} = 0$ , и фактически исчезает внешний источник тока.

Но самоиндукция вновь препятствует изменению (теперь уже уменьшению) тока, поэтому последний, медленно уменьшаясь, перезаряжает конденсатор так, что знаки зарядов на обкладках становятся противоположны исходному состоянию. При достижении  $-q_{\max} = q_3$ ,  $-U_{\max} = U_3$ ,  $W_{EB_3} = W_{E_{\max}}$  ток прекращается. В этот момент  $I_3 = 0$ ,  $W_{B_3} = 0$  и **колебательный контур оказывается в третьем состоянии** (рис. 35, в).

Теперь начинается разрядка конденсатора через соленоид, но ток противоположен начальному направлению  $I_4 \uparrow \downarrow I_2$ , так как электрическое поле в конденсаторе направлено в противоположную сторону по отношению к начальному. Поэтому через **четвертое состояние колебательного контура** (рис. 35, г), при котором  $I_4 = -I_{\max}$ ,  $W_{EB_4} = W_{B_{\max}}$ ,  $q_4 = 0$ ,  $U_4 = 0$ ,  $W_{E_4} = 0$ , восстанавливаются начальные условия заряда конденсатора. Снова  $q_1 = q_{\max}$ ,  $U_1 = U_{\max}$ , и вся энергия системы сосредоточена в конденсаторе  $W_{EB} = W_{E_{\max}}$ . Колебательный контур готов к повторению цикла электромагнитных колебаний. В промежуточных состояниях колебательного процесса в контуре одновременно существуют оба вида энергии – электрическая и магнитная, поэтому в общем виде энергия колебательного контура записывается как

$$W_{EB} = W_E + W_B = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2}. \quad (75)$$

А для нашего случая, когда электрическое сопротивление отсутствует  $R = 0$ , энергия колебательного контура в целом не меняется:

$$W_{EB} = W_E + W_B = \text{const}. \quad (76)$$

Соотношение между  $W_E$  и  $W_B$  в (75) и (76), значения конкретных электрических параметров ( $q$ ,  $U$ ,  $I$ ) в каждый момент времени определяются фазой колебаний ( $\omega t + \varphi_0$ ), исходным значением заряда конденсатор и величинами ёмкости и индуктивности элементов закрытого колебательного контура. Законы изменения электрических величин имеют гармонический вид  $q = q_{\max} \cos(\omega_0 t)$ ,  $U = U_{\max} \cos(\omega_0 t)$ ,  $I = I_{\max} \cos(\omega_0 t - \pi/2) = I_{\max} \sin(\omega_0 t)$ . (77)

Из (77) можно сделать следующие **выводы**:

1. Все величины изменяются по гармоническому закону.
2. Заряд конденсатора и его напряжение изменяются по закону косинуса.
3. Сила тока меняется по закону синуса.
4. Колебания силы тока отстают по фазе от колебаний заряда на  $\pi/2$  или  $90^\circ$ .

### **Частота собственных колебаний колебательного контура**

Время, затраченное на все описанные преобразования в контуре, называется периодом собственных колебаний (см. ч. I, с. 34–36) и обозначается  $T$ . От чего же зависит период собственных колебаний закрытого колебательного контура? Он определяется только величинами индуктивности катушки и ёмкостью конденсатора, включенных в цепь. Рассчитать период можно по уравнению

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (78)$$

Важным является равномерность описанного процесса и равенство времени перехода между соседними состояниями. Если момент замыкания ключа принять за  $t_1 = 0$ , то второе состояние наступит при  $t_2 = \frac{T}{4}$ , третье – при  $t_3 = \frac{2T}{4} = \frac{T}{2}$ , четвёртое – при  $t_4 = \frac{3T}{4}$ , и при  $t = \frac{4T}{4} = T$  вновь наступит первое состояние колебательной системы.

Как Вы помните из I части пособия, колебательные системы, описываются не только периодом, но и частотой колебаний. Циклическая частота колебаний закрытого колебательного контура в общем случае (при наличии электрического сопротивления проводов и связанного с этим процесса затухания колебаний) имеет вид

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (79)$$

Для рассмотренного нами процесса при  $R = 0$  выражение (79) упрощается:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (80)$$

и превращается в циклическую частоту свободных незатухающих колебаний, которую иначе называют собственной частотой колебательного контура.

### **Вынужденные электромагнитные колебания. Активное сопротивление**

Вынужденными электрическими колебаниями являются переменные токи, возникающие под действием внешней периодически меняющейся ЭДС. Исходя из (77) будем рассматривать только токи, меняющиеся по

синусоидальному закону. Для появления таких токов в цепи необходимо иметь соответствующую ЭДС

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\max} \sin(\omega t), \quad (81)$$

где  $\mathcal{E}_{\max} = BS\omega$  – амплитудное значение ЭДС. Такая электродвижущая сила возникает в рамке, вращающейся с угловой скоростью  $\omega$  в постоянном магнитном поле (66). Поэтому генераторы переменного тока имеют две обмотки, одна из которых неподвижна – это статор, создающий магнитный поток. А другая обмотка расположена в пазах вращающегося сердечника – ротора, в котором индуцируется переменная ЭДС. Если обмотку замкнуть на омическое электрическое сопротивление  $R$ , при вращении ротора в цепи пойдёт электрический ток:

$$I = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R} \sin(\omega t) = I_{\max} \sin(\omega t), \quad (82)$$

где  $I_{\max} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R}$  – амплитудное значение тока. Из выражений (81) и (82) видно, что сила тока и напряжения совпадают по фазе ( $\omega t$ ) в любой момент времени, поэтому ток и напряжения достигают максимальных или минимальных значений одновременно. Сопротивление  $R$  в цепи переменного тока называется **активное сопротивление**.

### Реактивное сопротивления

Не надо связывать реактивное сопротивление с параметрами реактивных двигателей – эти понятия из разных разделов физики. **Реактивное сопротивление** – это величина, характеризующая электрическое сопротивление, оказываемое переменному току электрической емкостью и индуктивностью.

Для начала рассмотрим, к чему приводит включение конденсатора в цепь переменного тока (рис. 36). Известно, что в цепи постоянного тока конденсатор является непреодолимым препятствием, поэтому постоянный ток через конденсатор не проходит. Но при включении конденсатора в цепь переменного синусоидального тока (рис. 36, а) он обладает конечным сопротивлением  $X_C$ , которое зависит от электроёмкости конденсатора  $C$  и

циклической частоты тока  $\omega$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}. \quad (83)$$

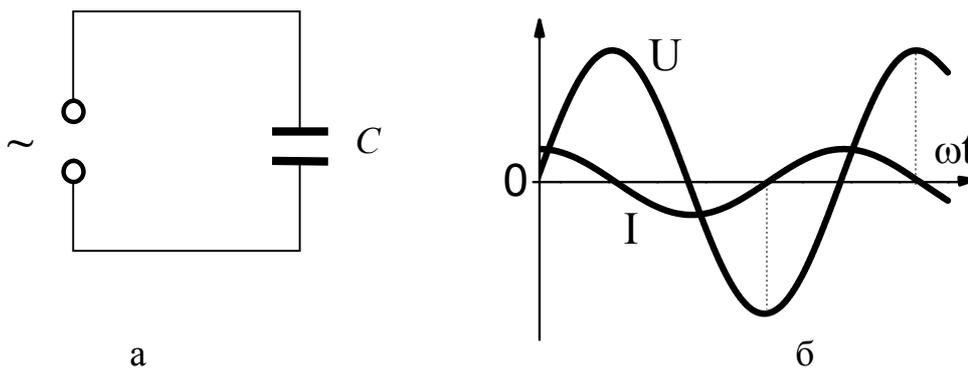


Рис. 36. Емкостное сопротивление в цепи переменного тока

Из (83) хорошо видно, что для уменьшения сопротивления конденсатора необходимо выбирать конденсаторы с наибольшей ёмкостью и увеличивать частоту тока. Для электрических токов с низкой частотой  $\omega$  (низкочастотных токов) любой конденсатор окажет большое сопротивление.

На *рис. 36, б* представлены графики зависимости напряжения на конденсаторе и силы тока через него от времени. Видно, что колебания напряжения на конденсаторе отстают по фазе от колебаний тока на  $\pi/2$ , так как заряд на конденсаторе формируется током, протекавшим на более ранней стадии колебаний.

Теперь обратимся к вопросу о подключении индуктивности в цепь переменного тока (*рис. 37*). Как катушка может сопротивляться прохождению тока, мы уже видели ранее (*рис. 35*). Значение электросопротивления индуктивности  $X_L$  в цепи переменного тока с частотой  $\omega$  вычисляется как

$$X_L = \omega L. \quad (84)$$

Из данного выражения видно, что для уменьшения электросопротивления необходимо использовать катушки с малой индуктивностью и низкочастотные токи. Для электрических токов высокой частотой  $\omega$  любая индуктивность окажет большое электросопротивление.

На *рис. 37, б* представлены графики зависимости напряжения на индуктивности и силы тока через неё от времени. Видно, что колебания напряжения на индуктивности опережают по фазе колебания тока на  $\pi/2$ , так как напряжение определяется ЭДС самоиндукции и оказывается максимальным по величине при максимальной скорости изменения тока. А скорость изменения тока становится максимальной, когда ток равен нулю.

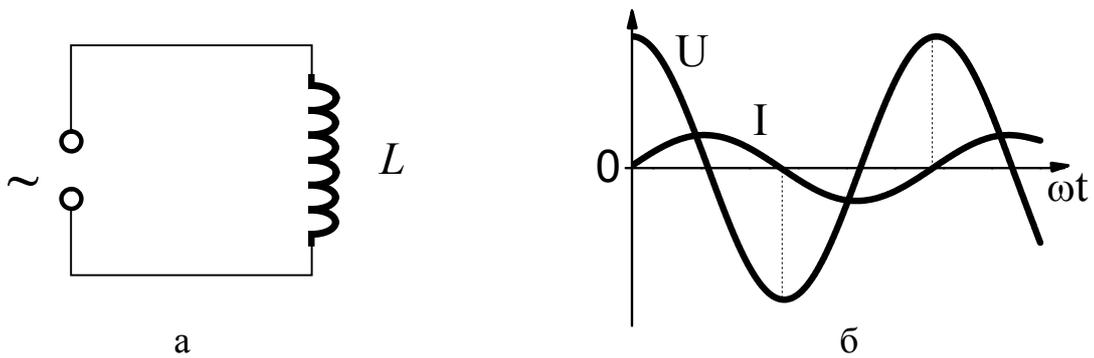


Рис. 37. Индуктивное сопротивление в цепи переменного тока

### Закон Ома для переменных токов

В общем случае, когда в цепь переменного тока одновременно включены активное, емкостное и индуктивное сопротивления, общее сопротивление цепи окажется равно

$$X = \frac{U_{\max}}{I_{\max}} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (85)$$

Такое сопротивление называют **полным сопротивлением цепи переменного тока**. Из (85) легко получить **выражение для закона Ома для переменных токов**

$$I_{\max} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (86)$$

Что наиболее важно в выражениях (85) и (86)? Это возможность свести реактивное сопротивление к нулю! Ведь выражение для него является разницей между индуктивным и емкостным сопротивлением. Давайте посмотрим, к чему это приведёт

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \Rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow \omega^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \quad (87)$$

Оказывается, реактивное сопротивление обнуляется при частоте вынужденных электромагнитных колебаний (частоте тока)  $\omega$ , равной собственной частоте  $\omega_0$  колебательного контура (80), состоящего из индуктивности  $L$  и ёмкости  $C$ .

Если в процессе изменения частоты вынужденных электромагнитных колебаний  $\omega$  в электрической схеме, включающей  $R$ ,  $L$ ,  $C$  наступает равенство  $\omega = \omega_0$  (87), электрический ток резко возрастает  $I_{\max} = \frac{U_{\max}}{R}$ , а разность фаз

между напряжением и током становится равной нулю. Такой случай называют **резонансом напряжений**.

### Работа и мощность переменного тока

Если переменный ток постоянно меняет своё направление, то как он совершает работу? Чтобы разобраться в этом, необходимо исходить из физических законов и определений, которые мы уже изучили. При прохождении тока работу электрического поля принято называть работой тока, и уравнения для работы (38) и мощности (40) постоянного тока введены нами ранее. А так как при переменном токе работу всё равно совершает электрическое поле, то отличий во внешнем виде уравнений для переменного и постоянного тока быть не должно. Значит уравнения (38) и (40) можно применять и для переменного тока, но с учетом синусоидального изменения тока.

Если реактивное сопротивление равно нулю, то вся работа переменного тока превращается в тепло, а мгновенную мощность можно записать как

$$N_{\text{МГН}} = I^2 R \sin^2(\omega t) = \frac{U^2}{R} \sin^2(\omega t). \quad (89)$$

Из (89) следует, что мгновенная мощность  $N_{\text{МГН}} \geq 0$ , но постоянно меняется по синусоидальному закону. Для вычисления средней мощности переменного тока следует суммировать мгновенную мощность за один период колебаний тока

$$N = \frac{A_T}{T} = \frac{U_{\text{max}} I_{\text{max}}}{2} = \frac{I_{\text{max}}^2 R}{2} = \frac{U_{\text{max}}^2}{2R}. \quad (90)$$

Сравнивая (90) и (40), можно ввести понятие эффективного напряжения  $U_{\text{ЭФФ}}$  и эффективного тока  $I_{\text{ЭФФ}}$

$$U_{\text{ЭФФ}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}, \quad I_{\text{ЭФФ}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}. \quad (91)$$

Вольтметры и амперметры переменного тока измеряют именно эффективные значения напряжения и тока (91).

Теперь для средней мощности переменного тока можно записать выражения, по форме совпадающие с выражениями (40) для постоянного тока:

$$N = \frac{A}{\Delta t} = U_{\text{ЭФФ}} I_{\text{ЭФФ}} = I_{\text{ЭФФ}}^2 R = \frac{U_{\text{ЭФФ}}^2}{R}. \quad (92)$$

В заключении отметим, что в общем случае при наличии реактивного сопротивления в цепи переменного тока средняя мощность зависит ещё и от сдвига фаз между напряжением и током. Чем больше будет сдвиг фаз, тем меньшая мощность будет выделяться во внешней цепи, поэтому всегда стремятся к такому распределению нагрузки, чтобы сдвиг фаз был близок к нулю.

## Трансформатор

Основное преимущество переменного тока перед постоянным заключается в легкости преобразования переменного напряжения одной величины в напряжения любых других величин практически без потерь. Для этого используются **трансформаторы**, КПД которых может превышать 99 %  $\eta \approx 99$  %. Трансформатор собирается из сердечника, состоящего из набора замкнутых пластин мягкого ферромагнетика, и как минимум двух независимых электрических катушек (обмоток), намотанных на сердечник. Пластины ферромагнетика специально делают электрически изолированными для предотвращения возникновения паразитных токов Фуко, снижающих КПД.

Если на одну из катушек трансформатора (называемую первичной) подать переменное напряжение, то внутри сердечника возникнет переменный магнитный поток, пронизывающий все другие катушки (называемые вторичными). Этот поток создаёт во вторичных катушках ЭДС индукции  $\mathcal{E}_2$ , пропорциональное количеству витков  $N_2$  в каждой катушке. В случае отсутствия тока во вторичных обмотках справедливо равенство

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = k, \quad (93)$$

где  $k$  – коэффициент трансформации. Если требуется получить более высокое напряжение, чем в первичной обмотке, необходимо использовать вторичную обмотку с количеством витков  $N_2 > N_1$ . В этом случае мы получим повышающий трансформатор  $k > 1$ . В случае, если  $N_2 < N_1$ , во вторичной обмотке будет более низкое напряжение и трансформатор окажется понижающим  $k < 1$ .

Однако трансформация напряжения всегда приводит к обратной трансформации тока, так как мощность первичной катушки вычисляется по (92), то во всех вторичных катушках суммарная мощность не может превышать значения  $U_{1\text{ЭФФ}}I_{1\text{ЭФФ}}$ . Трансформатор не даёт выигрыша в мощности, поэтому для случая только двух обмоток на трансформаторе из (93) и (92) получаем

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} = k. \quad (94)$$

Следовательно, если при помощи трансформатора напряжение повысить в 10 раз, то ток во вторичной обмотке будет в 10 раз меньше, чем в первичной (94).

## Раздел XII. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

### Открытый колебательный контур

До сих пор мы рассматривали электромагнитные колебания в закрытом колебательном контуре (*рис. 35*). А что произойдёт, если такой колебательный контур «открыть», т. е. выпустить электромагнитные колебания в пространство вокруг контура? Посмотрите на *рис. 38*. У заряженного заранее конденсатора постепенно раздвинем пластины (*рис. 38, а*). В этом случае электрическое поле, сосредоточенное ранее внутри конденсатора, высвободится и окажется там, где мы его и хотели получить – в пространстве вокруг контура. Половина дела сделана!

