

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Санкт-Петербургский  
государственный университет аэрокосмического приборостроения

---

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО  
МАГНЕТИЗМ  
ОПТИКА

Сборник задач

Санкт-Петербург  
2002

ББК 22.33  
УДК 537+535  
Э45

Авторы: **Коваленко И. И., Лавровская Н. П., Литвинова Н. Н. и др.**

Э45 Электричество. Магнетизм. Оптика: Сборник задач/ Под ред. *Е. Н. Котликова* и *И. И. Коваленко*; СПбГУАП. СПб., 2002. 80 с.: ил.

Сборник включает задачи по курсу общей физики, из которых составляются домашние задания для студентов всех специальностей, обучающихся на факультетах № 1, 2, 3, 4 и 6.

Рецензент:

доктор физико-математических наук *В. Г. Фарафонов*

Утверждено

редакционно-издательским советом университета  
в качестве сборника задач

© Санкт-Петербургский  
государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, 2002

Учебное издание

**Коваленко** Иван Иванович  
**Лавровская** Наталья Павловна  
**Литвинова** Надежда Николаевна  
**Орлов** Валерий Федорович  
**Царев** Юрий Николаевич  
**Шифрин** Борис Фридманович  
**Щербак** Сергей Яковлевич

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО  
МАГНЕТИЗМ  
ОПТИКА  
Сборник задач

Редактор *А. В. Подчепалева*  
Компьютерная верстка *М.А. Даниловой*

---

Сдано в набор 16.12.02 Подписано к печати 30.12.02. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 4,6. Уч. -изд. л. 4,98. Тираж 700 экз. Заказ №

---

Редакционно-издательский отдел  
Отдел электронных публикаций и библиографии библиотеки  
Отдел оперативной полиграфии  
СПбГУАП

190000, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Сборник задач состоит из трех частей: электричество, магнетизм, оптика. Каждая часть включает несколько разделов. В начале каждого раздела приведены основные формулы, комментарии к ним и краткие теоретические сведения.

Решение задачи студент должен довести до конца в общем виде, т. е. выразить искомую величину через данные задачи и константы. Решение сложных задач допускается выполнять поэтапно, т.е. разбить задачу на несколько частей и решать их последовательно. Правильный численный ответ сам по себе не является решением задачи.

Учебный материал подготовлен коллективом авторов кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения: Коваленко И. И. – разделы 3, 5, 6, 12; Лавровская Н. П. – разделы 13, 14; Литвинова Н. Н. – разделы 4, 7; Орлов В. Ф. – разделы 1, 2; Царев Ю. Н. – разделы 8, 9; Шифрин Б. Ф. – разделы 10, 11; Щербак С. Я. – разделы 5, 15.

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

## 1. Взаимодействие электрических зарядов. Напряженность электрического поля

### *Теоретические сведения*

Закон Кулона

$$F = \frac{k|q_1q_2|}{\epsilon r^2}, \quad (1.1)$$

где  $F$  – сила взаимодействия двух точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$ ;  $r$  – расстояние между ними;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}; \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}.$$

Напряженность электрического поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad (1.2)$$

где  $\vec{F}$  – сила, действующая на точечный электрический заряд  $q$ , помещенный в электрическое поле.

Сила, действующая на точечный заряд  $q$  в электрическом поле:

$$\vec{F} = q\vec{E}. \quad (1.3)$$

Напряженность электрического поля точечного заряда  $q$  на расстоянии  $r$  от него

$$E = \frac{k|q|}{\epsilon r^2}. \quad (1.4)$$

Принцип суперпозиции для напряженности электрического поля от  $N$  точечных источников

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_N = \sum_i^N \vec{E}_i. \quad (1.5)$$

Принцип суперпозиции для напряженности электрического поля непрерывно распределенного заряда

$$\vec{E} = \int \frac{dq \vec{r}}{\epsilon r^3}. \quad (1.6)$$

В этой формуле интегрирование ведется по всей заряженной области. Напряженность электрического поля заряженной сферы радиуса  $R$ :

$$\text{для точек вне сферы, т. е. при } r > R, E = \frac{k|q|}{\epsilon r^2}; \quad (1.7)$$

$$\text{для точек внутри сферы, т. е. при } r \leq R, E = 0. \quad (1.8)$$

Напряженность электрического поля от длинной равномерно заряженной нити с линейной плотностью заряда  $\lambda$  на расстоянии  $r$  от нее

$$E = \frac{2k|\lambda|}{\epsilon r} = \frac{|\lambda|}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r}. \quad (1.9)$$

Напряженность электрического поля равномерно заряженной плоскости с поверхностной плотностью заряда  $\sigma$

$$E = \frac{|\sigma|}{2\epsilon\epsilon_0}. \quad (1.10)$$

Напряженность электрического поля внутри плоского конденсатора с разноименно заряженными обкладками с поверхностной плотностью заряда  $\sigma$

$$E = \frac{|\sigma|}{\epsilon\epsilon_0}. \quad (1.11)$$

### *Задачи*

**1.1.** Два одинаковых шарика массами по 0,5 г, подвешенные на нитях длиной 1 м, разошлись на 4 см друг от друга. Найти заряды шариков, считая их одинаковыми.

**1.2.** Два одинаковых заряженных шарика, подвешенные на нитях одинаковой длины, разошлись на некоторый угол. После того, как шарики погрузили в масло плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$ , этот угол не изменился. Плотность материала шариков  $1600 \text{ кг/м}^3$ . Найти диэлектрическую проницаемость масла.

**1.3.** Расстояние между двумя одинаковыми по величине 1 мкКл разноименными точечными зарядами равно 10 см. Какая сила будет действовать на третий заряд 0,1 мкКл, помещенный на расстоянии 6 см от одного и 8 см другого заряда?

**1.4.** На двух одинаковых капельках воды имеется по одному лишнему электрону. При этом сила электрического отталкивания капелек равна силе их взаимного тяготения. Найти радиусы капелек.

**1.5.** Три одинаковых электрических заряда по 1 нКл каждый помещены в вершинах равностороннего треугольника. Какой заряд нужно поместить в центр этого треугольника, чтобы система зарядов оказалась в равновесии?

**1.6.** В вершинах правильного шестиугольника со стороной 10 см расположены точечные заряды  $q, 2q, 3q, 4q, 5q$  и  $6q$ , где  $q = 0,1$  мкКл. Найти силу, действующую на точечный заряд  $q' = 0,1$  мкКл, помещенный в центр этого шестиугольника.

**1.7.** Два точечных заряда  $q$  и  $2q$  находятся на расстоянии 20 см от друга. На каком расстоянии от первого заряда надо поместить третий заряд другого знака, чтобы он оказался в равновесии?

**1.8.** Два одинаковых маленьких металлических шарика, находящиеся на расстоянии 60 см, отталкиваются с силой 70 мкН. После соприкосновения и удаления на прежнее расстояние шарики стали отталкиваться с силой 160 мкН. Найти начальные заряды шариков.

**1.9.** Два одинаковых точечных заряда находятся на расстоянии 20 см друг от друга. На каком расстоянии от первого заряда надо поместить третий заряд другого знака вдвое больший по величине, чтобы второй заряд оказался в равновесии?

**1.10.** По представлениям Бора электрон в атоме водорода движется по круговой орбите радиусом 50 пм. Найти скорость электрона.

**1.11.** В вершинах квадрата находятся одинаковые заряды 0,3 нКл. Какой заряд нужно поместить в центр квадрата, чтобы вся система оказалась в состоянии равновесия?