Теперь займёмся освобождением магнитного поля. Чтобы оно «просочилось» наружу, необходимо растянуть обмотку катушки индуктивности. А чтобы полностью освободить магнитное поле, требуется полностью растянуть обмотку катушки в прямой провод (*рис. 38, б*). Теперь вокруг контура располагается не только электрическое, но и магнитное поле. Из-за того, что длина провода значительно превосходит размеры пластин конденсатора, их можно в дальнейшем не указывать. Но ведь контур превратился в обыкновенный прямой провод, изображенный на *рис. 38, в*?! Что же получается? Неужели обыкновенный прямой провод – это и есть открытый колебательный контур? Да, именно так, на *рис. 38, в* изображён **открытый колебательный контур!**

Если в таком проводе возбудить электромагнитные колебания, то вокруг провода начнут распространяться **электромагнитные волны** – начнётся распространение переменного электромагнитного поля.

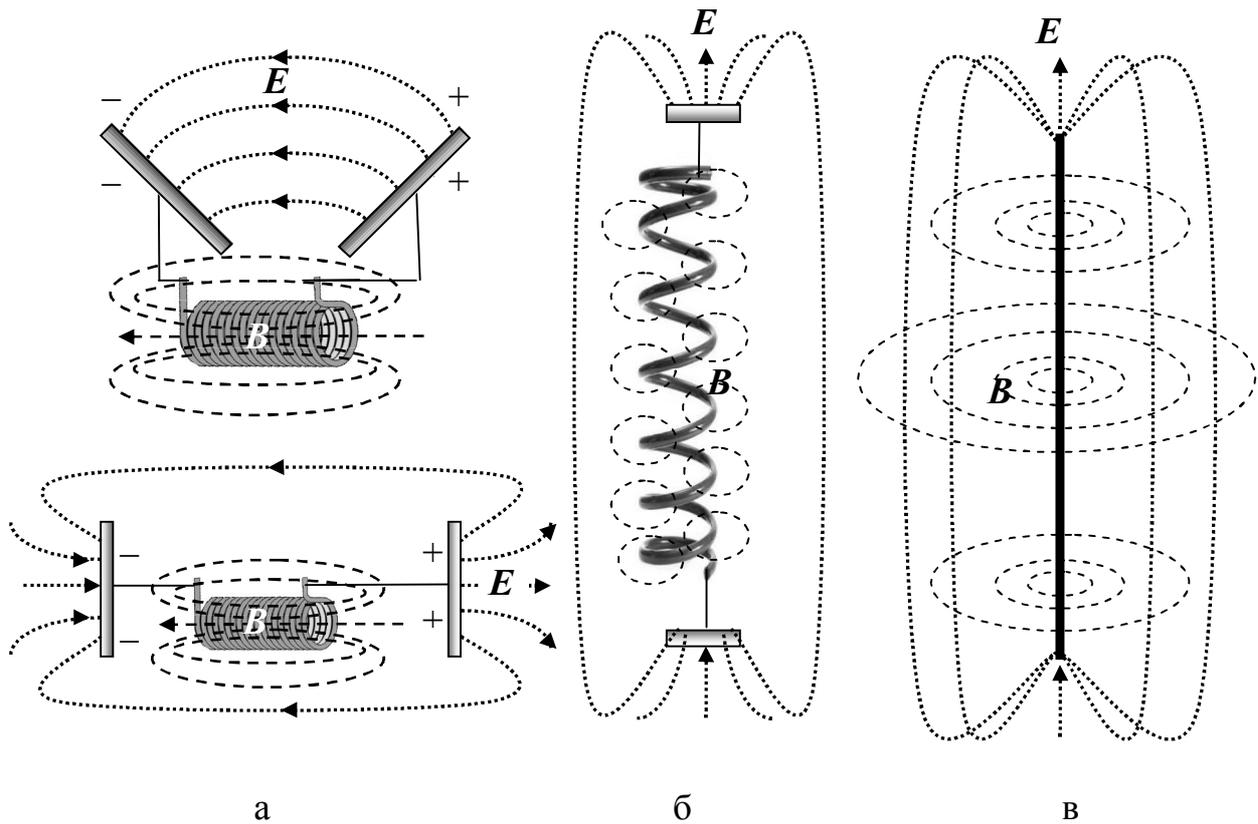


Рис. 38. Переход к открытому колебательному контуру

### Распространение электромагнитных волн

Как же происходит распространение электромагнитных волн? Это непрерывное синусоидальное изменение электрического и магнитного полей, согласованное по фазе колебаний – максимальные значения  $E_{\max}$  и  $B_{\max}$  достигаются в единый момент времени (рис. 39). Однако вектор напряженности электрического поля  $E$  всегда перпендикулярен вектору магнитной индукции  $B$ , а вектор скорости  $v$  перпендикулярен обоим этим векторам. Электромагнитные волны являются поперечными волнами.

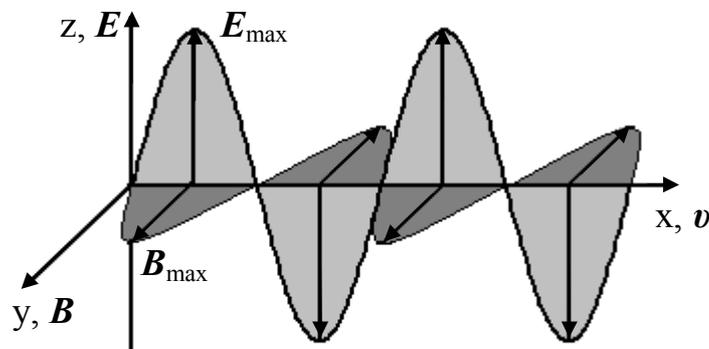


Рис. 39. Пространственное распределение электрического и магнитного полей в электромагнитной волне, распространяющейся вдоль оси  $x$

А чем определяется скорость распространения электромагнитных волн? Она всегда совпадает со скоростью света. В вакууме  $v = c = 3 \cdot 10^8$  м/с. В любой другой среде скорость оказывается меньше и может быть рассчитана как

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{n}, \quad (94)$$

где  $n$  – относительный показатель преломления света в среде.

Следует помнить, что частота электромагнитной волны не меняется при переходе из одной среды в другую, но меняется длина волны. Если в вакууме длину волны обозначить за  $\lambda_0$ , то по определению получим

$$\lambda_0 = cT = \frac{c}{\nu}, \quad (95)$$

так как длина волны численно равна расстоянию, проходимому за один период колебаний  $T$ , а частота колебаний  $\nu = 1/T$ . В любой другой среде длина электромагнитной волны будет меньше:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}. \quad (96)$$

Объединив результаты (94) – (96), для скорости электромагнитной волны можно получить следующие зависимости:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{\lambda_0}{n} \nu = \lambda \nu. \quad (97)$$

Все возможные частоты электромагнитных волн разделены на диапазоны, которые вместе с их частотными характеристиками указаны в справочных материалах в конце пособия. Познакомьтесь с ними и обратите внимание, что видимый свет занимает лишь узкий диапазон на шкале электромагнитных волн. Следовательно, кроме уже перечисленных свойств электромагнитные волны обладают всеми свойствами волн оптического диапазона – преломлением, отражением, интерференцией, дифракцией и т. д. Более подробно эти свойства мы изучим в следующей части пособия.

### Принципы радиосвязи

Как же с пользой для человека применить электромагнитные волны, если мы их почти во всех диапазонах не видим и не слышим? Давайте для примера разберёмся с волнами из радиодиапазона. Для передачи любого сообщения на любое расстояние любому человеку требуется передать звуковую или световую информацию. На расстоянии 1 м можно говорить спокойным голосом, на расстоянии 100 м приходится кричать, на расстоянии 1 км крик уже не поможет, но при хорошей видимости можно сигнализировать фонариком, на расстоянии 50 км видны огни морских маяков. А вот на больших расстояниях информацию можно передавать только с помощью



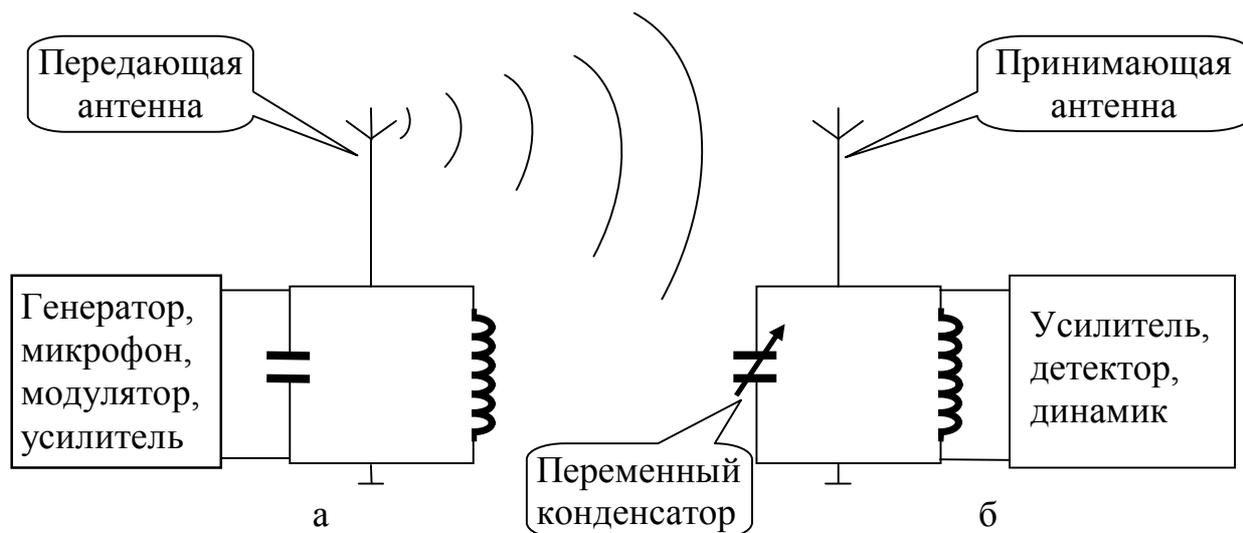


Рис. 41. Передатчик (а) и приёмник (б) электромагнитных волн

**Генератор** задаёт несущую частоту, **микрофон** преобразует звуковой сигнал в электрический сигнал той же частоты, что и звук, **модулятор** формирует выходной сигнал, **усилитель** преобразует этот сигнал в мощные электромагнитные колебания, поступающие на **передающую антенну** и преобразующиеся там в мощную электромагнитную волну, способную донести нужный сигнал на требуемые расстояния. От передающей антенны электромагнитная волна распространяется в огромном пространстве, поэтому объёмная плотность электромагнитной энергии (74) уменьшается с удаленностью приёмной антенны и, достигая её, оказывается ничтожной.

Итак, электромагнитные волны достигли приёмной антенны, а что происходит дальше? Как из тысяч радиостанций приёмник узнаёт ту, которую мы ищем? Для этого **приёмный колебательный контур** при помощи **переменного конденсатора** позволяет подстроить свою собственную частоту под частоту передающей радиостанции. При совпадении частот **за счёт резонанса** в приёмнике происходит резкое усиление сигнала от данной радиостанции. Затем модулированная электромагнитная волна настроенной радиостанции попадает в **усилитель**, где увеличивается энергия электромагнитных колебаний (ведь теперь это уже не волна, а колебания в электрической цепи). После этого в **детекторе** обрезаются отрицательная составляющая сигнала (рис. 42, а) и удаляется несущая частота (рис. 42, б), т. е. происходит **демодуляция** сигнала. Остается только низкочастотный сигнал, соответствующий звуковым колебаниям, он попадает на динамик, который воспроизводит звуковую информацию. Таким способом человек приручил электромагнитные волны, которые **переносят электромагнитную энергию**, содержащую заложенную человеком информацию на огромные расстояния вокруг Земного шара.

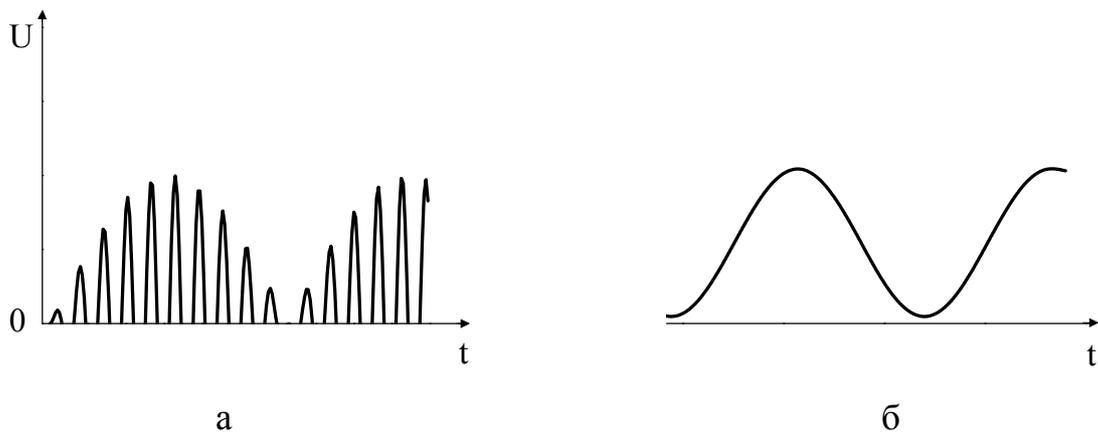


Рис. 42. Пример демодуляции электромагнитной волны

После изучения последних разделов, посвященных электромагнитным колебаниям и волнам Вы, надеюсь, убедились, что электрическое (электростатическое) и магнитное поля являются составными частями единого электромагнитного поля, основные законы которого были сформулированы Максвеллом и будут Вами изучаться на следующем, вузовском этапе обучения.

Вот, собственно, и всё. Теперь можно приступать к решению не только простых, но и сложных, комплексных задач, требующих знаний не только по электродинамике, но и по всем предыдущим разделам физики.

## Раздел XIII. ЗАДАЧИ

### Электрический заряд. Закон Кулона

1. Существуют ли электрические заряды?

- |                    |                   |
|--------------------|-------------------|
| 1) да, А и Б;      | А) положительные; |
| 2) нет;            | Б) отрицательные; |
| 3) да, А, Б, В, Г; | В) южные;         |
| 4) да, В и Г.      | Г) северные.      |

2. Существуют следующие положительно заряженные частицы:

- |           |               |
|-----------|---------------|
| 1) А и Б; | А) электроны; |
| 2) Б и В; | Б) протоны;   |
| 3) В и Г; | В) нуклоны;   |
| 4) Б.     | Г) нейтроны.  |

3. Существуют следующие отрицательно заряженные частицы:

- |           |               |
|-----------|---------------|
| 1) А;     | А) электроны; |
| 2) А и В; | Б) протоны;   |
| 3) В и Г; | В) нуклоны;   |
| 4) Б и В. | Г) нейтроны.  |

4. При трении бумаги о стекло стекло электрически заряжается положительно. Заряжается ли электрически при этом бумага?

- 1) нет;
- 2) да, положительно;
- 3) да, отрицательно;
- 4) да, но знак заряда может быть различен, зависит от сорта бумаги.

5. Электризация стекла в задаче 4 объясняется переходом...

- 1) электронов с бумаги на стекло;
- 2) протонов с бумаги на стекло;
- 3) электронов со стекла на бумагу;
- 4) протонов со стекла на бумагу.

6. Изменится ли масса тела, заряженного положительно, если его коснуться незаряженной металлической штангой?

- |                    |   |
|--------------------|---|
| 1) нет;            | 2) да, возрастет;                             |
| 3) да, уменьшится; | 4) зависит от величины заряда и размера тела. |

7. Изменится ли масса отрицательно заряженного тела, если его коснуться незаряженной металлической штангой?

- 1) нет;
- 2) да, возрастет;
- 3) да, уменьшится;
- 4) зависит от величины заряда и размера тела.

8. Изменится ли масса тела, заряженного положительно, если его коснуться положительно заряженной металлической штангой?

- 1) нет;
- 2) да, возрастет;
- 3) да, уменьшится;
- 4) зависит от величин зарядов и размеров тел.

9. Одноименные электрические заряды...

- 1) притягиваются;
- 2) отталкиваются;
- 3) не взаимодействуют;
- 4) зависит от величины заряда.

10. Разноименные электрические заряды...

- 1) притягиваются;
- 2) отталкиваются;
- 3) не взаимодействуют;
- 4) зависит от величины заряда.

11. Заряженное тело к незаряженному...

- 1) притягивается;
- 2) отталкивается;
- 3) не взаимодействует;
- 4) зависит от величины заряда и размеров тел.

12. Два одинаковых одноименно заряженных металлических шара, у которых  $q_1 > q_2$ , приводят в соприкосновение. Чему равен суммарный заряд в этом случае?

- 1)  $q_1$ ;
- 2)  $q_1 + q_2$ ;
- 3)  $q_1 - q_2$ ;
- 4)  $q_2$ .

13. Два одинаковых разноименных заряженных металлических шара, у которых  $q_1 > q_2$ , приводят в соприкосновение. Чему равен суммарный заряд в этом случае?

- 1)  $q_1$ ;            2)  $q_1 + q_2$ ;            3)  $q_1 - q_2$ ;            4)  $q_2$ .

14. Два одинаковых по диаметру одноименно заряженных металлических шара, один из которых полый, приводят в соприкосновение. Как распределятся заряды на обоих шарах?

- 1) зависит от начального соотношения зарядов;  
2) пропорционально массам шаров;  
3) обратно пропорционально массам шаров;  
4) поровну.

15. Стекланный шарик, заряженный положительно, гармонически колеблется на шелковой нити. Как изменится его период колебаний, если под точкой равновесия поместить отрицательно заряженный шар?

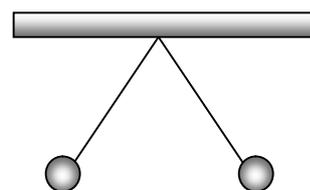
- 1) станет бесконечно большим;            2) не изменится;  
3) увеличится;            4) уменьшится.

16. Стекланный шарик, заряженный положительно, гармонически колеблется на шелковой нити. Как изменится его период колебаний, если в точке подвеса поместить отрицательно заряженный шар?

- 1) станет равным 0;            2) не изменится;  
3) увеличится;            4) уменьшится.

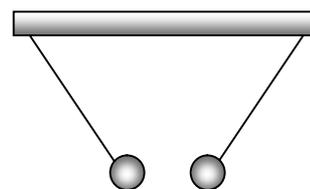
17. Два одинаковых шарика подвешены на тонких шелковых нитях. Можно утверждать, что...

- 1) заряды на шариках одноименные;  
2) заряды на шариках разноименные;  
3) заряжен только один из шариков;  
4) хотя бы один из шариков заряжен.



18. Два одинаковых металлических шарика подвешены на тонких шелковых нитях. Можно утверждать, что...

- 1) заряды на шариках одноименные;  
2) заряды на шариках разноименные;  
3) заряжен только один из шариков;  
4) хотя бы один из шариков заряжен.



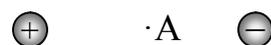
19. При электризации незаряженное тело потеряло  $10^6$  электронов. Его электрический заряд стал равен...
- 1)  $10^6$  Кл;    2)  $-1,6 \cdot 10^{-6}$  Кл;    3)  $1,6 \cdot 10^{-13}$  Кл;    4)  $-1,6 \cdot 10^{-13}$  Кл.
20. Два одинаковых шарика имеют соответственно электрические заряды 5 Кл и  $-8$  Кл. После соприкосновения на шарах окажутся заряды...
- 1) по 6,5 Кл;    2) 5 Кл и  $-8$  Кл соответственно;  
3)  $-8$  Кл и 5 Кл соответственно;    4) по  $-1,5$  Кл.
21. После электризации стеклянной палочки бумагой общее количество электрически заряженных частиц на палочке и бумаге...
- 1) увеличилось, так как оба тела зарядились;  
2) уменьшилось, так как на стекле стало не хватать электронов;  
3) уменьшилось, так как при трении часть зарядов скомпенсировалась;  
4) не изменилось, так как заряды просто перераспределились.
22. При кулоновском взаимодействии электрические заряды...
- 1) всегда притягиваются;  
2) всегда отталкиваются;  
3) притягиваются или отталкиваются в зависимости от величины зарядов;  
4) притягиваются или отталкиваются в зависимости от знаков зарядов.
23. Сила кулоновского взаимодействия двух точечных зарядов...
- 1) прямо пропорциональна квадрату расстояния между ними;  
2) обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними;  
3) прямо пропорциональна расстоянию между ними;  
4) обратно пропорциональна расстоянию между ними;
24. Два точечных заряда взаимодействуют с силой 10 мкН. При уменьшении каждого заряда в 5 раз сила взаимодействия станет численно равна...
- 1) 0,4 мкН;    2) 2 мкН;    3)  $2 \cdot 10^{-3}$  Н;    4)  $4 \cdot 10^{-6}$  Н.
25. Расстояние между двумя точечными зарядами увеличили в 6 раз. Сила их кулоновского взаимодействия...
- 1) уменьшилась в 6 раз;    2) увеличилась в 6 раз;  
3) уменьшилась в 36 раз;    4) увеличилась в 36 раз.

26. Точечные заряды –  $6 \cdot 10^{-6}$  Кл и  $3 \cdot 10^{-6}$  Кл находятся в вакууме на расстоянии 20 см. Сила кулоновского притяжения равна...
- 1)  $4,5 \cdot 10^{-10}$  Н;                      2) 0,9 Н;                      3)  $0,9 \cdot 10^{-6}$  Н;                      4)  $45 \cdot 10^{-15}$  Н.

### Напряженность электрического поля

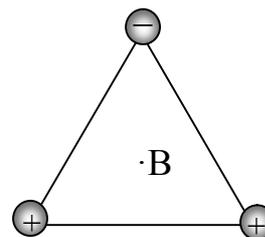
27. Найдите ложное утверждение об электрическом поле:
- 1) оно материально – существует независимо от нас, от наших знаний о нем;
  - 2) его главное свойство – действие на электрические заряды с некоторой силой;
  - 3) электрическое поле неподвижных зарядов потенциально;
  - 4) напряженность электрического поля является его потенциальной характеристикой.
28. Напряженность электрического поля – это...
- 1) скаляр, численно равный силе Кулона, действующей на заряд в данной точке пространства;
  - 2) вектор, совпадающий по направлению с силой Кулона, действующей на положительный заряд, расположенный в данной точке пространства;
  - 3) вектор, совпадающий по направлению с силой Кулона, действующей на электрон, расположенный в данной точке пространства;
  - 4) скаляр, прямо пропорциональный силе Кулона, действующей на заряд в данной точке пространства;
29. Напряженность электрического поля в центре равномерно положительно заряженной проволочной окружности...
- 1)  $E > 0$ ;                      2)  $E < 0$ ;                      3)  $E = 0$ ;                      4)  $E \geq 0$ .
30. Напряженность электрического поля в центре равномерно отрицательно заряженной сферической поверхности...
- 1)  $E > 0$ ;                      2)  $E < 0$ ;                      3)  $E = 0$ ;                      4)  $E \leq 0$ .
31. Вектор напряженности электрического поля в  
(·) А направлен...

- 1) вправо;
- 2) влево;
- 3) равен нулю;
- 4) зависит от величины зарядов.



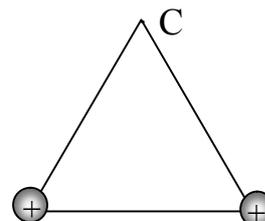
32. В вершинах равностороннего треугольника расположены одинаковые по модулю заряды. Вектор напряженности электрического поля в (·) В направлен...

- 1) вправо;                      2) влево;  
3) вверх;                        4) вниз.



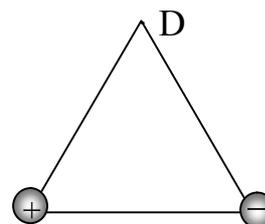
33. В основании равностороннего треугольника расположены одинаковые по модулю заряды. Вектор напряженности электрического поля в (·) С направлен...

- 1) вправо;                      2) влево;  
3) вверх;                        4) вниз.



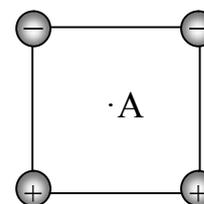
34. В основании равностороннего треугольника расположены одинаковые по модулю заряды. Вектор напряженности электрического поля в (·) D направлен...

- 1) вправо;                      2) влево;  
3) вверх;                        4) вниз.



35. В вершинах квадрата расположены одинаковые по модулю заряды. Вектор напряженности электрического поля в (·) А направлен...

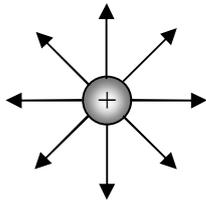
- 1) вправо;                      2) влево;  
3) вверх;                        4) вниз.



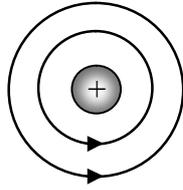
36. Найдите ложное утверждение. Силовые линии электрического поля...

- 1) это воображаемая линия;  
2) чем гуще расположены, тем выше напряженность поля;  
3) выходят из положительных зарядов, заканчиваются на отрицательных;  
4) выходят из отрицательных зарядов, заканчиваются на положительных.

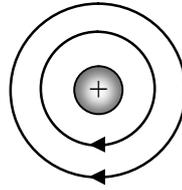
37. Силовые линии электростатического поля точечного положительного заряда правильно изображены на рисунке...



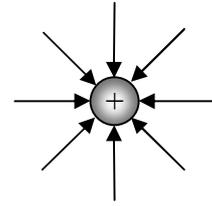
1



2



3

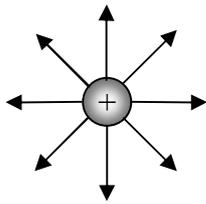


4

38. Вначале точечный заряд находился на расстоянии 15 см от точки наблюдения, а затем его перенесли еще на 45 см дальше. Величина напряженности электрического поля в точке наблюдения...

- 1) уменьшилась в 3 раз;                      2) уменьшилась в 9 раз;  
 3) уменьшилась в 4 раз;                      4) уменьшилась в 16 раз.

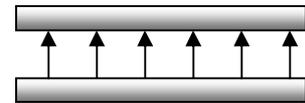
39. Какой случай соответствует однородному электрическому полю?



A



B

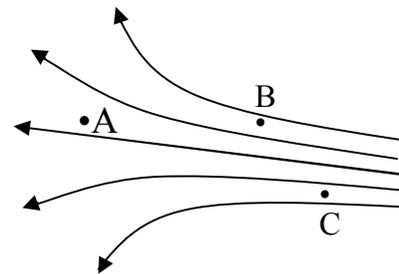


V

- 1) A и B;                      2) B и V;                      3) V;                      4) A и V.

40. В какой из указанных точек напряженность поля максимальна?

- 1) (·) A;                      2) (·) B;  
 3) (·) C;                      4) во всех точках одинакова.



41. Найти силу, действующую на заряд  $5 \cdot 10^{-4}$  Кл, если его внесли в электрическое поле с напряженностью 10 Н/Кл.

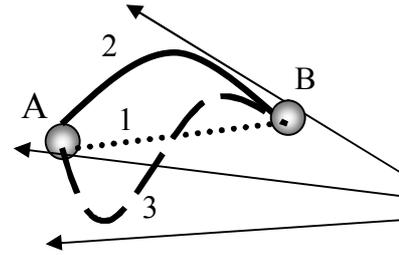
- 1) 5 мН;                      2)  $5 \cdot 10^{-5}$  Н;                      3) 0,5 Н;                      4)  $5 \cdot 10^{-2}$  Н.

42. Найти величину напряженности однородного электрического поля, если на заряд  $-3$  мКл, находящийся в поле, действует сила  $30$  Н.
- 1)  $90$  Н/Кл;      2)  $-10$  кН/Кл;      3)  $10$  Н/Кл;      4)  $10$  кН/Кл.
43. Уединенную идеальную металлическую сферу, толщиной  $1$  см и диаметром  $10$  см зарядили положительным электрическим зарядом  $10$  мКл. Определить области пространства, в которых напряженность электрического поля равна нулю.
- А) вне сферы;      Б) внутри сферы;      В) в металлической оболочке;
- 1) А;      2) Б;      3) В;      4) Б и В.
44. Найти напряженность электрического поля в вершине А равностороннего треугольника, если отрицательный и положительный электрические заряды, расположенные в вершинах В и С создают напряженность по  $10$  Н/Кл каждый.
- 1)  $0$ ;      2)  $5$  Н/Кл;      3)  $10$  Н/Кл;      4)  $17$  Н/Кл;

**Потенциал электрического поля. Конденсатор.  
Энергия плоского конденсатора.**

45. Работа по перемещению зарядов в электрических полях зависит от..
- 1) формы траектории движения заряда;  
2) длины траектории движения заряда;  
3) времени движения заряда;  
4) начального и конечного положения заряда.
46. Потенциальная энергия заряда в электрическом поле вычисляется как
- 1)  $W_{\Pi} = qEd$ ;      2)  $W_{\Pi} = qE/d$ ;      3)  $W_{\Pi} = q/Ed$ ;      4)  $W_{\Pi} = 1/qEd$ .
47. Потенциал – это...
- 1) силовая характеристика поля;  
2) векторная величина;  
3) энергетическая характеристика поля;  
4) величина, определяющая степень заряженности тел.
48. Уравнение для потенциала записано под номером...
- 1)  $W_{\Pi} = qEd$ ;      2)  $\varphi = \frac{W_{\Pi}}{q}$ ;      3)  $U = \frac{A}{q}$ ;      4)  $C = \frac{q}{\varphi}$ .

49. В электрическом поле тремя разными путями переместились одинаковые отрицательные заряды из (·) А в (·) В. Работа поля при перемещении заряда по первому пути составила 100 Дж. Можно утверждать, что...



- 1)  $100 < A_2 < A_3$ ;                      2)  $100 > A_2 > A_3$ ;  
 3)  $100 < A_2 > A_3$ ;                      4)  $100 = A_2 = A_3$ .

50. Уравнение для разности потенциалов записано под номером...

- 1)  $W_{\Pi} = qEd$ ;                      2)  $\varphi = \frac{W_{\Pi}}{q}$ ;                      3)  $U = \frac{A}{q}$ ;                      4)  $C = \frac{q}{\varphi}$ .

51. Определить работу по перемещению заряда в 2 мкКл, если начальная точка движения имела потенциал 10 В, а конечная 20 В.

- 1)  $2 \cdot 10^{-5}$  Дж;                      2) 40 мкДж;                      3) 200 мкДж                      4) 0,2 мкДж.

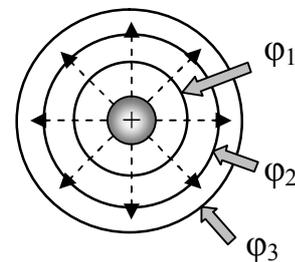
52. При движении вдоль направления силовых линий электрического поля скорость электрона...

- 1) уменьшается;    2) не меняется;    3) возрастает;    4) электрон не может двигаться вдоль силовых линий.

53. При движении против направления силовых линий электрического поля скорость электрона...

- 1) уменьшается;    2) не меняется;    3) возрастает;    4) электрон не может двигаться против силовых линий.

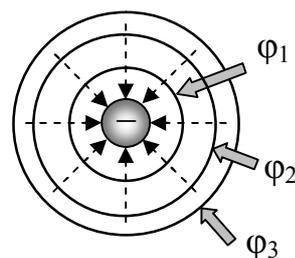
54. На рисунке показаны эквипотенциальные поверхности вокруг одиночного заряда. Можно утверждать, что...



- 1)  $\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3$ ;                      2)  $\varphi_1 > \varphi_2 > \varphi_3$ ;  
 3)  $\varphi_1 < \varphi_2 > \varphi_3$ ;                      4)  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$ .

55. На рисунке показаны эквипотенциальные поверхности вокруг одиночного заряда. Можно утверждать, что...

- 1)  $\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3$ ;                      2)  $\varphi_1 > \varphi_2 > \varphi_3$ ;  
 3)  $\varphi_1 < \varphi_2 > \varphi_3$ ;                      4)  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$ .



56. Имеется электрическое поле с напряженностью 40 В/м. На каком расстоянии следует расположить проводники, чтобы получить разность потенциалов в 10 В?

- 1) 4 м;                      2) 40 см;                      3) 25 см;                      4) 4 см.

57. Найдите правильное продолжение фразы. В диэлектриках под действием электрического поля ...

- 1) появляются свободные электроны;  
 2) появляются свободные протоны;  
 3) электрические заряды вырываются из атомов и молекул;  
 4) молекулы и атомы деформируются, превращаясь в диполи.

58. Найдите правильное продолжение фразы. Внутри проводников ...

- 1) всегда есть электрическое поле;  
 2) никогда нет электрического поля;  
 3) электрическое поле совпадает с внешним полем;  
 4) электрическое поле противоположно внешнему полю.

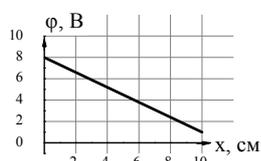
59. Незаряженный диэлектрический стержень расположили вдоль электрического поля и сломали посередине. Будут ли половинки обладать избыточным электрическим зарядом?

- 1) да, обе будут заряжены положительно;  
 2) да, обе будут заряжены отрицательно;  
 3) нет, обе будут нейтральными;  
 4) да, одна – положительным, другая – отрицательным.

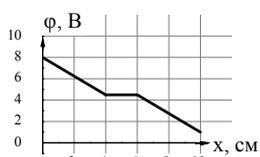
60. Незаряженный проводящий стержень расположили вдоль электрического поля и сломали посередине. Будут ли половинки обладать избыточным электрическим зарядом?