**1.12.** Длинный тонкий стержень равномерно заряжен с линейной плотностью заряда 10 мкКл/м. На продолжении стержня на расстоянии 20 см от его конца находится точечный заряд 10 мкКл. С какой силой взаимодействуют стержень и заряд?

**1.13.** Тонкое кольцо радиусом 10 см несет равномерно распределенный заряд 0,1 мкКл. На перпендикуляре к его плоскости на расстоянии 20 см от центра находится точечный заряд 10 нКл. Найти силу взаимодействия кольца и заряда.

**1.14.** Два одинаковых маленьких металлических шарика, находящиеся на некотором расстоянии друг от друга, притягиваются с некоторой силой. После соприкосновения и удаления шариков на прежнее расстояние они стали отталкиваться с такой же силой. Найти заряд второго шарика, если заряд первого  $-100$  нКл.

**1.15.** Два точечных заряда  $6,7$  и  $-13,2$  нКл находятся на расстоянии  $5$  см друг от друга. Найти напряженность электрического поля в точке на расстоянии  $3$  см от первого заряда и  $4$  см от второго.

**1.16.** Тонкий стержень длиной  $20$  см равномерно заряжен с линейной плотностью  $1$  нКл/см. Найти напряженность поля, созданного этим стержнем на продолжении оси на расстоянии  $10$  см от его конца.

**1.17.** В трех вершинах квадрата со стороной  $40$  см находятся одинаковые заряды по  $5$  нКл каждый. Найти напряженность поля в четвертой вершине.

**1.18.** Два точечных заряда  $q$  и  $2q$  находятся на расстоянии  $20$  см друг от друга. На каком расстоянии от первого заряда надо поместить третий заряд  $-2q$ , чтобы второй заряд оказался в равновесии?

**1.19.** Два одноименных заряда  $q$  и  $9q$  разнесены на расстояние  $8$  см. На каком расстоянии от первого заряда находится точка, напряженность электрического поля в которой равна нулю?

**1.20.** Под каким углом установятся нити, образующие ромб, если в его вершины поместить четыре заряда  $q$ ,  $q$ ,  $2q$  и  $2q$ , причем в противоположные углы – одинаковые заряды?

**1.21.** Под каким углом установятся жесткие непроводящие стержни, образующие ромб, если в его вершины поместить четыре заряда  $q$ ,  $q$ ,  $-2q$  и  $-2q$ , причем в противоположные углы – одинаковые заряды?

**1.22.** Под каким углом установятся нити, образующие ромб, если в его вершины поместить четыре заряда  $q$ ,  $q$ ,  $q$  и  $2q$ ? Ответ дать для угла при вершине с большим зарядом.

**1.23.** Два разноименных заряда  $q$  и  $-9q$  разнесены на расстояние  $8$  см. На каком расстоянии от первого заряда находится точка, напряженность электрического поля в которой равна нулю?

**1.24.** Тонкий стержень длиной  $l$  равномерно заряжен с линейной плотностью  $\lambda$ . Для точек, лежащих на серединном перпендикуляре к стержню, найти напряженность электрического поля как функцию расстояния  $r$  от точки наблюдения до центра стержня.

**1.25.** Тонкое полукольцо радиуса  $20$  см несет равномерно распределенный заряд  $0,7$  нКл. Найти величину напряженности электрического поля в центре этого полукольца.

**1.26.** Тонкое кольцо радиуса  $R$  несет равномерно распределенный заряд  $q$ . Найти величину напряженности электрического поля на оси кольца как функцию расстояния  $l$  от его центра.

**1.27.** Электрическое поле создано двумя бесконечными параллельными плоскостями, несущими равномерно распределенный заряд с поверхностными плотностями  $1 \text{ нКл/м}^2$  и  $3 \text{ нКл/м}^2$ . Найти напряженность поля между пластинами и снаружи по обе стороны от них.

**1.28.** Две одинаковые плоские пластины площадью по  $100 \text{ см}^2$  каждая расположены рядом друг с другом на расстоянии  $2 \text{ см}$ . Заряды пластин  $100 \text{ нКл}$  и  $-100 \text{ нКл}$ . Найти силу притяжения пластин. Считать поле между пластинами однородным.

**1.29.** Две параллельные бесконечно длинные прямые нити равномерно заряжены с линейными плотностями  $0,1$  и  $0,2 \text{ мКл/м}$ . Расстояние между нитями  $10 \text{ см}$ . Найти силу, приходящуюся на отрезок нити длиной  $1 \text{ м}$ .

**1.30.** Считая, что три координатные оси равномерно заряжены с линейными плотностями  $1, 2$  и  $3 \text{ мКл/м}$  соответственно, найти напряженность электрического поля в точке  $(1, 1, 1)$ .

## 2. Потенциальная энергия и потенциал электрического поля

### *Теоретические сведения*

Потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$  на расстоянии  $r$  друг от друга

$$W = \frac{kq_1q_2}{\epsilon r}, \quad (2.1)$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}; \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}.$$

Потенциал электрического поля

$$\phi = \frac{W}{q}, \quad (2.2)$$

где  $W$  – потенциальная энергия точечного электрического заряда  $q$ , помещенного в электрическом поле.

Потенциальная энергия точечного заряда  $q$  в электрическом поле

$$W = q\phi. \quad (2.3)$$

Потенциал электрического поля точечного заряда  $q$  на расстоянии  $r$  от него

$$\varphi = \frac{kq}{r}. \quad (2.4)$$

Принцип суперпозиции для потенциала электрического поля от  $N$  точечных источников

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_1 + \varphi_1 + \dots + \varphi_N = \sum_i^N \varphi_i. \quad (2.5)$$

Принцип суперпозиции для потенциала электрического поля непрерывно распределенного заряда

$$\varphi = \int \frac{dq}{r}. \quad (2.6)$$

В этой формуле интегрирование ведется по всей заряженной области. Связь между напряженностью и потенциалом электрического поля

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi = -\left( \vec{i} \frac{\partial\varphi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial\varphi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial\varphi}{\partial z} \right); \quad (2.7)$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{(1)}^{(2)} \vec{E} \cdot d\vec{r}. \quad (2.8)$$

Потенциал электрического поля заряженной сферы радиуса  $R$ :

$$\text{для точек вне сферы, т.е. при } r > R, \varphi = \frac{kq}{r}; \quad (2.9)$$

$$\text{для точек внутри сферы, т.е. при } r \leq R, \varphi = \frac{kq}{R}. \quad (2.10)$$

Разность потенциалов электрического поля от длинной равномерно заряженной нити с линейной плотностью заряда  $\lambda$  на расстояниях  $r_1$  и  $r_2$  от нее

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2k\lambda}{\varepsilon} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right). \quad (2.11)$$

Напряжение между обкладками плоского конденсатора, расстояние между которыми равно  $d$ :

$$U = Ed. \quad (2.12)$$

### Задачи

**2.1.** Электрическое поле создано точечным зарядом 1 нКл. Найти потенциал в точке, удаленной от заряда на 20 см.

**2.2.** Заряды  $1$  и  $-1$  мкКл находятся на расстоянии  $10$  см друг от друга. Найти потенциал поля в точке, лежащей на перпендикуляре к отрезку, соединяющему заряды, из конца этого отрезка. Расстояние от первого заряда до точки наблюдения  $10$  см.

**2.3.** Вычислить потенциальную энергию двух точечных зарядов  $100$  и  $10$  нКл, находящихся на расстоянии  $10$  см друг от друга.

**2.4.** Найти потенциальную энергию системы трех точечных зарядов  $10$ ,  $20$  и  $-30$  нКл, расположенных в вершинах равностороннего треугольника со стороной  $10$  см.