- 1) да, обе будут заряжены положительно;
- 2) да, обе будут заряжены отрицательно;
- 3) нет, обе будут нейтральными;
- 4) да, одна – положительным, другая – отрицательным.

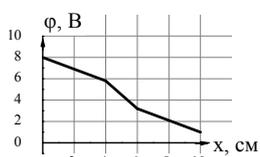
61. Пространство, заполненное однородным электрическим полем, перегородили незаряженной диэлектрической пластиной, установив ее перпендикулярно к силовым линиям поля. На каком из графиков правильно показано изменение потенциала электрического поля вдоль силовой линии?



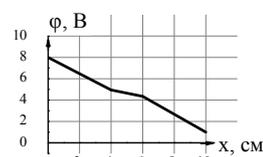
1



2

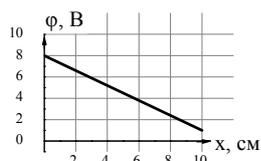


3

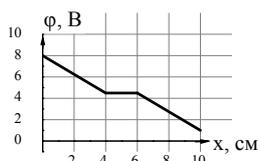


4

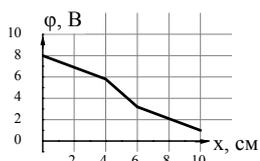
62. Пространство, заполненное однородным электрическим полем, перегородили незаряженной проводящей пластиной, установив ее перпендикулярно к силовым линиям поля. На каком из графиков правильно показано изменение потенциала электрического поля вдоль силовой линии?



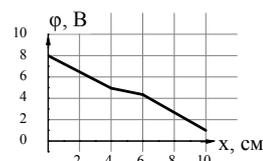
1



2



3



4

63. В поле точечного заряда  $10^{-9}$  Кл внесли незаряженную изолированную проводящую сферу радиусом 10 см и поместили центр сферы на расстоянии 40 см от заряда. Определить потенциал поля в центре сферы.

- 1) 30 В;
- 2) 22,5 В;
- 3) 18 В;
- 4) 0 В.

64. В поле точечного заряда  $10^{-9}$  Кл внесли незаряженную заземленную проводящую сферу радиусом 10 см и поместили центр сферы на расстоянии 40 см от заряда. Определить потенциал поля в центре сферы.

- 1) 30 В;                      2) 22,5 В;                      3) 18 В;                      4) 0 В.

65. Электроёмкость – это способность запасать ...

- 1) электрический заряд;  
2) электрический ток;  
3) электрическое напряжение;  
4) электрической потенциал.

66. Электроёмкость проводника зависит от...

- |                |   |
|----------------|---|
| 1) А и Б;      | А) его геометрических размеров;         |
| 2) В и Г;      | Б) его формы;                           |
| 3) А, Б, Г;    | В) диэлектрической проницаемости среды; |
| 4) А, Б, В, Г. | Г) материала проводника.                |

67. Расстояние между пластинами плоского конденсатора увеличили в 3 раза. Электроёмкость...

- 1) возросла в 3 раза;                      2) уменьшилась в 3 раза;  
3) не изменилась;                      4) возросла в 9 раз.

68. Напряжение, подаваемое на конденсатор, увеличили в 2 раза. Электроёмкость...

- 1) возросла в 2 раза;                      2) уменьшилась в 2 раза;  
3) не изменилась;                      4) возросла в 4 раз.

69. Пластины плоского воздушного конденсатора по  $40 \text{ см}^2$  расположены на расстоянии 2 мм. Определить электроёмкость конденсатора.

- 1) 4,43 пФ;                      2) 8,85 пФ;                      3) 17,7 пФ;                      4) 35,4 пФ.

70. Два конденсатора с электроёмкостями 5 пФ и 10 пФ соединили параллельно. Результирующая электроёмкость равна...

- 1) 3,3 пФ;                      2) 5 пФ;                      3) 10 пФ;                      4) 15 пФ.

71. Два конденсатора с электроёмкостями 5 пФ и 20 пФ соединили последовательно. Результирующая электроёмкость равна...

- 1) 4 пФ;                    2) 5 пФ;                    3) 20 пФ;                    4) 25 пФ.

72. Пластины заряженного плоского воздушного конденсатора, отключенного от источника тока, раздвинули, увеличив расстояние в 2 раза. Энергия электрического поля внутри конденсатора...

- 1) увеличилась в 2 раза;                    2) уменьшилась в 2 раза;  
3) увеличилась в 4 раза;                    4) уменьшилась в 4 раза.

73. Пластины заряженного плоского воздушного конденсатора, подключенного к источнику тока, раздвинули, увеличив расстояние в 2 раза. Энергия электрического поля внутри конденсатора...

- 1) увеличилась в 2 раза;                    2) уменьшилась в 2 раза;  
3) увеличилась в 4 раза;                    4) уменьшилась в 4 раза.

#### Электрический ток. Сила тока. Закон Ома для участка цепи

74. Для возникновения электрического тока необходимы следующие условия:

- А) наличие свободных заряженных частиц;  
Б) наличие силы, действующей на заряженные частицы в определенном направлении;  
В) замкнутая электрическая цепь;  
Г) движение всех заряженных частиц в проводниках в одном направлении.

- 1) А и Б;                    2) В и Г;                    3) А, Б, В;                    4) А, Б, В, Г.

75. За направление электрического тока всегда принимается направление...

- 1) наиболее удобное для данной задачи;  
2) движения отрицательных зарядов;  
3) движения положительных зарядов;  
4) поворота магнитной стрелки.

76. Найдите ошибочное продолжение фразы. При прочих равных условиях сила тока тем выше чем ...

- 1) больший заряд переносит одна частица;  
2) выше концентрация носителей тока;  
3) выше скорость направленного движения носителей заряда;  
4) больше время прохождения заряда.

77. В соответствии с законом Ома для участка цепи...

- А) сила тока прямо пропорциональна напряжению;
- Б) сила тока обратно пропорциональна сопротивлению;
- В) сила тока обратно пропорциональна напряжению;
- Г) сила тока прямо пропорциональна сопротивлению;

- 1) А и Б;                    2) Б и В;                    3) В и Г;                    4) А и Г.

78. При увеличении напряжения на концах проводника в 3 раза сила тока через проводник...

- 1) не изменится;
- 2) увеличится в 3 раза;
- 3) уменьшится в 3 раза;
- 4) уменьшится в 9 раз.

79. При увеличении длины проводника в 3 раза и увеличении напряжения на его концах в 2 раза сила тока через проводник...

- 1) увеличится в 1,5 раза;
- 2) увеличится в 3 раза;
- 3) уменьшится в 2 раза;
- 4) уменьшится в 1,5 раза.

80. Определить сопротивление участка цепи, если на нем падает 10 В при силе тока 4 А.

- 1) 40 Ом;                    2) 14 Ом;                    3) 2,5 Ом;                    4) 0,4 Ом.

### Электрическое сопротивление. ЭДС. Закон Ома для полной цепи

81. Электрическое сопротивление увеличивается при...

- 1) А и В;                    А) увеличении длины проводника;
- 2) В и Б;                    Б) уменьшении длины проводника;
- 3) Г и А;                    В) увеличении диаметра проводника;
- 4) Б и Г;                    Г) уменьшении диаметра проводника.

82. Кусок алюминиевой проволоки имеет сопротивление 4,5 Ом. Определить сопротивление куска другой алюминиевой проволоки, если площадь её сечения в 3 раза больше, а длина больше в 2 раза.

- 1) 1,5 Ом;                    2) 3 Ом;                    3) 6,75 Ом;                    4) 9 Ом.

83. При подключении двух одинаковых электросопротивлений R последовательно общее сопротивление участка станет равным...

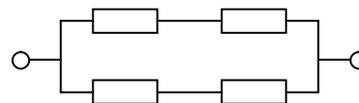
- 1) R;                    2) 2R;                    3) 0.5R;                    4) 0.25R.

84. При подключении четырех одинаковых электросопротивлений  $R$  параллельно общее сопротивление участка станет равным...

- 1)  $R$ ;            2)  $2R$ ;            3)  $0.5R$ ;            4)  $0.25R$ .

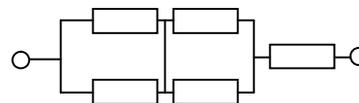
85. Вычислить общее сопротивление участка цепи, показанного на рисунке, если каждое сопротивление равно  $2 \text{ Ом}$ .

- 1)  $2 \text{ Ом}$ ;            2)  $4 \text{ Ом}$ ;  
3)  $8 \text{ Ом}$ ;            4)  $1 \text{ Ом}$ .



86. Вычислить общее сопротивление участка цепи, показанного на рисунке, если каждое сопротивление равно  $3 \text{ Ом}$ .

- 1)  $3 \text{ Ом}$ ;            2)  $6 \text{ Ом}$ ;  
3)  $12 \text{ Ом}$ ;            4)  $4 \text{ Ом}$ .



87. Три сопротивления  $5 \text{ кОм}$ ,  $6 \text{ кОм}$  и  $800 \text{ Ом}$  включены последовательно. Общее сопротивление такого участка будет равно...

- 1)  $620 \text{ Ом}$ ;            2)  $811 \text{ Ом}$ ;            3)  $11800 \text{ Ом}$ ;            4)  $111800 \text{ Ом}$ .

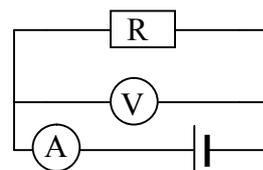
88. Три сопротивления  $5 \text{ кОм}$ ,  $6 \text{ кОм}$  и  $800 \text{ Ом}$  включены параллельно. Общее сопротивление такого участка приблизительно будет равно...

- 1)  $620 \text{ Ом}$ ;            2)  $811 \text{ Ом}$ ;            3)  $11800 \text{ Ом}$ ;            4)  $111800 \text{ Ом}$ .

89. Электродвижущая сила источника тока численно равна...

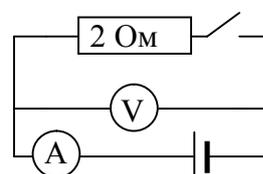
- 1) работе сторонних сил в источнике;  
2) работе электростатической силы в источнике;  
3) отношению работы сторонней силы к перенесенному заряду в источнике;  
4) отношению работы электростатической силы к перенесенному заряду в источнике.

90. В приведенной электрической схеме сопротивление  $R$  заменили на большее сопротивление. Как изменятся показания приборов, включенных в цепь?



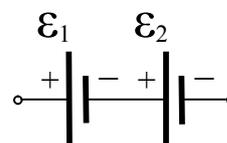
- 1) показания приборов увеличатся;
- 2) показания приборов уменьшатся;
- 3) показания вольтметра уменьшатся, а амперметра – увеличатся;
- 4) показания вольтметра увеличатся, а амперметра – уменьшатся.

91. При разомкнутом ключе электростатический вольтметр показал 10 В, а при замкнутом ключе амперметр показывает 4 А. Определить внутреннее сопротивление источника тока.



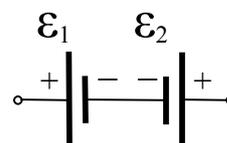
- 1) 0,4 Ом;
- 2) 0,5 Ом;
- 3) 2 Ом;
- 4) 2,5 Ом.

92. Два источника тока с ЭДС  $\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_2$  соединили в батарею. Общая ЭДС батареи будет равна...



- 1) наибольшей ЭДС  $\mathcal{E}_1$ ;
- 2) наименьшей ЭДС  $\mathcal{E}_2$ ;
- 3) сумме ЭДС  $\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$ ;
- 4) разности ЭДС  $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2$ .

93. Два источника тока с ЭДС  $\mathcal{E}_1 < \mathcal{E}_2$  соединили, как показано на рисунке. Общая ЭДС окажется равна...



- 1) наименьшей ЭДС  $\mathcal{E}_1$ ;
- 2) наибольшей ЭДС  $\mathcal{E}_2$ ;
- 3) сумме ЭДС  $\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$ ;
- 4) разности ЭДС  $\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1$ .

## Работа электрического тока. Закон Джоуля – Ленца

94. За время работы электродрели, включенной в сеть 220 В, через двигатель прошло 20 ККл электричества. Определить затраты электроэнергии.

- 1) 4,4·МДж;      2) 11 Дж;      3) 200 КДж;      4) 240 КДж.

95. Помещение освещалось 0,5 мин, на что ушло 3,15 КДж электроэнергии. Определить силу тока через лампу, если среднее напряжение в сети 210 В.

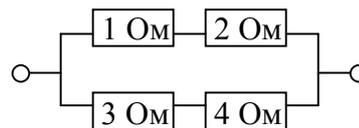
- 1) 0,5 А;      2) 30 А;      3) 0,5 мА;      4) 30 мА.

96. Найти отношение сопротивлений  $R_1/R_2$  двух электроламп, если обе рассчитаны на напряжение 220 В, но первая имеет мощность 50 Вт, а вторая – 200 Вт.

- 1) 0,25;      2) 0,5;      3) 4;      4) 16.

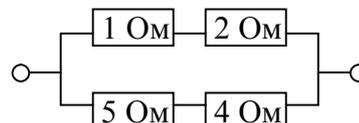
97. В каком из сопротивлений выделяется большее количество теплоты при протекании постоянного тока за час?

- 1) 1 Ом;      2) 2 Ом;  
3) 3 Ом;      4) 4 Ом.



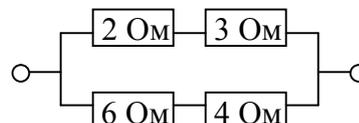
98. Отношение количества теплоты, выделяющейся на сопротивлениях 1 Ом и 4 Ом  $Q_1/Q_4$  за сутки, равно...

- 1) 9;      2) 4;  
3) 3;      4) 2,25.



99. Отношение мощностей потребителей тока с сопротивлением 6 Ом и 2 Ом  $N_6/N_2$  равно...

- 1) 3;      2) 2;  
3) 0,75;      4) 0,33.



## Электрический ток в различных средах

100. Носителями тока в металлах являются...

- 1) ионы;      2) электроны;      3) фононы;      4) протоны.

**101.** Найдите правильное продолжение фразы. Удельное сопротивление металлов...

- 1) прямо пропорционально концентрации носителей заряда;
- 2) прямо пропорционально среднему времени ускоренного движения носителей заряда;
- 3) обратно пропорционально концентрации носителей заряда;
- 4) не зависит от среднего времени ускоренного движения носителей заряда.

**102.** Определить сопротивление серебряной проволоки сечением  $0,1 \text{ мм}^2$  и длиной 50 см.

- 1) 8 мОм;                      2) 80 Ом;                      3) 80 мОм;                      4) 8 МОм.

**103.** Алюминиевая, медная и серебряная проволоки имеют равные массы и одинаковые сечения. Как соотносятся их электросопротивления?

- 1)  $R_A > R_M > R_C$ ;    2)  $R_A < R_M < R_C$ ;    3)  $R_A < R_M > R_C$ ;    4)  $R_A = R_M = R_C$ .

**104.** Носителями тока в электролитах являются...

- 1) ионы;    2) электроны;                      3) нуклоны;                      4) протоны.

**105.** Две электролитические ванны с различными электролитами включены в цепь последовательно. За время прохождения тока в одной из них выделилось 0,9 г хрома. Сколько никеля выделилось во второй ванне?

- 1) 2,8 г;                      2) 1,5 г;                      3) 0,55 г;                      4) 0,18 г.

**106.** Через электроды, опущенные в ванну с раствором медного купороса, пропускали ток 0,5 А в течение 3 мин. Какой заряд прошел через электроды?

- 1) 1,5 Кл;                      2) 30 Кл;                      3) 90 Кл;                      4) 180 Кл.

**107.** Газ всегда...

- 1) является изолятором, никогда не проводит ток;
- 2) проводит ток, является проводником;
- 3) требует для пропускания тока наличие внешнего ионизатора;
- 4) требует для пропускания тока наличия ионизированных молекул.

108. Носителями тока в газах являются...

- 1) в газах не бывает носителей тока, так как это изолятор;
- 2) электроны;
- 3) ионы;
- 4) электроны и ионы.

109. Под действием внешнего поля электроны и ионы в газах...

- 1) колеблются;
- 2) движутся равномерно;
- 3) движутся ускоренно без столкновений;
- 4) движутся ускоренно со столкновениями.

110. Известны следующие типы газовых разрядов:

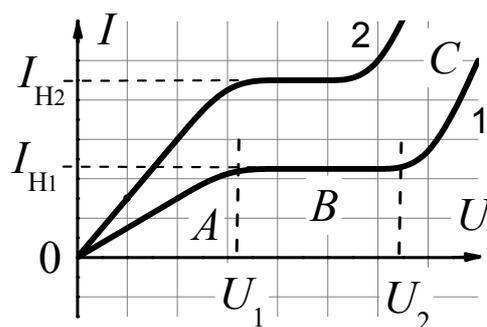
- |                   |              |
|-------------------|--------------|
| 1) А;             | А) дуговой;  |
| 2) А и Б;         | Б) коронный; |
| 3) А, Б, В        | В) искровой; |
| 4) А, Г, Б или В. | Г) тлеющий.  |

111. Сила тока при несамостоятельном газовом разряде подчиняется...

- 1) закону Кулона;
- 2) закону Ома;
- 3) закону Джоуля – Ленца;
- 4) закону Фарадея.

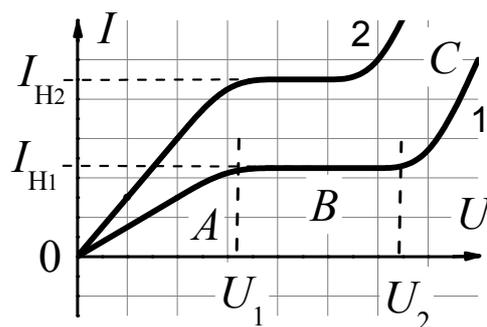
112. На рисунке приведены вольтамперные зависимости для тока в газах. Ударная ионизация начинается на участке...

- 1) А;
- 2) В;
- 3) С;
- 4) такой участок отсутствует.



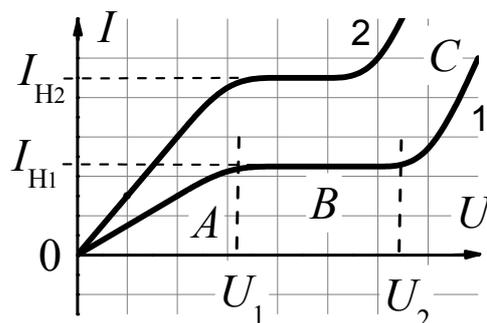
113. На рисунке приведены вольтамперные зависимости для тока в газах. Самостоятельный газовый разряд наблюдается на участке...

- 1) A;
- 2) B;
- 3) C;
- 4) такой участок отсутствует.



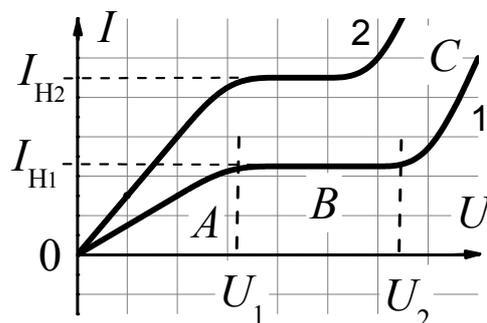
114. На рисунке приведены вольтамперные зависимости для тока в газах. Несамостоятельный газовый разряд наблюдается на участке...

- 1) A;
- 2) B;
- 3) C;
- 4) такой участок отсутствует.



115. На рисунке приведены вольтамперные зависимости для тока в газах. Концентрация носителей тока в газе...

- 1) выше для 1-й зависимости;
- 2) выше для 2-й зависимости;
- 3) одинакова в обоих случаях;
- 4) на разных участках по-разному.



116. В вакууме носителями электрического тока являются...

- 1) в вакууме не бывает носителей тока;
- 2) электроны;
- 3) ионы;
- 4) электроны и ионы.

117. Под действием внешнего поля электроны в вакууме...

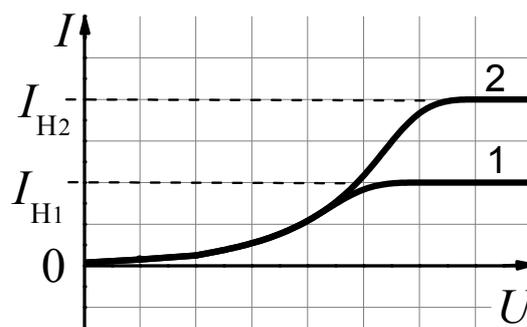
- 1) колеблются;
- 2) движутся равномерно;
- 3) движутся ускоренно без столкновений;
- 4) движутся ускоренно со столкновениями.

118. Сила тока в вакууме подчиняется...

- 1) закону Кулона;
- 2) закону Ома;
- 3) закону Джоуля – Ленца;
- 4) закону Фарадея.

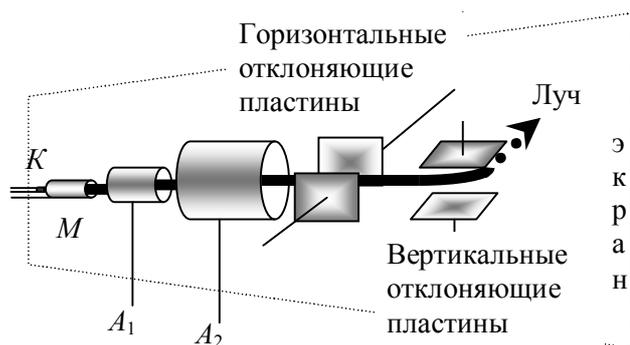
119. На рисунке приведены вольтамперные зависимости для тока в вакууме. Оба графика заканчиваются горизонтальными участками, так как...

- 1) отключают нагрев катода;
- 2) прекращается ток;
- 3) ток достигает насыщения;
- 4) наступает пробой.



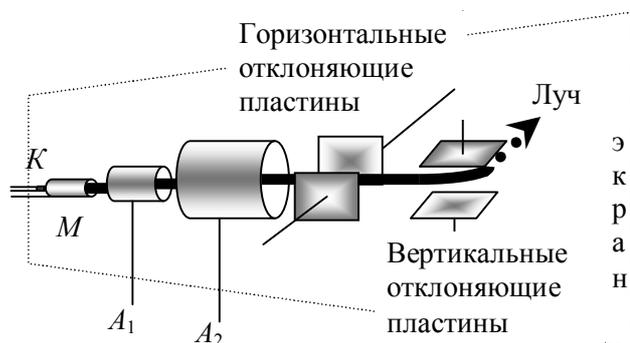
120. На верхнюю вертикальную отклоняющую пластину подали отрицательный потенциал. Луч отклонится...

- 1) вниз;
- 2) вверх;
- 3) влево;
- 4) вправо.



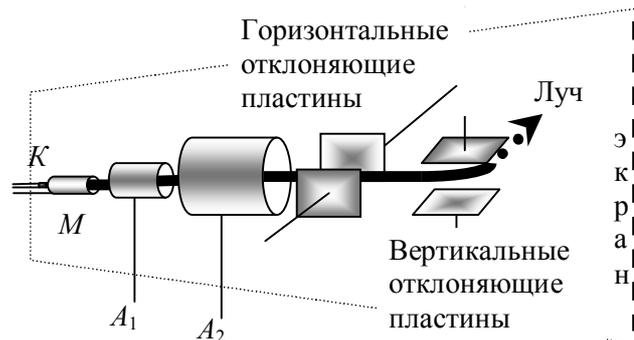
121. На ближнюю к нам горизонтальную отклоняющую пластину подали положительный потенциал. Луч отклонится...

- 1) вниз;
- 2) вверх;
- 3) влево;
- 4) вправо.



122. Как соотносятся потенциалы катода, модулятора и двух анодов?

- 1)  $\varphi_M < \varphi_K < \varphi_{A_1} < \varphi_{A_2}$ ;
- 2)  $\varphi_M > \varphi_K > \varphi_{A_1} > \varphi_{A_2}$ ;
- 3)  $\varphi_K < \varphi_M < \varphi_{A_1} < \varphi_{A_2}$ ;
- 4)  $\varphi_K > \varphi_M > \varphi_{A_1} > \varphi_{A_2}$ .

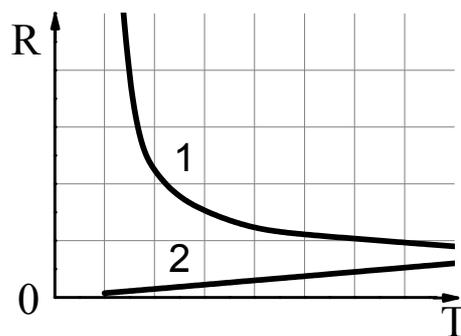


123. Носителями тока в полупроводниках являются...

- |             |               |
|-------------|---------------|
| 1) А и Б;   | А) электроны; |
| 2) В и Г;   | Б) протоны;   |
| 3) А, Б, В; | В) ионы;      |
| 4) А и Г.   | Г) дырки.     |

124. На рисунке приведены температурные зависимости электросопротивления двух образцов различного состава. Можно утверждать, что...

- 1) 1 – металл, 2 – полупроводник;
- 2) 1 – полупроводник, 2 – металл;
- 3) 1 и 2 – металлы;
- 4) 1 и 2 – полупроводники.



125. В собственных полупроводниках при любой температуре...

- 1) электронов больше, чем дырок;
- 2) электронов столько же, сколько дырок;
- 3) дырок больше, чем электронов;
- 4) есть только электроны, дырки отсутствуют.

126. В донорных полупроводниках при любой температуре...

- 1) электронов больше, чем дырок;
- 2) электронов столько же, сколько дырок;
- 3) дырок больше, чем электронов;
- 4) есть только электроны, дырки отсутствуют.

127. В акцепторных полупроводниках при любой температуре...

- 1) электронов больше, чем дырок;
- 2) электронов столько же, сколько дырок;
- 3) дырок больше, чем электронов;
- 4) есть только электроны, дырки отсутствуют.

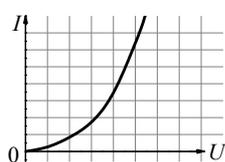
128. Если концентрацию донорной примеси в полупроводниковом материале увеличить в 3 раза, то практически в 3 раза...

- 1) увеличится концентрация дырок;
- 2) уменьшится концентрация дырок;
- 3) увеличится концентрация электронов;
- 4) уменьшится концентрация электронов.

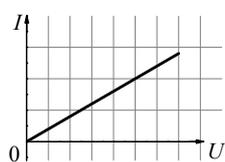
129. Если концентрацию акцепторной примеси в полупроводниковом материале увеличить в 3 раза, то практически в 3 раза...

- 1) увеличится концентрация дырок;
- 2) уменьшится концентрация дырок;
- 3) увеличится концентрация электронов;
- 4) уменьшится концентрация электронов.

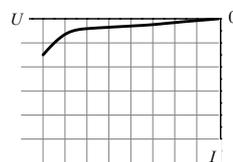
130. На рисунке приведены вольтамперные зависимости для тока в различных структурах. Какой рисунок соответствует прямому току  $p-n$  перехода?



1



2

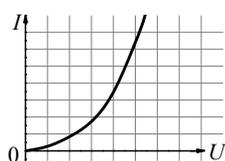


3

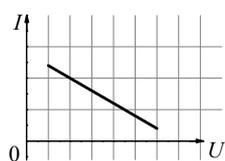


4

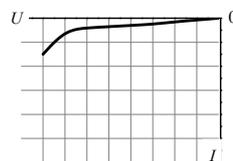
131. На рисунке приведены вольтамперные зависимости для тока в различных структурах. Какой рисунок соответствует обратному току  $p-n$  перехода?



1



2



3

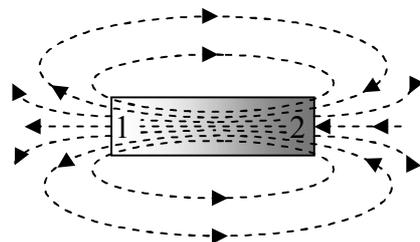


4

## Магнитное поле

132. Укажите полюса магнита...

- 1) 1 – южный, 2 – северный;
- 2) 1 – северный, 2 – южный;
- 3) 1 и 2 – северные;
- 4) 1 и 2 – южные.

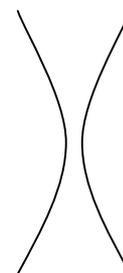


133. Северный магнитный полюс Земли находится...

- 1) в северном полушарии;
- 2) на северном географическом полюсе;
- 3) в южном полушарии;
- 4) на южном географическом полюсе.

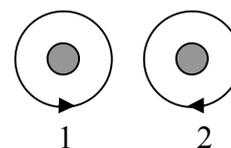
134. На рисунке показаны два взаимодействующих провода. Электрический ток идет...

- 1) сверху вниз по обоим проводам;
- 2) снизу вверх по обоим проводам;
- 3) в противоположных направлениях;
- 4) в одном направлении по обоим проводам.



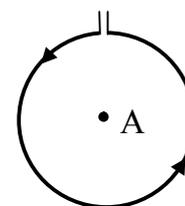
135. Как направлен электрический ток в проводниках, сечения и магнитные линии которых изображены на рисунке?

- 1) на нас по обоим проводам;
- 2) от нас по обоим проводам;
- 3) 1 – от нас, 2 – на нас;
- 4) 1 – на нас, 2 – от нас.



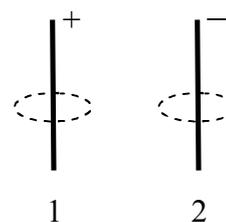
136. Как направлено магнитное поле витка с током в указанной точке А?

- 1) по направлению стрелок;
- 2) против направления стрелок;
- 3) на нас, выходит из листа;
- 4) от нас, уходит в лист.



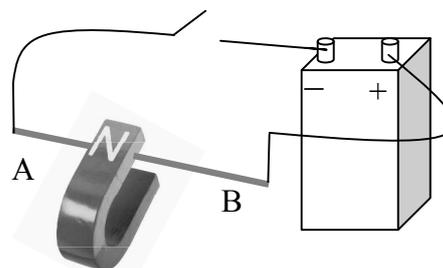
137. Как направлены магнитные линии, изображенные вокруг проводников с постоянным током?

- 1) 1-я и 2-я по часовой стрелке;
- 2) 1-я и 2-я против часовой стрелке;
- 3) 1-я – по часовой стрелке, 2-я – против часовой стрелки;
- 4) 1-я – против часовой стрелки, 2-я – по часовой стрелке.



138. В какую сторону сместится проводник АВ под действием магнитного поля, когда замкнут ключ?

- 1) вправо;
- 2) влево;
- 3) вперед (в магнит);
- 4) назад (из магнита).



139. Для увеличения подъёмной силы электромагнита в 2 раза необходимо...

- |             |   |
|-------------|---|
| 1) А или Г; | А) увеличить силу тока через магнит;            |
| 2) Б или В; | Б) уменьшить силу тока через магнит;            |
| 3) В или А; | В) увеличить количество витков обмотки магнита; |
| 4) Г или Б. | Г) уменьшить количество витков обмотки магнита. |

140. Определить модуль вектора магнитной индукции поля, в котором на проводник длиной 5 см, через который течет ток 4 А, действует максимальная сила 10 мН.

- 1) 50 мТл;      2) 5 мТл;      3) 320 мТл;      4) 3,2 Тл.

141. Магнитные линии направлены под углом  $30^\circ$  к проводнику. Если увеличить этот угол в 3 раза, то сила Ампера...

- |                         |                         |
|-------------------------|-------------------------|
| 1) увеличится в 3 раза; | 2) уменьшится в 3 раза; |
| 3) обнулится;           | 4) увеличится в 2 раза. |

142. Определить радиус вращения электрона, влетевшего в однородное магнитное поле перпендикулярно вектору магнитной индукции  $B = 1$  мТл со скоростью 1,76 км/с.

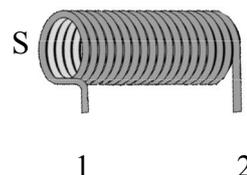
- 1) 0,01 мм;      2) 0,1 мм;      3) 1 мм;      4) 1 см.

143. Электрон с энергией  $eU$  влетает перпендикулярно  $\mathbf{B}$  в магнитное поле и движется по окружности радиуса  $R_1$ . Как изменится радиус движения электрона, если он в это поле влетит с энергией в четыре раза большей?

- 1)  $0,25R_1$ ;                      2)  $0,5 R_1$ ;                      3)  $1,7 R_1$ ;                      4)  $2R_1$ .

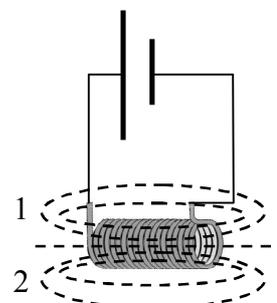
144. Как следует подключить батарею к катушке, чтобы получить указанное направление магнитного поля?

- 1) к 1-й клемме плюс, ко 2-й – минус;  
 2) к 1-й клемме минус, ко 2-й – плюс;  
 3) к 1-й и ко 2-й – плюс;  
 4) к 1-й и ко 2-й – минус.



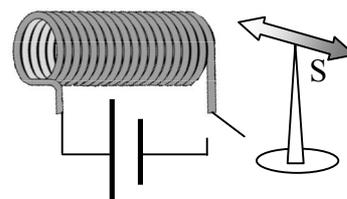
145. Как направлены магнитные линии, изображенные вокруг проводников с постоянным током?

- 1) 1-я и 2-я по часовой стрелке;  
 2) 1-я и 2-я против часовой стрелки;  
 3) 1-я по часовой стрелке, 2-я против часовой стрелки;  
 4) 1-я против часовой стрелки, 2-я по часовой стрелке.