**2.5.** Найти потенциальную энергию системы четырех одинаковых точечных зарядов по  $10$  нКл каждый, расположенных в вершинах квадрата со стороной  $10$  см.

**2.6.** Электрическое поле создано двумя точечными зарядами  $2q$  и  $-q$ , находящимися на расстоянии  $12$  см друг от друга. В каких точках на прямой, пересекающей заряды, потенциал поля равен нулю. Указать расстояния до второго заряда.

**2.7.** На тонком кольце радиусом  $10$  см равномерно распределен заряд с линейной плотностью  $10$  нКл/м. Найти потенциал в точке, лежащей на оси кольца на расстоянии  $5$  см от его центра.

**2.8.** Тонкий стержень длиной  $10$  см несет равномерно распределенный по длине заряд  $1$  нКл. Определить потенциал электрического поля в точке, лежащей на его оси на расстоянии  $20$  см от его ближайшего конца.

**2.9.** Бесконечно длинная тонкая прямая нить несет равномерно распределенный по ее длине заряд с линейной плотностью  $10$  нКл/м. Найти разность потенциалов в двух точках, удаленных от нити на  $2$  и  $4$  см.

**2.10.** Заряд равномерно распределен по бесконечной плоскости с поверхностной плотностью  $10$  нКл/м<sup>2</sup>. Найти разность потенциалов двух точек поля, одна из которых находится на плоскости, а другая удалена от нее на  $10$  см.

**2.11.** Тонкая круглая пластина радиусом  $5$  см несет равномерно распределенный по ее поверхности заряд  $1$  нКл. Определить потенциал электрического поля в центре пластины.

**2.12.** В центре полый металлической сферы радиусом  $1$  м и зарядом  $3,34$  нКл находится точечный заряд  $6,67$  нКл. Найти потенциалы точек поля, на расстояниях  $0,5$ ;  $1$  и  $10$  м от центра сферы.

**2.13.** Тонкие стержни, заряженные с линейной плотностью  $1,33$  нКл/м, образуют квадрат. Найти потенциал в центре этого квадрата.

**2.14.** Металлический шар радиусом 10 см заряжен до потенциала 300 В. Определить потенциал этого шара, после того как его окружают сферической проводящей оболочкой радиусом 15 см и на короткое время соединят с ней проводником.

**2.15.** Незаряженный металлический шар радиусом 10 см окружают концентрической сферической проводящей оболочкой радиусом 15 см с потенциалом 300 В. Чему станет равен потенциал оболочки, если незаряженный шар заземлить?

**2.16.** Определить потенциал точки поля, находящейся на расстоянии 9 см от поверхности металлического шара радиусом 1 см, заряженного равномерно с поверхностной плотностью  $10 \text{ пКл/м}^2$ .

**2.17.** Две бесконечные параллельные плоскости находятся на расстоянии 0,5 см друг от друга. На плоскостях равномерно распределены заряды с поверхностными плотностями 0,2 и  $-0,3 \text{ мкКл/м}^2$ . Найти разность потенциалов между плоскостями.

**2.18.** Две бесконечные параллельные плоскости находятся на расстоянии 1 см друг от друга. На плоскостях равномерно распределены заряды с поверхностными плотностями 0,2 и  $0,5 \text{ мкКл/м}^2$ . Найти разность потенциалов между плоскостями.

**2.19.** Два шара с радиусами 5 и 8 см и потенциалами 120 и 50 В соответственно соединяют проводом. Найти потенциалы шаров после этого.

**2.20.** Сто одинаковых капель ртути, заряженных до потенциала 20 В, сливаются в одну большую. Найти потенциал этой капли.

**2.21.** Две круглые металлические пластины радиусом  $R = 10 \text{ см}$  каждая, заряженные разноименно, расположенные на расстоянии  $d = 1 \text{ см}$  друг от друга, притягиваются с силой 2 мН. Найти разность потенциалов между пластинами. Считать  $R \gg d$ .

**2.22.** Найти потенциал электрического поля в центре полусферы радиусом 0,5 м, заряженной с поверхностной плотностью заряда  $1 \text{ нКл/м}^2$ .

**2.23.** Тонкий стержень, заряженный равномерно с линейной плотностью  $4,425 \text{ нКл/м}$ , согнут в кольцо. Найти потенциал в его центре.

**2.24.** Электрическое поле создано положительным точечным зарядом. Потенциал поля на расстоянии 12 см от заряда равен 24 В. Найти величину и направление градиента потенциала в этой точке.

**2.25.** Расстояние между зарядами 1 мКл и 6,67 мКл равно 10 см. Какую работу совершат силы электрического поля при увеличении расстояния между зарядами до 1 м?

**2.26.** Тонкий стержень, заряженный равномерно с линейной плотностью  $133 \text{ нКл/м}$ , согнут в полукольцо. Какую работу совершат силы электрического поля при переносе точечного заряда  $6,7 \text{ нКл}$  из центра кольца в бесконечность?

**2.27.** Тонкий стержень, заряженный равномерно с линейной плотностью  $300 \text{ нКл/м}$ , согнут в кольцо радиусом  $10 \text{ см}$ . Какую работу совершат силы электрического поля при переносе заряда  $5 \text{ нКл}$  из центра кольца в точку на его оси, удаленную на  $20 \text{ см}$  от центра?

**2.28.** Тонкий стержень неизвестной длины  $l$  равномерно заряжен с линейной плотностью  $5 \text{ мкКл/м}$ . Найти работу сил электрического поля по переносу пробного заряда  $1 \text{ мкКл}$  из точки, лежащей на оси стержня на расстоянии  $l$  от его ближнего конца, в бесконечность.

**2.29.** Определить потенциал, до которого можно зарядить уединенный металлический шар радиусом  $10 \text{ см}$ , если напряженность поля, при которой происходит пробой воздуха, равна  $3 \text{ МВ/м}$ .

**2.30.** Металлический шар радиусом  $10 \text{ см}$  заряжен до потенциала  $300 \text{ В}$ . Определить потенциал этого шара, после того как его окружают сферической проводящей заземленной оболочкой радиусом  $15 \text{ см}$ .

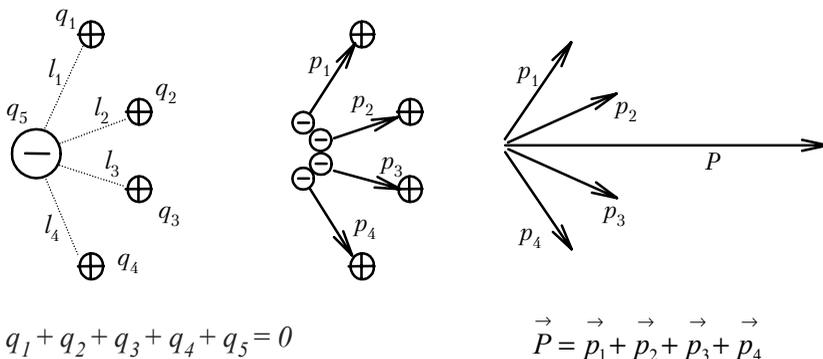
### 3. Электрический диполь

#### *Теоретические сведения*

Электрический диполь образуют два точечных равных по модулю разноименных заряда, находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Электрический момент  $\vec{P}$  диполя направлен вдоль плеча  $\vec{l}$ , т. е. от заряда  $-q$  к заряду  $+q$ :

$$\vec{P} = |q| \vec{l}. \quad (3.1)$$

Если полный электрический заряд системы частиц равен нулю, то дипольный момент этой системы не зависит от выбора системы отсчета. Для его вычисления заряды нужно разбить на любые пары одинаковых разноименных и векторно сложить получившиеся элементарные диполи, как это показано на рис. 1.