146. Какой полюс магнитной стрелки притянется к катушке при замыкании ключа?

- 1) северный;  
 2) южный;  
 3) положительный;  
 4) отрицательный.



147. Все вещества по своим магнитным свойствам делятся на группы:

- |                |                    |
|----------------|--------------------|
| 1) А и Б;      | А) парамагнетики;  |
| 2) Б и В;      | Б) диамагнетики;   |
| 3) А, Б, В;    | В) ферромагнетики; |
| 4) А, Б, В, Г. | Г) термомагнетики. |

## Электромагнитная индукция

148. Электромагнитная индукция – это...

- 1) возникновение магнитного поля вокруг проводников с током;
- 2) возникновение электрического тока в проводниках, находящихся в магнитном поле;
- 3) поворот магнитной стрелки вблизи проводника с током;
- 4) вращение электрона, влетевшего в магнитное поле.

149. Как можно изменить магнитный поток через контур?

- |               |  |
|---------------|--|
| 1) А;         | А) изменением вектора магнитной индукции;                      |
| 2) А и Б;     | Б) изменением площади поверхности;                             |
| 3) А, Б и В;  | В) изменением толщины линии контура;                           |
| 4) А, Б, и Г. | Г) изменением угла наклона вектора $\mathbf{B}$ к поверхности. |

150. Вычислить магнитный поток через контур с площадью  $3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ , если он расположен под углом  $30^\circ$  к вектору магнитной индукции  $B = 2 \text{ мТл}$ .

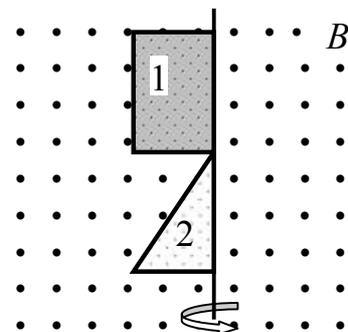
- 1) 3 мкВб;            2) 1,74 мкВб;            3) 6 мВб;            4) 3 мВб.

151. Определить ЭДС индукции, возникшей в проволочном витке, если магнитный поток уменьшился с 7 мВб до 2 мВб за 2 с.

- 1) 1,4 мВ;            2) 1 мВ;            3) 2,5 мВ;            4) 4,5 мВ.

152. На одной оси синхронно вращаются в однородном магнитном поле две рамки, показанные на рисунке. Отношение их ЭДС  $\mathcal{E}_1/\mathcal{E}_2$  равно...

- 1) 1;            2) 2;            3) 4;            4) 0,5.



153. Когда к центру вертикально висящего замкнутого кольца из проводящего немагнитного материала приближают северный полюс магнита, то кольцо...

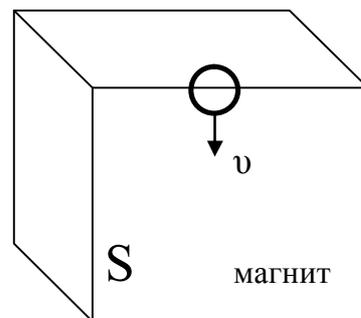
- 1) не меняет своего положения;
- 2) отклоняется от магнита;
- 3) отклоняется к магниту;
- 4) отклоняется вправо от магнита.

154. Когда к центру вертикально висящего замкнутого кольца из проводящего немагнитного материала приближают южный полюс магнита, то кольцо...

- 1) не меняет своего положения;
- 2) отклоняется от магнита;
- 3) отклоняется к магниту;
- 4) отклоняется влево от магнита.

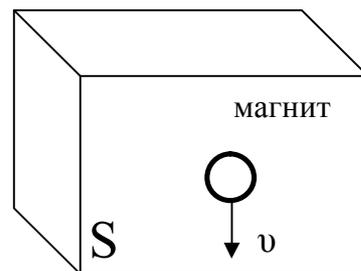
155. Небольшое замкнутое кольцо из проводящего немагнитного материала вертикально падает и пролетает мимо южного полюса массивного магнита. Когда центр кольца достигает верхнего края магнита, индукционный ток в кольце...

- 1) направлен против часовой стрелки;
- 2) ток отсутствует;
- 3) направлен по часовой стрелке;
- 4) направлен по направлению скорости.



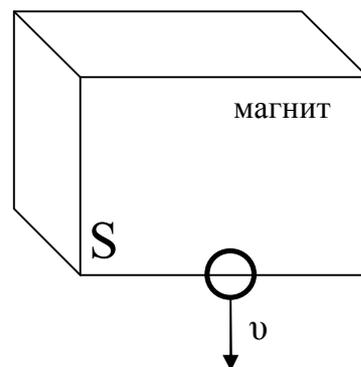
156. Небольшое замкнутое кольцо из проводящего немагнитного материала вертикально падает и пролетает мимо южного полюса массивного магнита. Когда центр кольца достигает середины магнита, индукционный ток в кольце...

- 1) направлен против часовой стрелки;
- 2) ток отсутствует;
- 3) направлен по часовой стрелке;
- 4) направлен против направления скорости.



157. Небольшое замкнутое кольцо из проводящего немагнитного материала вертикально падает и пролетает мимо южного полюса массивного магнита. Когда центр кольца достигает нижнего края магнита, индукционный ток в кольце...

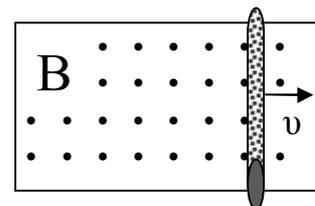
- 1) направлен против часовой стрелки;
- 2) ток отсутствует;
- 3) направлен по часовой стрелке;
- 4) направлен против направления скорости.



158. В каком из случаев, описанных в задачах 155–157, индукционный ток будет больше?

- 1) при достижении верхнего края магнита;
- 2) при достижении нижнего края магнита;
- 3) одинаков в обоих случаях;
- 4) при достижении середины магнита.

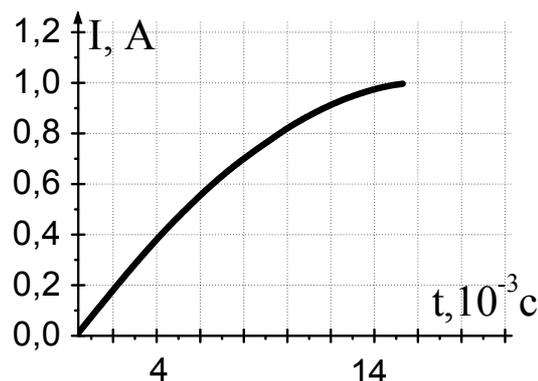
159. Проводник движется в магнитном поле по замкнутым оголенным проводникам. Электроны в данном проводнике перемещаются...



- 1) к верхнему концу проводника;
- 2) вправо, к передней стенке проводника;
- 3) к нижнему концу проводника;
- 4) влево, к задней стенке проводника.

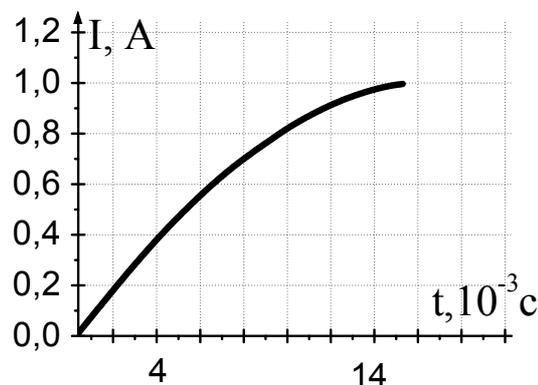
160. Определить максимальную ЭДС самоиндукции катушки с индуктивностью 0,2 Гн, если при замыкании цепи сила тока меняется в соответствии с приведенным графиком.

- 1) 0,2 В;
- 2) 29 В;
- 3) 40 В;
- 4) 80 В.



161. Определить максимальную энергию магнитного поля в катушке с индуктивностью 0,2 Гн, если при замыкании цепи, сила тока меняется в соответствии с приведенным графиком.

- 1) 0,4 Вт;                      2) 0,8 Вт;
- 3) 4 Вт;                         4) 8 Вт.



162. Определить плотность энергии магнитного поля в вакууме при  $B = 5$  Тл.

- 1) 1 Дж/м<sup>3</sup>;                      2) 10<sup>-7</sup> Дж/м<sup>3</sup>;                      3) 10<sup>-3</sup> Дж/м<sup>3</sup>;                      4) 10<sup>-5</sup> Дж/м<sup>3</sup>.

## Электромагнитные колебания

163. В закрытом колебательном контуре...

- 1) электрическая и магнитная энергии никогда не меняются;
- 2) электрическая энергия переходит в магнитную;
- 3) магнитная энергия переходит в электрическую;
- 4) энергия последовательно переходит из одного вида в другой.

164. В закрытом колебательном контуре заряд положительно заряженной пластины конденсатора...

- 1) никогда не меняется;
- 2) меняется от максимального значения до нуля;
- 3) меняется от максимального значения до равного по модулю отрицательного;
- 4) непрерывно меняется от максимального значения до равного по модулю отрицательного.

165. Как изменится собственная частота колебательного контура, если индуктивность катушки увеличить в 4 раза, а ёмкость конденсатора уменьшить в 4 раза?

- 1) увеличится в 8 раз;
- 2) не поменяется;
- 3) уменьшится в 4 раза;
- 4) увеличится в 4 раза.

166. Как изменится период собственных колебаний закрытого колебательного контура, если индуктивность катушки увеличить в 16 раз, а ёмкость конденсатора увеличить в 4 раза?

- 1) увеличится в 8 раз;
- 2) не поменяется;
- 3) уменьшится в 4 раза;
- 4) увеличится в 4 раза.

167. При вынужденных колебаниях сила тока меняется по закону  $I = 5\sin(15t)$ . Амплитудное значение силы тока равно...

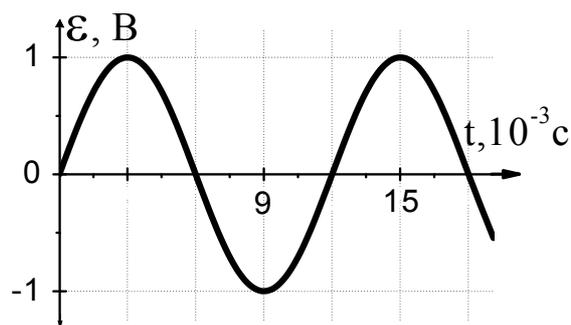
- 1) 3 А;
- 2) 5 А;
- 3) 15 А;
- 4) 75 А.

168. При вынужденных колебаниях сила тока меняется по закону  $I = 15\sin(5t)$ . Эффективное значение силы тока равно...

- 1) 10,5 А;
- 2) 15 А;
- 3) 5 А;
- 4) 7,5 А.

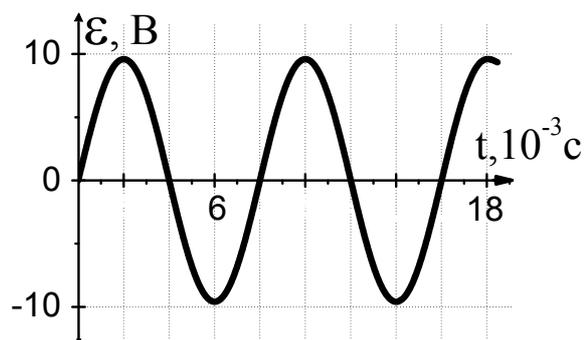
169. Определить период колебаний ЭДС.

- 1) 3 мс;
- 2)  $12 \cdot 10^{-3}$  с;
- 3)  $9 \cdot 10^{-3}$  с;
- 4) 15 мс.



170. Дан график зависимости ЭДС от времени. Если данный источник замкнуть на нагрузку, то период колебаний электрического тока будет равен...

- 1) 6 мс;
- 2)  $12 \cdot 10^{-3}$  с;
- 3)  $9 \cdot 10^{-3}$  с;
- 4) 18 мс.



171. При какой частоте наступит резонанс напряжений, если в цепь включена индуктивность 100 Гн и ёмкость 6,4 мкФ?

- 1) 1,25 Гц;
- 2) 640 мкГц;
- 3) 0,64 Гц;
- 4) 1250 Гц.

172. Как изменятся ёмкостное и индуктивное сопротивление при увеличении частоты переменного тока в 3 раза?

- 1) оба уменьшатся в 3 раза;
- 2) индуктивное возрастет в 3 раза, ёмкостное уменьшится в 3 раза;
- 3) ёмкостное возрастет в 3 раза, индуктивное уменьшится в 3 раза;
- 4) оба возрастут в 3 раза.

173. Максимальное значение напряжения переменного тока на активном сопротивлении 81 Ом составляет 180 В. Определить эффективную выделяемую мощность на этом сопротивлении.

- 1) 14,6 кВт;
- 2) 400 Вт;
- 3) 200 Вт;
- 4) 2,2 кВт.

174. При помощи трансформатора понизили напряжение с 220 В до 11 В. Если по первичной обмотке протекает ток 10 мА, то во вторичной цепи можно отобрать мощность не более...

- 1) 2,2 Вт;
- 2) 11 Вт;
- 3) 110 мВт;
- 4) 22 Вт.

## Электромагнитные волны

175. Открытый колебательный контур – это...

- 1) участок цепи с конденсатором;
- 2) участок цепи, состоящий из куска прямого провода;
- 3) участок цепи с катушкой индуктивности;
- 4) участок цепи с конденсатором и катушкой индуктивности.

176. Скорость распространения электромагнитных волн...

- 1) всегда совпадает со скоростью  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с;
- 2) всегда совпадает со скоростью света в данной среде;
- 3) всегда меньше скорости света в данной среде;
- 4) всегда больше скорости света в данной среде.

177. Определить частоту колебаний вектора индукции  $\mathbf{B}$  электромагнитной волны, если длина электромагнитной волны в вакууме составляет  $3 \cdot 10^{-3}$  м.

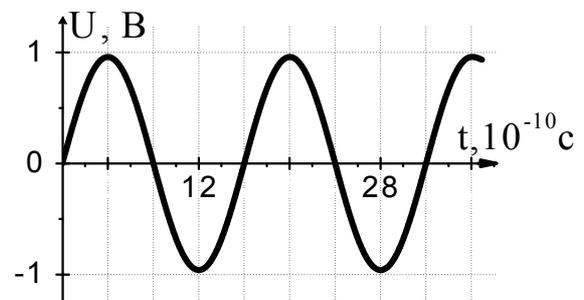
- 1)  $9 \cdot 10^5$  Гц;
- 2)  $10^{11}$  Гц;
- 3)  $9 \cdot 10^{11}$  Гц;
- 4)  $10^{12}$  Гц.

178. Относительный показатель преломления света в стекле  $n = 2$ , скорость распространения электромагнитных волн в таком стекле равна...

- 1)  $6 \cdot 10^8$  м/с;
- 2)  $3 \cdot 10^8$  м/с;
- 3)  $1,5 \cdot 10^8$  м/с;
- 4)  $0,75 \cdot 10^8$  м/с.

179. Дан график зависимости напряжения от времени в открытом колебательном контуре. Длина излучаемой волны равна...

- 1) 48 см;
- 2)  $12 \cdot 10^{-2}$  м;
- 3)  $84 \cdot 10^{-2}$  м;
- 4) 28 см.



180. Вектор напряженности электрического поля электромагнитной волны меняется со временем по закону  $E = 2\sin(1,5 \cdot 10^{-7}t)$ . Угловая частота колебаний равна...

- 1) 2;
- 2) 1,5;
- 3)  $1,5 \cdot 10^{-7}$ ;
- 4)  $2,4 \cdot 10^{-7}$ .

**181.** Вектор напряженности электрического поля электромагнитной волны меняется со временем по закону  $E = 2\sin(1,5 \cdot 10^{-7}t)$ . Частота колебаний равна...

- 1) 2;                      2) 1,5;                      3)  $1,5 \cdot 10^{-7}$ ;                      4)  $2,4 \cdot 10^{-7}$ .

**182.** Модуляция – это...

- 1) наложение звуковой волны на несущую электромагнитную волну;  
2) обрезание отрицательной составляющей электромагнитной волны;  
3) удаление несущей частоты электромагнитной волны;  
4) распространение электромагнитных волн.

### **Задачи повышенного и высокого уровня сложности**

**183.** Определить значение двух одинаковых точечных зарядов, которые в вакууме на расстоянии 90 см отталкиваются друг от друга с силой 10 Н.

(Ответ:  $3 \cdot 10^{-5}$  Кл, либо  $-3 \cdot 10^{-5}$  Кл.)

**184.** Два заряда, находясь в первой среде на расстоянии 2 см, взаимодействуют с силой 75 мкН, а находясь во второй среде на расстоянии 5 см, взаимодействуют с силой  $1,2 \cdot 10^{-5}$  Н. Найти отношение диэлектрической проницаемости второй среды к первой. (Ответ: 1.)

**185.** Точечный заряд  $4,5 \cdot 10^{-10}$  Кл сначала расположили в воде, а потом в спирте. Определить насколько изменилось расстояние от заряда до точки с напряженностью 5 В/м? (Ответ: на 8 см.)

**186.** Два одинаковых положительных заряда  $q_{1,2} = 1,73 \cdot 10^{-10}$  Кл расположены в вакууме в вершинах равностороннего треугольника, стороны которого равны 3,46 см. Определить напряженность поля в свободной от заряда вершине треугольника. (Ответ: 2,25 кВ/м.)

**187.** Два одинаковых отрицательных заряда  $q_{1,2} = -3,46 \cdot 10^{-10}$  Кл расположены в вакууме в вершинах равностороннего треугольника, стороны которого равны 1,73 см. Определить напряженность поля в свободной от заряда вершине треугольника. (Ответ: 18 кВ/м.)

**188.** Два одинаковых по величине, но противоположных по знаку заряда  $|q| = 10^{-10}$  Кл расположены в вакууме в вершинах равностороннего треугольника, стороны которого равны 3 см. Определить напряженность поля в свободной от заряда вершине треугольника. (Ответ: 1 кВ/м.)

189. В вершинах равностороннего треугольника расположены два заряда  $2q$  и  $-q$ . Определить напряженность электрического поля в свободной от зарядов вершине треугольника, если известно, что в этой точке заряд  $q$  создал бы напряженность  $15 \text{ В/м}$ . (Ответ:  $26 \text{ В/м}$ .)
190. В вершинах прямоугольного равнобедренного треугольника расположены электрические заряды. Расстояние от заряда  $q_2 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$  до зарядов  $q_1$  и  $q_3$ , равных  $10^{-5} \text{ Кл}$ , составляет  $0,82 \text{ см}$ . Какую наименьшую работу необходимо совершить, чтобы расставить заряды по порядку номеров на одинаковом расстоянии  $0,82 \text{ см}$ ? (Ответ:  $45 \text{ Дж}$ .)
191. В каждой вершине квадрата со стороной  $3 \text{ см}$  расположен точечный заряд  $1 \text{ мКл}$ . Определить результирующую силу, действующую на каждый из зарядов. (Ответ:  $19,1 \text{ Н}$ .)
192. В горизонтальное однородное электрическое поле с напряженностью  $10^6 \text{ В/м}$  вносят подвешенный на шелковой нерастяжимой нити заряженный шарик массой  $5 \text{ г}$ . Определить угол отклонения шарика от положения равновесия, если на нем имеется электрический заряд  $2,9 \text{ нКл}$ . (Ответ  $30^\circ$ .)
193. Два шарика плотностью  $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$  подвесили в общей точке на шелковых нерастяжимых нитях одной длины и зарядили так, что шары разошлись в воздухе на некоторый угол. При погружении таких шариков в некоторую жидкость с плотностью  $700 \text{ кг/м}^3$  угол между нитями остался неизменным. Найдя диэлектрическую проницаемость жидкости, определить ее название. (Ответ:  $2$ , керосин.)
194. Три концентрические сферы радиусами  $R$ ,  $2R$ ,  $3R$  равномерно заряжены по поверхности зарядами  $2q$ ,  $-q$ ,  $3q$  соответственно. Чему будет равна напряженность поля на расстоянии  $2,5R$  от центра сфер, если в этот центр поместить точечный заряд  $q$ , который на расстоянии  $R$  создает напряженность  $12,5 \text{ В/м}$ ? (Ответ:  $4 \text{ В/м}$ .)
195. Два проводящих шара радиусами  $4 \text{ см}$  и  $10 \text{ см}$  имеют электрические заряды  $40 \text{ нКл}$  и  $30 \text{ нКл}$  соответственно и находятся на большом расстоянии. Какие заряды окажутся на шарах, если их соединить проводником с бесконечно малой емкостью? (Ответ:  $20 \text{ нКл}$  и  $50 \text{ нКл}$ .)
196. Маленький заряженный шарик ( $q = 2 \cdot 10^{-6}$ ) массой  $30 \text{ г}$  из состояния покоя на высоте  $1,25 \text{ м}$  начинает движение без трения по наклонной плоскости с углом наклона  $45^\circ$  и  $\epsilon = 1$ . Найти кинетическую энергию шарика в нижней

точке наклонной плоскости, если под точкой начала движения шарика в основании наклонной плоскости расположен электрический заряд  $10^{-3}$  Кл.

(Ответ: 375 мДж.)

**197.** Маленький заряженный шарик ( $q = 2 \cdot 10^{-6}$ ) из состояния покоя на высоте 1,8 м начинает движение без трения по наклонной плоскости с углом наклона  $45^\circ$  и  $\varepsilon = 1$ . Найти скорость шарика в нижней точке наклонной плоскости, если под точкой начала движения шарика в основании наклонной плоскости расположен электрический заряд  $10^{-3}$  Кл.

(Ответ: 6 м/с.)

**198.** Маленький заряженный шарик ( $q = \cdot 10^{-5}$ ) массой 42 г из состояния покоя на высоте 1,8 м начинает движение без трения по наклонной плоскости с углом наклона  $30^\circ$  и  $\varepsilon = 1$ . Найти скорость шарика в нижней точке наклонной плоскости, если под точкой начала движения шарика в основании наклонной плоскости расположен электрический заряд  $1,3 \cdot 10^{-5}$  Кл.

(Ответ: 7 м/с.)

**199.** Точечное тело массой 0,1 г, несущее заряд  $10^{-7}$  Кл, перемещается из начальной точки с потенциалом 500 В в конечную точку с нулевым потенциалом. Определить скорость в начальной точке, если в точке с нулевым потенциалом скорость оказалась 2 м/с.

(Ответ: 1,73 м/с.)

**200.** Капля заряженной ртути упала на стол и разлетелась на 1000 мелких ртутных шариков радиусом 1 мм. Найти потенциал капли ртути в момент касания стола, если заряд каждого ртутного шарика оказался равным  $10^{-14}$  Кл.

(Ответ: 9 В.)

**201.** Электрон влетает со скоростью 900 км/с в однородное электрическое поле с напряженностью 36 В/м и движется вдоль силовых линий без столкновений. Определить расстояние, пройденное электроном до первой остановки.

(Ответ: 12,5 см.)

**202.** Электрон со скоростью 900 км/с влетает в электрическое поле с напряженностью 36 В/м и беспрепятственно движется по направлению линий напряженности. Какое время он будет находиться в непрерывном движении?

(Ответ: 0,28 пс.)

**203.** Электрон влетает со скоростью 1800 км/с в однородное электрическое поле с напряженностью 500 В/м и движется вдоль силовых линий без столкновений. Определить время движения электрона до первой остановки.

(Ответ:  $2 \cdot 10^{-8}$  с.)

- 204.** Электрон вращается по круговой орбите радиусом  $10^{-10}$  м вокруг ядра с зарядом  $Z = 4$  (в ядре находятся 4 протона). Найти скорость электрона на орбите. (Ответ: 3200 км/с.)
- 205.** Плоский воздушный конденсатор зарядили от источника с напряжением 350 В и после отключения источника к этому конденсатору подключили параллельно другой незаряженный, таких же размеров, но заполненный диэлектриком. В результате разность потенциалов в точках соединения оказалась 50 В. Найти диэлектрическую проницаемость диэлектрика второго конденсатора. (Ответ: 6.)
- 206.** В заряженном конденсаторе электрон, двигающийся без начальной скорости от одной пластины к другой, достигает максимальной скорости 4,24 м/с. Какой максимальной скорости сможет достичь другой электрон, так же начинающий движение, если к этому, отключенному от источника конденсатору, параллельно подключить такой же незаряженный конденсатор? (Ответ: 3 м/с.)
- 207.** В заряженном конденсаторе электрон, двигающийся без начальной скорости от одной пластины к другой, достигает максимальной скорости 5,66 м/с. Какой максимальной скорости сможет достичь другой электрон, так же начинающий движение, если к этому, отключенному от источника конденсатору, последовательно подключить такой же незаряженный конденсатор? (Ответ: 4 м/с.)
- 208.** Посередине между протяженными вертикальными непроводящими пластинами, отстоящими друг от друга на расстояние 8 см, закреплен точечный заряд  $2 \cdot 10^{-5}$  Кл, имеющий массу 16 г. Пластины заряжают так, что между ними образуется постоянное электрическое поле с напряженностью  $10^6$  В/м, и заряд освобождают. Через какое время после начала движения заряд достигнет пластины? (Ответ: 8 мс.)
- 209.** Плоский воздушный конденсатор с малым зазором между пластинами, напряженность электрического поля в котором составляет 25 кВ/м, изгибают дугой радиусом 1 м так, что однородность и напряженность поля в конденсаторе сохраняются. В зазор между пластинами влетает дважды ионизированный атом массой  $2 \cdot 10^{-25}$  кг. Какова должна быть скорость этой частицы, чтобы пролететь насквозь через конденсатор? (Ответ:  $2 \cdot 10^{-5}$  м/с.)

- 210.** В плоский конденсатор с длиной 10 см и расстоянием между пластинами 10 мм влетает электрон с энергией 2 кэВ под углом  $15^\circ$  к нижней пластине. Какое напряжение надо подать на конденсатор, чтобы электрон, покидая пространство конденсатора, двигался параллельно его нижней пластине?  
(Ответ: 200 В.)
- 211.** Два конденсатора, имеющие емкости 5 мкФ и 10 мкФ, соединили одноименными полюсами. Найти разность потенциалов после соединения, если известно, что первый был заряжен до напряжения 10 В, а второй – до 40 В.  
(Ответ: 30 В.)
- 212.** Заряженная пылинка массой  $10^{-14}$  г, находясь в плоском воздушном конденсаторе с расстоянием между пластинами 1 см, уравновешена напряжением 4 В. В пространстве между пластинами проскальзывает луч света, и пылинка теряет часть заряда. Заряд какой величины потеряла пылинка, если напряжение на обкладках конденсатора для ее уравновешивания пришлось увеличить на 4 В?  
(Ответ:  $6,4 \cdot 10^{-19}$  Кл.)
- 213.** Два одинаковых плоских конденсатора соединены параллельно и подключены к источнику с напряжением 75 В. После зарядки и отключения конденсаторов от источника тока расстояние между пластинами одного из них уменьшили в 2 раза. Найти новую разность потенциалов на конденсаторах.  
(Ответ: 50 В.)
- 214.** В плоском конденсаторе пространство между пластинами заполнено на толщину 1 мм оргстеклом и на толщину 2 мм – парафином. Найти напряженность электрического поля в каждом слое при напряжении на обкладках конденсатора 350 В.  
(Ответ: 0,21 кВ/м и 0,28 кВ/м.)
- 215.** Найти внутреннее сопротивление источника тока, который через сопротивление в 2 Ом пропускает ток 4А, а при сопротивлении 6 Ом ток становится равным 2 А.  
(Ответ: 4 Ом.)
- 216.** Найти силу токов, протекающих по двум параллельным сопротивлениям, первое из которых 12 Ом, а второе – 8 Ом, если источником тока является аккумулятор с ЭДС 10 В и внутренним сопротивлением 0,2 Ом.  
(Ответ:  $I_1 = 0,8$  А,  $I_2 = 1,2$  А.)
- 217.** Имеются резисторы номиналом 2, 3, 4 и 5 Ом. Как, используя все резисторы, получить результирующее сопротивление 3,5 Ом? 6,5 Ом?

- 218.** Можно ли, используя нихромовую проволоку диаметром 0,44 мм, обеспечить нормальный накал лампы мощностью 10 Вт, рассчитанной на напряжение 12 В, если имеется аккумулятор с ЭДС 24 В? Внутренним сопротивлением аккумулятора пренебречь. (Ответ: при  $\ell = 20$  м.)
- 219.** Имеются два резистора, при помощи которых можно получить наименьшее сопротивление 3,75 Ом и наибольшее 16 Ом. Определить сопротивление каждого резистора. (Ответ: 6 Ом и 10 Ом.)
- 220.** К источнику тока с ЭДС 4 В и внутренним сопротивлением 0,02 Ом серебряными проводами диаметром 0,4 мм и длиной 3 м 14 см подключили нагрузку. Определить сопротивление нагрузки, если при включении тока идеальный вольтметр на клеммах источника показал значение 3,96 В. (Ответ: 1,88 Ом.)
- 221.** Резистор с сопротивлением 3 кОм постоянно включен в розетку с напряжением 24 В. За какое время на нем выделится 3 МДж теплоты? (Ответ: 181 сутки.)
- 222.** К источнику тока с ЭДС 24 В параллельно подключили сопротивления 60 Ом и 40 Ом. Чему равно внутреннее сопротивление источника, если при включении тока амперметр в общей цепи показал 0,8 А? (Ответ: 6 Ом.)
- 223.** Два сопротивления 8 Ом и 24 Ом соединены параллельно, а последовательно с ними подключено еще 6 Ом. Чему равна сила тока через сопротивление 24 Ом, если напряжение на всем участке цепи составляет 37 В? (Ответ: 4,5 А.)
- 224.** В электрической цепи, питаемой источником тока с ЭДС 25 В, течет ток 10 А. Определить внутреннее сопротивление источника, если его КПД составляет 70 %. (Ответ: 0,75 Ом.)
- 225.** За одну минуту источник тока совершает работу в 1,2 кДж по разделению зарядов, что обеспечивает напряжение 12 В на лампе мощностью 10 Вт. Чему равно внутреннее сопротивление источника? (Ответ: 9,6 Ом.)
- 226.** Аккумулятор с ЭДС 32 В и внутренним сопротивлением 2 Ом нагружен сопротивлением 14 Ом. Найти скорость выделения теплоты во внешней цепи. (Ответ: 56 Вт.)

227. Электродпеч в сауне имеет два нагревателя. Температура воздуха в сауне поднимается на  $1^\circ$  за 6 мин при включении только первого нагревателя, а при включении только второго – за 3 мин. Через какое время температура в сауне повысится на  $1^\circ$ , если включить оба нагревателя?  
(Ответ: 2 мин.)
228. Два одинаковых источника с внутренним сопротивлением 1 Ом подключают к нагрузке разными способами. Первый замыкают на резистор с сопротивлением  $R_1$ , а второй – на четыре таких резистора, включенных параллельно. Однако мощность, выделяемая на нагрузке в обоих случаях, оказалась одинаковой. Найти значение  $R_1$ . (Ответ: 2 Ом.)
229. Во сколько раз отличаются сопротивления лампочек, если одна из них рассчитана на напряжение 127 В, а другая – на 220 В, а мощность первой лампы в два раза больше, чем у второй?  
(Ответ:  $R_2/R_1 = 6$ .)
230. В электрочайнике 2 л воды вскипели за 10 мин. Найти мощность нагревательного элемента, если КПД чайника 80 %, а начальная температура воды была  $20^\circ\text{C}$ .  
(Ответ: 1,4 кВт.)
231. Имеется мощный аккумулятор с ЭДС 120 В и внутренним сопротивлением 10 Ом. Для освещения помещения имеются несколько ламп мощностью 50 Вт, но напряжением 100 В. Как нужно включить лампы, чтобы обеспечить их нормальную работу?  
(Ответ: включить параллельно четыре лампы.)
232. Нагреватель подключен к батарее с ЭДС 24 В и внутренним сопротивлением 2 Ом. Чему равен КПД нагрева, если по цепи идет ток 3 А?  
(Ответ: 75 %.)
233. В цепи источника тока с ЭДС 24 В протекает ток 2 А. Найти внешнее сопротивление цепи, внутреннее сопротивление источника и его полезную мощность, если идеальный вольтметр показывает 20 В.  
(Ответ: 10 Ом; 2 Ом; 40 Вт.)
234. Два источника тока с ЭДС 4 В и 2,5 В и внутренним сопротивлением 3 Ом и 2 Ом соответственно соединены одноименными полюсами и включены в электрическую цепь с нагрузкой 10 Ом. Найти силу тока в цепи.  
(Ответ: 0,1 А.)