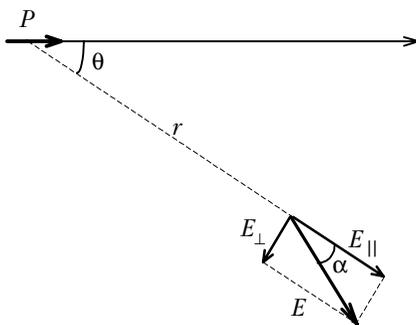


$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 0$$

$$\vec{P} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \vec{p}_4$$

**Рис. 1.** Определение электрического момента системы зарядов

Диполь называется точечным, если плечо много меньше расстояния от его центра до точки наблюдения. Поле точечного диполя не является центральным. Продольная и поперечная составляющие напряженности поля электрического диполя показаны на рис. 2.



**Рис. 2.** Напряженность и потенциал точечного диполя

Значения величин, указанных на рис. 2, вычисляются по формулам:

$$E_{\parallel} = \frac{2kp \cos \theta}{r^3}; \quad (3.2)$$

$$E_{\perp} = \frac{2kp \sin \theta}{r^3}; \quad (3.3)$$

$$E = \frac{kp}{r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta}; \quad (3.4)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{tg} \theta}{2}; \quad (3.5)$$

Потенциал точечного диполя

$$\varphi = \frac{kp \cos \theta}{r^2}; \quad (3.6)$$

Механический момент, действующий на точечный диполь в электрическом поле:

$$\vec{M} = \vec{P} \times \vec{E} \quad \text{или} \quad M = PE \sin \theta. \quad (3.7)$$

Потенциальная энергия точечного диполя в электрическом поле

$$W_{\Pi} = -\vec{P} \cdot \vec{E} \quad \text{или} \quad W_{\Pi} = -PE \cos \theta. \quad (3.8)$$

Сила, действующая в электрическом поле на точечный диполь, ориентированный вдоль силовой линии (по оси  $oz$ ):

$$F_z = P \frac{\partial E}{\partial z}, \quad (3.9)$$

где  $\frac{\partial E}{\partial z}$  – величина неоднородности электрического поля.

Период крутильных колебаний точечного диполя во внешнем электрическом поле

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{PE}}, \quad (3.10)$$

где  $J$  – момент инерции диполя.

Момент инерции материальной точки массой  $m$  относительно оси, проходящей на расстоянии  $r$  от нее:

$$J = mr^2. \quad (3.11)$$

### *Задачи*

**3.1.** В трех соседних вершинах правильного шестиугольника помещены одинаковые положительные заряды 1 мкКл; в трех других – одинаковые отрицательные заряды –1 мкКл. Найти дипольный момент шестиугольника, если его сторона 0,2 м.

**3.2.** В трех вершинах квадрата со стороной 0,1 м помещены одинаковые положительные заряды 10 мкКл, в четвертой – отрицательный заряды –30 мкКл. Найти дипольный момент квадрата.

**3.3.** В двух вершинах правильного треугольника со стороной 0,173 м находятся положительные заряды 3 нКл, а в третьей – отрицательный заряд –6 нКл. Найти дипольный момент треугольника.

**3.4.** В начале координат находится точечный диполь с электрическим моментом  $1,21 \text{ мКл}\cdot\text{м}$ , направленный вдоль оси  $x$ . Найти величину напряженности поля в точке  $(12; 5)$ .

**3.5.** В начале координат находится точечный диполь с электрическим моментом  $1,21 \text{ мКл}\cdot\text{м}$ , направленный вдоль оси  $x$ . Найти потенциал поля в точке  $(12; 5)$ .

**3.6.** В начале координат находится точечный диполь, направленный вдоль оси  $x$ . Под каким углом к этой оси направлена напряженность электрического поля в точке  $(1; 2)$ ?

**3.7.** Электрический диполь  $1 \text{ нКл}\cdot\text{м}$  ориентирован вдоль вектора напряженности однородного электрического поля величиной  $3 \text{ кВ/м}$ . Какую работу нужно совершить, чтобы повернуть диполь на  $90^\circ$ ?

**3.8.** Электрический диполь  $2 \text{ мКл}\cdot\text{м}$  ориентирован вдоль вектора напряженности однородного электрического поля величиной  $900 \text{ В/м}$ . Какую работу нужно совершить, чтобы повернуть диполь на  $60^\circ$ ?

**3.9.** Электрический диполь  $3 \text{ нКл}\cdot\text{м}$  ориентирован вдоль вектора напряженности однородного электрического поля величиной  $10 \text{ кВ/м}$ . Какую работу нужно совершить, чтобы развернуть диполь на  $180^\circ$ ?

**3.10.** Два точечных диполя с электрическими моментами  $1 \text{ нКл}\cdot\text{м}$  расположены в точках  $(0; 0)$  и  $(2; 0)$  координатной плоскости  $(x; y)$ . Оба диполя ориентированы вдоль оси  $x$ . Найти напряженность электрического поля в точке  $(1; 0)$ .

**3.11.** Два точечных диполя с электрическими моментами  $1 \text{ нКл}\cdot\text{м}$  расположены в точках  $(0; 0)$  и  $(2; 0)$  координатной плоскости  $(x; y)$ . Оба диполя ориентированы вдоль оси  $y$ . Найти напряженность электрического поля в точке  $(1; 0)$ .

**3.12.** Два точечных диполя с электрическими моментами  $2 \text{ нКл}\cdot\text{м}$  расположены в точках  $(0; 0)$  и  $(2; 0)$  координатной плоскости  $(x; y)$ . Оба диполя ориентированы вдоль оси  $x$ . Найти напряженность электрического поля в точке  $(1; 1)$ .

**3.13.** Два точечных диполя с электрическими моментами  $2 \text{ нКл}\cdot\text{м}$  расположены в точках  $(0; 0)$  и  $(2; 0)$  координатной плоскости  $(x; y)$ . Оба диполя ориентированы параллельно оси  $x$  навстречу друг другу. Найти напряженность электрического поля в точке  $(1; 1)$ .

**3.14.** Два точечных диполя с электрическими моментами  $2 \text{ нКл}\cdot\text{м}$  расположены в точках  $(0; 0)$  и  $(2; 0)$  координатной плоскости  $(x; y)$ . Оба диполя ориентированы вдоль оси  $y$ . Найти напряженность электрического поля в точке  $(1; 1)$ .

**3.15.** Два точечных диполя с электрическими моментами  $2 \text{ нКл}\cdot\text{м}$  расположены в точках  $(0; 0)$  и  $(2; 0)$  координатной плоскости  $(x; y)$ . Оба диполя ориентированы по оси  $y$  в противоположных направлениях. Найти напряженность электрического поля в точке  $(1; 1)$ .

**3.16.** Три точечных диполя с электрическими моментами  $2 \text{ нКл}\cdot\text{м}$  расположены в вершинах равностороннего треугольника. Найти напряженность электрического поля в центре описанной вокруг диполей окружности, если направления всех диполей одинаковые вдоль одной из высот треугольника, а радиус окружности  $1 \text{ м}$ .

**3.17.** Три точечных диполя с электрическими моментами  $2 \text{ нКл}\cdot\text{м}$  расположены в вершинах равностороннего треугольника. Найти напряженность электрического поля в центре описанной вокруг диполей окружности, если направления всех диполей одинаковые вдоль одной из сторон треугольника, а радиус окружности  $1 \text{ м}$ .

**3.18.** Точечный диполь с электрическим моментом  $0,5 \text{ мКл}\cdot\text{м}$  помещен в начало координат и ориентирован вдоль оси  $x$ . Не пользуясь понятием потенциала, вычислить работу, которую совершат силы электрического поля при перемещении точечного заряда  $1 \text{ мКл}$  вдоль оси  $x$  из точки  $(1; 0)$  в точку  $(3; 0)$ .

**3.19.** Точечный диполь с электрическим моментом  $0,5 \text{ мКл}\cdot\text{м}$  помещен в начало координат и ориентирован вдоль оси  $x$ . Не пользуясь понятием потенциала, вычислить работу, которую совершат силы электрического поля при перемещении точечного заряда  $1 \text{ мКл}$  по дуге окружности с центром в начале координат из точки  $(1; 0)$  в точку  $(0; 1)$ .

**3.20.** Точечный диполь с электрическим моментом  $0,5 \text{ мКл}\cdot\text{м}$  помещен в начало координат и ориентирован вдоль оси  $x$ . Не пользуясь понятием потенциала, вычислить работу, которую совершат силы электрического поля при перемещении точечного заряда  $1,41 \text{ мКл}$  по дуге окружности с центром в начале координат из точки  $(1; 1)$  в точку  $(-1; 1)$ .

**3.21.** Два точечных диполя с электрическими моментами  $1,41 \text{ нКл}\cdot\text{м}$  расположены в точках  $(0; 0)$  и  $(2; 0)$  координатной плоскости  $(x; y)$ . Оба диполя ориентированы вдоль оси  $y$ . Найти потенциал электрического поля в точке  $(1; 1)$ .

**3.22.** Два точечных диполя с электрическими моментами  $3 \text{ нКл}\cdot\text{м}$  расположены в точках  $(0; 0)$  и  $(6; 0)$  координатной плоскости  $(x; y)$ . Диполи направлены навстречу друг другу по оси  $x$ . Найти потенциал электрического поля в точке  $(3; 3)$ .

**3.23.** Два точечных диполя с электрическими моментами  $4 \text{ нКл}\cdot\text{м}$  расположены в точках  $(0; 0)$  и  $(3; 0)$  координатной плоскости  $(x; y)$ . Оба диполя ориентированы вдоль оси  $y$ . Найти потенциал электрического поля в точке  $(3; 3)$ .

**3.24.** На расстоянии  $0,3 \text{ м}$  от точечного заряда  $2 \text{ мКл}$  находится точечный диполь с электрическим моментом  $3 \text{ мКл}\cdot\text{м}$ . С какой силой электрическое поле заряда действует на диполь, если он ориентирован вдоль силовой линии?

**3.25.** На расстоянии  $3 \text{ м}$  друг от друга находятся два точечных диполя с электрическими моментами  $3 \text{ мКл}\cdot\text{м}$  и  $4 \text{ мКл}\cdot\text{м}$ . Найти силу взаимодействия диполей, если они свободно установились в электрических полях друг друга.

**3.26.** Два небольших шарика массами по  $0,1 \text{ г}$  каждый, несущие разноименные заряды  $\pm 0,4 \text{ мКл}$ , скреплены невесомым жестким стержнем длиной  $4 \text{ см}$ . Найти период малых колебаний этого диполя во внешнем однородном электрическом поле напряженностью  $20 \text{ В/см}$ .

**3.27.** Найти период малых колебаний дипольной молекулы с электрическим моментом  $3,2 \cdot 10^{-30} \text{ Кл}\cdot\text{м}$  в воздушном конденсаторе, заряженном до  $100 \text{ В}$  с расстоянием между обкладками  $0,5 \text{ см}$ . Момент инерции молекулы равен  $10^{-45} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

**3.28.** Найти силу взаимодействия двух молекул воды с электрическими моментами  $6,2 \cdot 10^{-30} \text{ Кл}\cdot\text{м}$ , отстоящих друг от друга на расстоянии  $10 \text{ нм}$ . Считать, что диполи ориентированы вдоль прямой, соединяющей молекулы.

**3.29.** Два точечных диполя с электрическими моментами  $1$  и  $4 \text{ пКл}\cdot\text{м}$  находятся на расстоянии  $2 \text{ см}$  друг от друга. Найти силу их взаимодействия, если оси диполей лежат на одной прямой.

**3.30.** Точечный диполь с электрическим моментом  $1 \text{ пКл}\cdot\text{м}$  равномерно вращается с частотой  $1000 \text{ Гц}$  относительно оси, проходящей через центр диполя и перпендикулярной его плечу. По какому закону изменяется потенциал в точке, лежащей на расстоянии  $1 \text{ см}$  от диполя в плоскости его вращения? Считать, что в начальный момент времени потенциал в выбранной точке равен нулю.

## 4. Движение заряженных частиц в электрическом поле

### Теоретические сведения

Потенциальная энергия точечного заряда  $q$  в электрическом поле

$$W_{\text{п}} = q\varphi. \quad (4.1)$$

Потенциал электрического поля точечного заряда  $q$  на расстоянии  $r$  от него

$$\varphi = \frac{kq}{\epsilon r}, \quad (4.2)$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}; \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

Потенциал электрического поля заряженной сферы радиуса  $R$ :

для точек вне сферы, т.е. при  $r > R$ ,  $\varphi = \frac{kq}{\epsilon r}$ ; (4.3)

для точек внутри сферы, т.е. при  $r \leq R$ ,  $\varphi = \frac{kq}{\epsilon R}$ ; (4.4)

Разность потенциалов электрического поля от длинной равномерно заряженной нити с линейной плотностью заряда  $\lambda$  на расстояниях  $r_1$  и  $r_2$  от нее

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2k\lambda}{\epsilon} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right). \quad (4.5)$$

Связь напряженности поля плоского конденсатора с напряжением между его обкладками, расстояние между которыми равно  $d$ :

$$U = E d. \quad (4.6)$$

Сила, действующая на заряд в электрическом поле:

$$\vec{F} = q \vec{E}. \quad (4.7)$$

### Задачи

**4.1.** Какой путь пройдет электрон в однородном электрическом поле напряженностью 200 кВ/м за 1 нс, если его начальная скорость была равна нулю?

**4.2.** Пылинка массой  $10^{-12}$  кг, имеющая пять лишних электронов, прошла в вакууме ускоряющую разность потенциалов 3 МВ. Какую скорость при этом она приобрела?

**4.3.** Заряженная частица, ускоренная разностью потенциалов 600 кВ, имеет скорость 5,4 Мм/с. Определить удельный заряд частицы.

**4.4.** Протон, начальная скорость которого 100 км/с, влетел в однородное электрическое поле с напряженностью 300 В/см вдоль вектора напряженности. На каком пути скорость протона удвоится?

**4.5.** Бесконечная плоскость заряжена равномерно отрицательно с поверхностной плотностью  $35,4$  нКл/м<sup>2</sup>. Электрон приближается к этой плоскости вдоль силовой линии поля. На какое минимальное расстояние он подойдет к плоскости, если на расстоянии 5 см от нее он имел кинетическую энергию 80 эВ?

**4.6.** Электрон, летевший горизонтально со скоростью 1,6 Мм/с, влетел в горизонтальное однородное электрическое поле с напряженностью 90 В/см. Какой будет скорость электрона через 1 нс?

**4.7.** В однородное электрическое поле с напряженностью 1 кВ/м вдоль силовой линии влетает электрон со скоростью 1 Мм/с. На каком пути скорость электрона уменьшится в два раза?

**4.8.** Какую минимальную скорость должен иметь протон, чтобы достигнуть поверхности заряженного до 400 В металлического шара, если начальное расстояние до его поверхности в три раза больше радиуса?

**4.9.** Электрон движется вдоль силовой линии однородного электрического поля. В точке с потенциалом 100 В его скорость 6 Мм/с. Найти потенциал точки поля, в которой скорость электрона уменьшится вдвое.