- 235.** Электрическая цепь состоит из источника тока с ЭДС 24 В и внутренним сопротивлением 1 Ом, а также параллельно соединенных резистора на 9 Ом и конденсатора с емкостью 2 мкФ. Какой заряд может накопиться на конденсаторе?  
(Ответ: 43,2 мкКл.)
- 236.** Электрическая цепь состоит из источника тока с ЭДС 12 В и внутренним сопротивлением 2 Ом, а также параллельно соединенных резистора на 18 Ом и конденсатора с емкостью 6 мкФ. Какова мощность источника тока?  
(Ответ: 6,5 Дж.)
- 237.** Источник тока с внутренним сопротивлением 0,1 Ом отдает во внешнюю цепь мощность 4 Вт при токе 2 А. Какая мощность будет выделяться во внешней цепи при токе 3 А?  
(Ответ: 5,7 Вт.)
- 238.** Электрическая цепь состоит из батареи, проводов, на которых выделяется 5 % электрической мощности, и двух лампочек по 50 Вт, включенных параллельно друг другу. Чему равно напряжение на клеммах источника тока, если по цепи идет ток 3 А?  
(Ответ: 35 В.)
- 239.** Как надо включить в сеть с постоянным напряжением 220 В лампу номиналом 100 В, 600 Вт, чтобы она горела в нормальном режиме?  
(Ответ: включить в цепь дополнительное сопротивление 20 Ом.)
- 240.** Электростатический вольтметр, подключенный к клеммам источника постоянного тока, показывает напряжение 180 В, а подключенный затем магнитоэлектрический вольтметр – 178 В. Определить ЭДС источника и внутреннее сопротивление вольтметров, если внутреннее сопротивление источника тока 80 Ом.  
(Ответ: 180 В, бесконечность, 7,12 кОм.)
- 241.** Найти силу тока короткого замыкания источника с ЭДС 12 В, если при подключении резистора с сопротивлением 20 Ом ток достигает 0,2 А.  
(Ответ: 0,3 А.)
- 242.** К источнику тока с внутренним сопротивлением 4 Ом вначале подключили нагрузку с сопротивлением 16 Ом, а затем параллельно первой нагрузке включили вторую, имеющую в два раза меньшее сопротивление. Во сколько раз изменилась потребляемая мощность?  
(Ответ: увеличилась в 2 раза)
- 243.** Определить удельное сопротивление материала, из которого изготовлен проводник длиной 94 см и диаметром 0,02 см, если при токе 2А на нем падает 0,6 В.  
(Ответ:  $4 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.)

- 244.** Напряжение  $2\text{ В}$  на  $3,1\text{ с}$  приложили к теплоизолированному однородному кусочку серебра с постоянным сечением по длине. Пренебрегая температурным коэффициентом сопротивления определить длину кусочка, если его температура за указанное время изменилась на  $20\text{ К}$ . (Ответ:  $8\text{ м}$ .)
- 245.** К источнику тока с ЭДС  $15\text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $2\text{ Ом}$  подключили нагрузку  $10\text{ Ом}$ , а затем параллельно этой нагрузке включили еще один участок цепи, состоящий из конденсатора с  $C = 2,4\text{ мкФ}$  и последовательного с ним сопротивления  $20\text{ Ом}$ . Определить заряд конденсатора при пропускании тока по такой цепи. (Ответ:  $3 \cdot 10^{-5}\text{ Кл}$ .)
- 246.** Электрон разгоняется разностью потенциалов  $0,9\text{ кВ}$  и, пролетая через однородное поперечное магнитное поле, занимающее область шириной  $5\text{ см}$ , отклоняется от первоначального направления на  $30^\circ$ . Определить величину магнитной индукции. (Ответ:  $1\text{ мТл}$ .)
- 247.** Провод диаметром  $2\text{ мм}$  свернули в кольцо с диаметром  $25\text{ см}$  и расположили его перпендикулярно переменному магнитному полю, изменяющему величину со скоростью  $2,56\text{ Тл/с}$ . Определить удельное сопротивление провода, если индукционный ток в нем  $31,4\text{ А}$ . (Ответ:  $1,6 \cdot 10^{-8}\text{ Ом}\cdot\text{м}$ .)
- 248.** Проводящий куб с ребром  $4\text{ см}$  поступательно движется со скоростью  $2\text{ м/с}$  перпендикулярно магнитному полю с магнитной индукцией  $0,8\text{ Тл}$ . Учитывая, что скорость куба перпендикулярна вектору магнитной индукции, определить напряженность электрического поля в движущемся кубе. (Ответ:  $1,6\text{ В/м}$ .)
- 249.** Проводящий куб с ребром  $5\text{ см}$  поступательно движется со скоростью  $3\text{ м/с}$  перпендикулярно магнитному полю с магнитной индукцией  $1,2\text{ Тл}$ . Учитывая, что скорость куба перпендикулярна вектору магнитной индукции, определить разность потенциалов между центром куба и любой из его вершин. (Ответ:  $90\text{ мВ}$ .)
- 250.** Горизонтально расположенный провод длиной  $10\text{ см}$  находится в вертикальном магнитном поле с индукцией  $1,5\text{ Тл}$  и начинает свободно падать из состояния покоя. Определить ЭДС индукции в проводе, когда он будет находиться на расстоянии  $20\text{ см}$  от положения покоя. (Ответ:  $0,3\text{ В}$ .)

- 251.** Горизонтальная квадратная рамка площадью  $9 \text{ см}^2$  с сопротивлением  $27 \text{ мОм}$  из области без магнитного поля поступательно пересекает область однородного вертикального магнитного поля с индукцией  $0,5 \text{ Тл}$  и опять оказывается вне магнитного поля. Для поддержания постоянной скорости рамки в определенные периоды приходится прикладывать внешние горизонтальные силы, суммарная работа которых за время движения равна  $4 \text{ мДж}$ . С какой скоростью перемещалась рамка, если область магнитного поля занимала  $12 \text{ см}$ ? (Ответ:  $4 \text{ м/с}$ .)
- 252.** Находясь в вертикальном магнитном поле с индукцией  $0,2 \text{ Тл}$ , из состояния покоя, без трения, поступательно соскальзывает с вершины наклонной диэлектрической плоскости (угол наклона  $30^\circ$  к горизонту) проводящий брусок с длиной  $30 \text{ см}$  (перпендикулярной скорости бруска). Найти модуль ЭДС индукции в бруске в момент прохождения по плоскости отметки  $2,5 \text{ м}$ . (Ответ:  $0,26 \text{ В}$ .)
- 253.** К источнику тока с напряжением  $10 \text{ В}$  параллельно подключены два участка цепи. Первый состоит из резистора  $5 \text{ Ом}$  и конденсатора на  $80 \text{ мкФ}$ , второй – из катушки индуктивности с индуктивностью  $10 \text{ мГн}$  и лампочки с сопротивлением  $10 \text{ Ом}$ . По цепи пропускают ток до полной зарядки конденсатора, а затем источник отключают. Какая энергия выделится соответственно на резисторе и на лампочке после отключения источника? (Ответ:  $3 \text{ мДж}$  и  $6 \text{ мДж}$ .)
- 254.** Определить ЭДС самоиндукции в контуре, в котором сила тока изменяется по закону  $I = 15 + 3t$ , если в начальный момент времени магнитный поток через контур был равен  $2 \text{ Вб}$ . (Ответ:  $0,4 \text{ В}$ .)
- 255.** Квадратная рамка со стороной  $4 \text{ см}$ , имеющая  $100$  витков и замкнутая на гальванометр с сопротивлением  $1 \text{ кОм}$ , находится в однородном магнитном поле с магнитной индукцией  $0,1 \text{ Тл}$ . Магнитные линии перпендикулярны плоскости рамки, а ее электросопротивление ничтожно. Какой заряд пройдет через рамку, если направление поля поменять на обратное? (Ответ  $3 \text{ мКл}$ .)
- 256.** Определить максимальное значение индукционного тока в квадратной рамке из медной проволоки диаметром  $1 \text{ мм}$ , состоящей из  $100$  витков и имеющей площадь сечения  $4 \text{ см}$ , если рамка вращается с частотой  $60 \text{ об/с}$  в однородном магнитном поле с индукцией  $0,19 \text{ Тл}$ . (Ответ:  $0,24 \text{ А}$ .)

257. Проволочный виток площадью  $40 \text{ см}^2$ , замыкающий обкладки незаряженного конденсатора, помещен в магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны плоскости витка. Магнитная индукция изменяется по закону  $B = 0,02t$ . Чему равен заряд конденсатора, если он имеет емкость  $15 \text{ мкФ}$ ? (Ответ:  $1,2 \text{ нКл}$ .)
258. Пройдя разность потенциалов  $10^3 \text{ В}$ , электрон влетает в однородное магнитное поле с индукцией  $7,5 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$  и движется там по окружности радиусом  $10 \text{ см}$ . Вычислить удельный заряд электрона. (Ответ:  $1,8 \cdot 10^{11} \text{ Кл}$ .)
259. Колебательный контур составили из ключа, катушки индуктивности  $8 \text{ мГн}$  и заряженного до  $6 \text{ В}$  конденсатора емкостью  $10^{-7} \text{ Ф}$ . Ключ замкнули. Определить величину тока в момент, когда энергия магнитного поля окажется в два раза больше энергии электрического. (Ответ:  $30 \text{ мА}$ .)
260. Прямолинейный проводник массой  $10 \text{ г}$ , по которому протекает ток  $1 \text{ А}$ , внесли в однородное горизонтальное магнитное поле с индукцией  $0,5 \text{ Тл}$ . Проводник, двигаясь к магнитным линиям под углом  $30^\circ$ , поднимается вертикально вверх и через  $3 \text{ с}$  достигает скорости  $6 \text{ м/с}$ . Какую длину имеет проводник? (Ответ:  $2,4 \text{ см}$ .)
261. Найти магнитный поток сквозь один виток, если при его равномерном уменьшении до нуля в течение  $10 \text{ мс}$  в катушке, имеющей  $500$  витков, индуцируется ЭДС  $12 \text{ В}$ . (Ответ:  $0,24 \text{ мкВб}$ .)
262. В однородном магнитном поле с индукцией  $0,5 \text{ Тл}$  перпендикулярно к магнитным линиям движется проводник длиной  $5 \text{ см}$ . Определить скорость движения проводника, если на его концах возникла разность потенциалов  $20 \text{ мВ}$ , а скорость его движения направлена под углом  $30^\circ$  к самому проводнику. (Ответ:  $1,6 \text{ м/с}$ .)
263. Определить длину волны электромагнитных колебаний, излучаемых контуром, в котором при свободных колебаниях максимальный заряд конденсатора равен  $10^{-5} \text{ Кл}$ , а максимальный ток достигает  $3,14 \text{ А}$ . (Ответ:  $6 \text{ кГц}$ .)

## Справочные данные

Таблица 2. **Физические константы**

Наименование	Численное значение
Число $\pi$	$\pi = 3,14$
Ускорение свободного падения на Земле	$g = 10 \text{ м/с}^2$
Гравитационная постоянная	$G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$
Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Коэффициент пропорциональности в законе Кулона	$k = 1/(4 \pi \epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$
Заряд электрона	$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
1 электронвольт	$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
Удельная теплоемкость воды	$4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$

Таблица 3. **Удельное электросопротивление и плотность веществ**

Вещество	Удельное электросопротивление	Плотность
Алюминий	$2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	$2700 \text{ кг/м}^3$
Медь	$1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	$8900 \text{ кг/м}^3$
Нихром	$110 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	$8300 \text{ кг/м}^3$
Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	$10500 \text{ кг/м}^3$

Таблица 4. **Электрохимический эквивалент некоторых веществ**

Вещество	Электрохимический эквивалент
Хром	$0,18 \text{ мг/Кл}$
Никель	$0,30 \text{ мг/Кл}$

Таблица 5. **Относительная диэлектрическая проницаемость веществ**

Вещество	Диэлектрическая проницаемость	Вещество	Диэлектрическая проницаемость
Вода	81	Оргстекло	3,3
Спирт этиловый	25	Парафин	2,2
Керосин	2,0		

Таблица 6. Ключи к задачам с 1 по 182

1	1	22	4	43	3	64	4	85	1	106	3	127	3	148	2	169	2
2	4	23	2	44	3	65	1	86	2	107	4	128	3	149	4	170	3
3	1	24	1	45	4	66	3	87	3	108	4	129	1	150	1	171	1
4	3	25	3	46	1	67	2	88	1	109	4	130	1	151	3	172	3
5	3	26	1	47	3	68	3	89	3	110	4	131	3	152	2	173	3
6	2	27	4	48	2	69	3	90	4	111	2	132	2	153	2	174	1
7	3	28	2	49	4	70	4	91	2	112	2	133	3	154	2	175	2
8	4	29	3	50	3	71	1	92	3	113	3	134	4	155	1	176	2
9	2	30	3	51	1	72	1	93	4	114	1	135	4	156	2	177	2
10	1	31	1	52	3	73	2	94	1	115	1	136	3	157	3	178	3
11	1	32	3	53	1	74	3	95	1	116	2	137	3	158	2	179	1
12	2	33	3	54	2	75	3	96	3	117	3	138	3	159	1	180	3
13	3	34	1	55	1	76	4	97	2	118	2	139	3	160	3	181	4
14	4	35	3	56	3	77	1	98	4	119	3	140	1	161	1	182	1
15	4	36	4	57	4	78	2	99	3	120	1	141	4	162	2		
16	2	37	1	58	2	79	4	100	2	121	3	142	1	163	4		
17	1	38	4	59	3	80	3	101	3	122	1	143	2	164	4		
18	4	39	3	60	4	81	3	102	3	123	4	144	2	165	2		
19	3	40	3	61	4	82	2	103	1	124	2	145	4	166	1		
20	4	41	1	62	2	83	2	104	1	125	2	146	2	167	2		
21	4	42	4	63	2	84	4	105	2	126	1	147	3	168	1		

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вы познакомились с начальными основами электродинамики. При этом не надо думать, что изложенные в этой книге материалы и приведенные в ней задачи охватывают весь круг вопросов, изучаемых современной наукой в этом направлении.

Электрические и магнитные явления известны с древних времен. Однако лишь во 2-й половине XVIII в. появились первые измерительные приборы, позволившие начать экспериментальные работы по изучению электрических явлений. В 1820 г. Х. Эрстед обнаружил связь между электрическими и магнитными явлениями, а в 1831 г. Майкл Фарадей открыл электромагнитную индукцию. В конце XIX — начале XX вв. Х. Лоренц, опираясь на молекулярно-кинетическую теорию, заложил основы электронной теории строения вещества, из которой Максвелл получил свою систему уравнений, ставших вершиной классической электродинамики. До сих пор, несмотря на открытия новых фактов и создание новых теорий, уравнения Максвелла и классическая электронная теория сохраняют силу, являясь фундаментом большинства разделов электротехники, радиотехники, электроники, оптики, за исключением квантовых разделов электроники и оптики. С помощью классической электродинамики решаются, к примеру, задачи управляемого термоядерного синтеза. Законы классической электродинамики охватывают огромную совокупность электромагнитных процессов. Среди четырех типов взаимодействий – электромагнитных, гравитационных, сильных и слабых, существующих в природе, электромагнитные занимают первое место по широте и разнообразию проявлений. Это связано с тем, что все тела построены из нейтральных и электрически заряженных частиц противоположных знаков, которые непрерывно взаимодействуют между собой.

Для более глубокого изучения электродинамики рекомендуем воспользоваться следующей литературой:

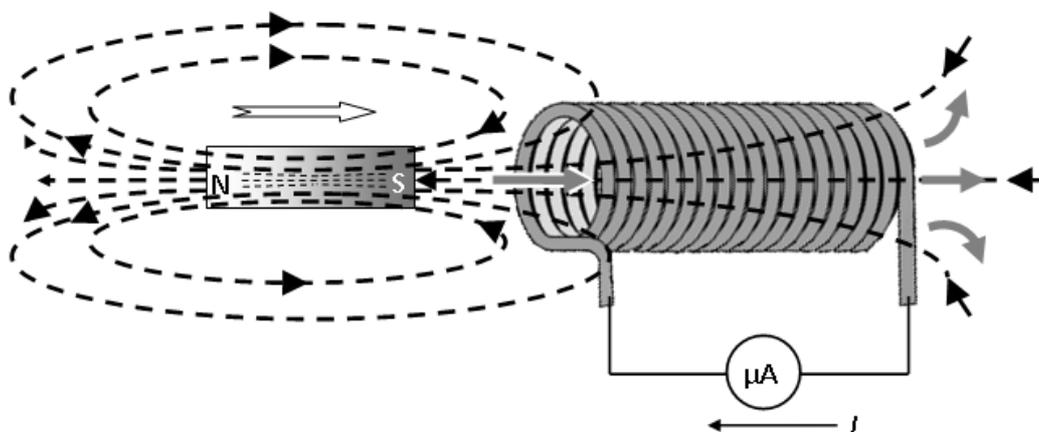
1. Бутиков, Е. И. Физика: учеб. пособие: в 3 кн. Электродинамика. Оптика / Е. И. Бутиков, А. С. Кондратьев. – М.: ФизМатЛит, 2008.
2. Трофимова, Т. И. Основы физики. Электродинамика.: учеб. пособие / Т. И. Трофимова. — М. : КНОРУС, 2011. — 272 с.

Учебное издание

Урюпин Олег Николаевич

Урюпина Ксения Олеговна

**К ЕГЭ ГОТОВ!**



**Ф И З И К А**

**Часть III**

**Электродинамика**

Учебное пособие

Оригинал-макет подготовлен авторами и издан в авторской редакции  
Подписано в печать 09.11.2012 г. Формат 60x84 1/16. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 7,4. Тираж 100 экз. Заказ

Сайт: <http://www.sutd.ru> E-mail: [physicsutd@mail.ru](mailto:physicsutd@mail.ru)

Отпечатано в типографии ФГБОУВПО «СПГУТД»

191028, Санкт-Петербург, ул. Моховая, 26