**4.10.** Электрон с начальной скоростью 3 Мм/с, влетел в однородное электрическое поле с напряженностью 150 В/м перпендикулярно силовым линиям. Какой будет скорость электрона через 0,1 мкс?

**4.11.** Электрическое поле создается равномерно положительно заряженной бесконечной нитью. Двигаясь в этом поле из точки, удаленной от нити на 1 см, в точку, удаленную на 4 см,  $\alpha$ -частица изменила свою скорость от 0,2 до 3 Мм/с. Найти линейную плотность заряда нити.

**4.12.** Электрическое поле создается равномерно положительно заряженной бесконечной нитью с линейной плотностью заряда 2 нКл/см. Какую скорость приобретет покоящийся электрон, переместившись с расстояния 1 см до 0,5 см от нити?

**4.13.** Электрон влетел в плоский конденсатор со скоростью 10 Мм/с вдоль обкладок. На какое расстояние электрон приблизится к одной из них за время движения в конденсаторе, если длина пластин 6 см, расстояние между ними 16 мм, а разность потенциалов 30 В?

**4.14.** Электрон влетел в плоский конденсатор со скоростью 10 Мм/с вдоль обкладок. Из конденсатора электрон вылетел под углом  $35^\circ$  к своему первоначальному направлению. Найти разность потенциалов между обкладками, если их длина 10 см, а расстояние между ними 2 см.

**4.15.** Электрон влетел в плоский конденсатор со скоростью 10 Мм/с вдоль обкладок на равном расстоянии от них. При какой разности потенциалов между обкладками электрон не вылетит из конденсатора, если длина пластин 10 см, а расстояние между ними 2 см?

**4.16.** В расположенном горизонтально плоском конденсаторе с зазором между обкладками 10 мм находится заряженная капелька массой  $6,4 \cdot 10^{-16}$  кг. В отсутствие электрического поля капелька падает с постоянной скоростью 0,078 мм/с. При подаче на конденсатор напряжения 95 В капелька равномерно поднимается со скоростью 0,016 мм/с. Считая силу сопротивления пропорциональной скорости, найти заряд капельки.

**4.17.** В расположенном горизонтально плоском конденсаторе с зазором между обкладками 10 мм находится заряженная капелька массой  $5 \cdot 10^{-11}$  г. В отсутствие электрического поля капелька падает с постоянной скоростью. При подаче на конденсатор напряжения 600 В капелька падает вдвое медленнее. Считая силу сопротивления пропорциональной скорости, найти заряд капельки.

**4.18.** Между двумя вертикальными пластинами на равном расстоянии от них падает пылинка. Сила сопротивления движению пропорциональна скорости пылинки, вследствие чего эта скорость постоянна и равна 2 см/с. Через какое время после подачи на пластины напряжения 3 кВ пылинка достигнет одной из них? Зазор между пластинами 2 см, масса пылинки  $2 \cdot 10^{-9}$  г, ее заряд  $6,5 \cdot 10^{-17}$  Кл.

**4.19.** Между двумя вертикальными пластинами на равном расстоянии от них падает пылинка. Сила сопротивления движению пропорциональна скорости пылинки, вследствие чего эта скорость постоянна и без электрического поля равна  $2 \text{ см/с}$ . Какое расстояние по вертикали пролетит пылинка до падения на одну из его обкладок после подачи на конденсатор напряжения 3 кВ? Зазор между пластинами 2 см, масса пылинки  $2 \cdot 10^{-9}$  г, ее заряд  $6,5 \cdot 10^{-17}$  Кл.

**4.20.** Расстояние между обкладками плоского конденсатора 4 см. Электрон начинает движение от отрицательной пластины в тот момент, когда от положительной начинает двигаться протон. На каком расстоянии от положительной пластины они встретятся?

**4.21.** Расстояние между обкладками плоского конденсатора 1 см. От положительной пластины одновременно начинают двигаться протон и  $\alpha$ -частица. Какое расстояние пролетит  $\alpha$ -частица за время движения протона до отрицательной обкладки?

**4.22.** Электрон, пройдя в плоском конденсаторе путь от одной обкладки до другой, разгоняется от 0 до 1 Мм/с. Найти напряженность электрического поля в конденсаторе, если расстояние между обкладками 5,3 мм.

**4.23.** Электрон, пройдя в плоском конденсаторе путь от одной обкладки до другой, разгоняется от 0 до 1 Мм/с. Найти поверхностную плотность заряда на обкладках конденсатора, если расстояние между ними 5,3 мм.

**4.24.** Электрическое поле создается двумя параллельными пластинами на расстоянии 2 см друг от друга; разность потенциалов между ними 120 В. Какую скорость приобретет электрон, начав двигаться в направлении действия силы поля и пройдя путь 3 мм?

**4.25.** Электрон влетает в плоский конденсатор вдоль обкладок на равном расстоянии от них. Напряжение между обкладками 300 В, их длина 10 см, а расстояние между ними 2 см. При какой предельной начальной скорости электрон не вылетит из конденсатора?

**4.26.** Электрон влетает в плоский конденсатор вдоль обкладок со скоростью 10 Мм/с. Напряженность поля в конденсаторе 100 В/см, длина конденсатора 5 см. Найти величину скорости электрона при его вылете из конденсатора.

**4.27.** Электрон влетает в плоский конденсатор вдоль обкладок со скоростью 36 Мм/с. Напряженность поля в конденсаторе 37 В/см, длина конденсатора 20 см. На какое расстояние электрон приблизится к положительной обкладке за время его движения в конденсаторе?

**4.28.** Протон влетает в плоский конденсатор вдоль обкладок со скоростью 120 км/с. Напряженность поля в конденсаторе 30 В/см, длина конденсатора 10 см. Во сколько раз скорость протона при вылете из конденсатора будет больше начальной?

**4.29.** Электрон влетает в плоский конденсатор вдоль обкладок на равном расстоянии от них. Напряжение между обкладками 4 В, расстояние между ними 4 см. Какое расстояние вдоль пластин пролетит электрон до падения на одну из них, если он был ускорен разностью потенциалов 60 В?

**4.30.** Электрон движется в плоском конденсаторе, между обкладками которого приложено напряжение 3 кВ. Расстояние между ними 5 мм. Найти ускорение электрона.

## 5. Электрическая емкость. Конденсаторы

### *Теоретические сведения*

Емкость уединенного проводника

$$C = \frac{q}{\varphi}, \quad (5.1)$$

где  $q$  – электрический заряд, сообщенный проводнику,  $\varphi$  – созданный этим зарядом потенциал.

Емкость уединенного проводящего шара радиуса  $R$

$$C = \frac{\varepsilon R}{k} = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R, \quad (5.2)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}; \quad \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

Энергия заряженного проводника

$$W = \frac{1}{2} q\varphi = \frac{1}{2} C\varphi^2 = \frac{q^2}{2C}. \quad (5.3)$$

Два близко расположенных проводника, несущих одинаковые по величине разноименные заряды  $\pm q$ , образуют конденсатор. Емкость конденсатора

$$C = \frac{q}{U}, \quad (5.4)$$

где  $U$  – напряжение (разность потенциалов) между его обкладками.

Емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}, \quad (5.5)$$

где  $S$  – площадь обкладок;  $d$  – расстояние между ними.

Емкость цилиндрического конденсатора (коаксиального кабеля)

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln(R_2/R_1)} = \frac{\epsilon l}{2k \cdot \ln(R_2/R_1)}, \quad (5.6)$$

где  $l$  – длина кабеля;  $R_1$  и  $R_2$  – его внутренний и внешний радиусы.

Емкость сферического конденсатора

$$C = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1} = \frac{\epsilon R_1 R_2}{k(R_2 - R_1)}, \quad (5.7)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы его внутренней и внешней сфер.

Емкость  $N$  параллельно соединенных конденсаторов:

$$\text{в общем случае } C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_N, \quad (5.8)$$

$$\text{в случае одинаковых конденсаторов } C = C_1 N. \quad (5.9)$$

Емкость  $N$  последовательно соединенных конденсаторов:

$$\text{в общем случае } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N}, \quad (5.10)$$

$$\text{в случае одинаковых конденсаторов } C = C_1/N, \quad (5.11)$$

$$\text{в случае двух конденсаторов } C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (5.12)$$

Энергия заряженного конденсатора

$$W = \frac{1}{2} qU = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{q^2}{2C}. \quad (5.13)$$

Объемная плотность энергии (энергия электрического поля, приходящаяся на единицу объема)

$$w = \frac{1}{2} ED = \frac{1}{2} \epsilon\epsilon_0 E^2, \quad (5.14)$$

где  $E$  и  $D$  – напряженность и индукция электрического поля в среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ .

### Задачи

**5.1.** Батарея состоит из четырех одинаковых последовательно соединенных конденсаторов. Во сколько раз изменится емкость батареи, если конденсаторы соединить параллельно?

**5.2.** Два одинаковых металлических диска диаметрами по 12 см расположены параллельно друг другу и разделены диэлектриком с проницаемо-

стью, равной 2 и толщиной 2 мм. Диски сдвинуты так, что центр одного находится напротив края другого. Найти емкость конденсатора.

**5.3.** Найти силу взаимодействия обкладок плоского воздушного конденсатора емкостью 20 мкФ, если расстояние между ними 1 мм, а поверхностная плотность зарядов 2 мкКл/м<sup>2</sup>.

**5.4.** Определить емкость коаксиального кабеля длиной 10 км, радиус внутренней жилы которого равен 1 мм, а внешней оболочки – 2 мм. Кабель заполнен веществом с диэлектрической проницаемостью, равной 2.

**5.5.** Напряжение между обкладками плоского конденсатора 25 В, расстояние между ними 5 мм. Определить объемную плотность энергии электрического поля внутри конденсатора.

**5.6.** В зазор 5 мм между обкладками плоского воздушного конденсатора емкостью 9 пФ вводят дополнительно металлическую пластину толщиной 2 мм параллельно обкладкам. Найти емкость получившегося конденсатора и показать, что она не зависит от положения пластины внутри зазора.

**5.7.** Пространство между обкладками плоского конденсатора заполнено веществом с диэлектрической проницаемостью 2. Напряжение между обкладками 100 В. Найти работу по удалению диэлектрика из конденсатора, если расстояние между обкладками 4 мм, а их площадь – 200 см<sup>2</sup>.

**5.8.** Конденсатор, заполненный веществом с диэлектрической проницаемостью, равной 2, зарядили до 220 В и отключили от источника. Диэлектрик удалили из конденсатора и вдвое увеличили расстояние между обкладками. Найти напряжение на конденсаторе.

**5.9.** Между обкладками плоского конденсатора приложено напряжение 100 В, расстояние между ними равно 0,5 мм. Конденсатор заполнен парафином ( $\epsilon = 2$ ). Определить давление, оказываемое обкладками конденсатора на поверхность диэлектрика.

**5.10.** Напряжение между обкладками плоского воздушного конденсатора 25 В, расстояние между ними 5 мм, их площадь 200 см<sup>2</sup>. Определить энергию электрического поля, заключенную внутри конденсатора.

**5.11.** Радиус внутренней обкладки сферического воздушного конденсатора 2 см, внешней – 6 см. Между сферами приложена разность потенциалов 400 В. Определить энергию этого конденсатора после заполнения пространства между обкладками парафином с диэлектрической проницаемостью, равной 2.

**5.12.** Определить работу, которую нужно совершить, чтобы увеличить расстояние между обкладками плоского конденсатора от 0,5 до 0,8 см.

Площадь обкладок  $400 \text{ см}^2$ , заряды на них  $\pm 8 \text{ нКл}$ , конденсатор отключен от источника.

**5.13.** Последовательно соединенные пять одинаковых конденсаторов подключены к источнику постоянного напряжения. Во сколько раз изменится энергия конденсаторов, если их подключить к тому же источнику параллельно?

**5.14.** Энергия заряженного плоского конденсатора  $2 \text{ мкДж}$ . Площадь обкладок  $200 \text{ см}^2$ , расстояние между ними  $0,7 \text{ мм}$ , диэлектрическая проницаемость среды равна  $7$ . Определить поверхностную плотность зарядов на обкладках.

**5.15.** К сферическому конденсатору приложена разность потенциалов  $200 \text{ В}$ . Радиус внутренней сферы  $0,1 \text{ м}$ , внешней –  $0,3 \text{ м}$ . Определить плотности поверхностных зарядов на каждой обкладке.

**5.16.** Параллельно трем последовательно соединенным конденсаторам по  $0,36 \text{ мкФ}$  включены два последовательно соединенных конденсатора  $0,2$  и  $0,3 \text{ мкФ}$ . Найти емкость этой батареи.

**5.17.** Определить емкость Земли, считая ее проводящим шаром. Длина земного экватора равна  $40000 \text{ км}$ .

**5.18.** Пространство между обкладками плоского конденсатора заполнено двумя диэлектриками равной толщины с диэлектрическими проницаемостями, равными  $\epsilon_1 = 2$  и  $\epsilon_2 = 4$ . Площади обкладок равны  $200 \text{ см}^2$ , зазор между ними –  $0,885 \text{ мм}$ . Найти емкость конденсатора.

**5.19.** На плоский воздушный конденсатор с квадратными обкладками подано постоянное напряжение  $113 \text{ В}$ . Сторона квадрата  $10 \text{ см}$ , ширина зазора  $0,8 \text{ мм}$ . Конденсатор опускается в воду ( $\epsilon = 81$ ) с постоянной скоростью  $1 \text{ м/с}$ . Какой ток течет в это время в цепи?

**5.20.** Конденсатор емкостью  $3 \text{ мкФ}$  выдерживает напряжение  $1,5 \text{ кВ}$ ; другой конденсатор емкостью  $6 \text{ мкФ}$  – напряжение  $2 \text{ кВ}$ . Какое напряжение выдержит система этих двух конденсаторов, соединенных последовательно?

**5.21.** Конденсатор емкостью  $5 \text{ мкФ}$  выдерживает напряжение  $2 \text{ кВ}$ ; другой конденсатор емкостью  $8 \text{ мкФ}$  – напряжение  $1 \text{ кВ}$ . Какое напряжение выдержит система этих двух конденсаторов, соединенных последовательно?

**5.22.** Плоский воздушный конденсатор при величине зазора между обкладками  $1 \text{ мм}$  имеет емкость  $1 \text{ нФ}$ . Конденсатор подключили к источнику постоянного напряжения  $1 \text{ кВ}$  и стали раздвигать обкладки со скоростью  $0,2 \text{ мм/с}$ . Какой ток течет в цепи в тот момент, когда расстояние между обкладками составляет  $2 \text{ мм}$ ?

**5.23.** К обкладкам цилиндрического конденсатора приложено напряжение 20 В. Радиусы коаксиальных цилиндров, образующих конденсатор, равны 4 и 16 мм. Найти поверхностные плотности зарядов на каждой обкладке.

**5.24.** Определить емкость заряженной металлической сферы, если на расстоянии 20 см от центра потенциал поля равен 500 В, а на расстоянии 50 см от поверхности равен 300 В.

**5.25.** Определить емкость заряженной металлической сферы, если в ее центре потенциал поля равен 300 В, а на расстоянии 45 см от поверхности равен 50 В.

**5.26.** К источнику электрического напряжения 5 В подключена батарея конденсаторов: два емкостью 2 и 5 мкФ, включенных параллельно, и один емкостью 3 мкФ, включенного последовательно с ними. Найти электрический заряд первого конденсатора.

**5.27.** К источнику электрического напряжения 5 В подключена батарея конденсаторов: два емкостью 5 и 2 мкФ, включенных параллельно, и один емкостью 3 мкФ, включенный последовательно с ними. Найти электрический заряд первого конденсатора.

**5.28.** На два последовательно соединенных конденсатора емкостями 200 и 400 нФ подано напряжение 600 В. Определить падение напряжения на первом конденсаторе.

**5.29.** На три последовательно соединенных конденсатора емкостями 300, 400 и 600 нФ подано напряжение 600 В. Определить падение напряжения на втором конденсаторе.

**5.30.** Два уединенных одинаковых проводника, несущие заряды 0,4 и 0,6 мкКл, после соприкосновения приобретают одинаковые потенциалы 5 В. Найти емкости каждого из проводников.

## 6. Диэлектрики

### *Теоретические сведения*

Индукция электрического поля (электрическое смещение)

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad (6.1)$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $\vec{P}$  – вектор поляризованности среды;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

$$\vec{P} = \chi \vec{E}, \quad (6.2)$$

где  $\chi$  – диэлектрическая восприимчивость среды,

$$\chi = \varepsilon - 1. \quad (6.3)$$

Условия для векторов  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$  на границе раздела диэлектриков (рис. 3):

$$E_{1\tau} = E_{2\tau}; \quad \varepsilon_1 E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n}; \quad (6.4)$$

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{E_{2n}}{E_{1n}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}; \quad (6.5)$$

$$\frac{D_{1\tau}}{\varepsilon_1} = \frac{D_{2\tau}}{\varepsilon_2}; \quad D_{1n} = D_{2n}; \quad (6.6)$$

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{D_{1\tau}}{D_{2\tau}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}. \quad (6.7)$$

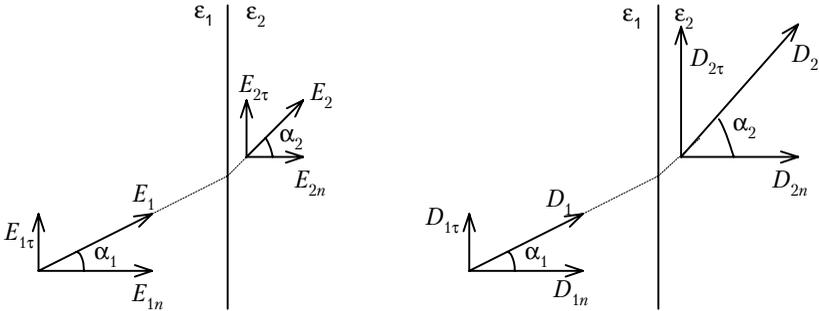


Рис. 3. Граничные условия для векторов  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$

Напряженность поля свободных электрических зарядов, равномерно распределенных по плоскости с поверхностной плотностью  $\sigma$ :

$$E = \frac{|\sigma|}{2\varepsilon_0}. \quad (6.8)$$

Граница раздела диэлектриков в электрическом поле оказывается заряженной. Поверхностная плотность связанных поляризационных зарядов на границе раздела диэлектриков

$$\sigma' = P_{n1} - P_{n2} = \varepsilon_0 (E_{n2} - E_{n1}). \quad (6.9)$$

Напряженность поля связанных (фиктивных) зарядов, равномерно распределенных по плоскости с поверхностной плотностью  $\sigma'$ :

$$E' = \frac{|\sigma'|}{2\epsilon_0}. \quad (6.10)$$

### *Задачи*

**6.1.** В некоторой точке изотропного диэлектрика с проницаемостью  $\epsilon$  электрическая индукция имеет величину  $D$ . Чему равна поляризованность этой точки?

**6.2.** Перпендикулярно однородному электрическому полю с напряженностью 100 В/м помещена плоскопараллельная диэлектрическая пластина с проницаемостью, равной 2. Найти поляризованность диэлектрика.

**6.3.** Перпендикулярно однородному электрическому полю с напряженностью 100 В/м помещена плоскопараллельная диэлектрическая пластина с проницаемостью, равной 2. Найти плотность связанных зарядов на поверхности пластины.

**6.4.** В плоский конденсатор с зазором между обкладками 10 мм, заряженный до 280 В и отключенный от источника, ввели стеклянную ( $\epsilon = 7$ ) пластину толщиной 3 мм. Найти плотность связанных зарядов на поверхности стекла.

**6.5.** Стеклянная ( $\epsilon = 7$ ) пластина внесена в однородное электрическое поле. Угол между направлением вектора напряженности поля в воздухе и нормалью к пластине равен  $30^\circ$ . Во сколько раз электрическая индукция в стекле больше, чем в воздухе?

**6.6.** Стеклянная ( $\epsilon = 7$ ) пластина внесена в однородное электрическое поле. Угол между направлением вектора напряженности поля в воздухе и нормалью к пластине равен  $30^\circ$ . Найти угол между направлением вектора напряженности поля в стекле и нормалью к пластине.

**6.7.** Стеклянная ( $\epsilon = 7$ ) пластина внесена в однородное электрическое поле напряженностью 10 В/м. Угол между направлением вектора напряженности поля в воздухе и нормалью к пластине равен  $30^\circ$ . Найти величину напряженности электрического поля в пластине.

**6.8.** Стеклянная ( $\epsilon = 7$ ) пластина внесена в однородное электрическое поле. Угол между направлением вектора напряженности поля в воздухе и нормалью к пластине равен  $30^\circ$ . Найти угол между направлениями векторов напряженности электрического поля в воздухе и в пластине.

**6.9.** Стеклянная ( $\epsilon = 7$ ) пластина внесена в однородное электрическое поле напряженностью 10 В/м. Угол между направлением вектора

напряженности поля в воздухе и нормалью к пластине равен  $30^\circ$ . Найти плотность связанных зарядов на поверхности стекла.

**6.10.** На высоте 1 см над поверхностью керосина ( $\epsilon = 2$ ) висит точечный заряд 314 нКл. Найти плотность связанных зарядов на поверхности жидкости на расстоянии 5 см от источника.

**6.11.** На высоте 1 см над поверхностью керосина ( $\epsilon = 2$ ) висит точечный заряд 314 нКл. Найти напряженность электрического поля в приграничном слое жидкости на расстоянии 5 см от источника.

**6.12.** По разные стороны от границы воздуха и керосина ( $\epsilon = 2$ ) на одном перпендикуляре к ней находятся два одинаковых точечных заряда. Положение их таково, что в точке на границе между ними поляризационные заряды отсутствуют. Во сколько раз отличаются расстояния от заряда до границы в воздухе и в керосине?

**6.13.** Внутри шара из диэлектрика с  $\epsilon = 5$  создано однородное электрическое поле с напряженностью 100 В/м. Найти максимальную поверхностную плотность связанных зарядов.

**6.14.** В воде ( $\epsilon = 81$ ) электрическое поле с напряженностью 100 кВ/м создает поляризацию, эквивалентную правильной ориентации одной молекулы из  $N$ . Найти  $N$ . Электрический дипольный момент молекулы воды равен  $6,2 \cdot 10^{-30}$  Кл·м. Молярная масса воды 18 г/моль, ее плотность 1000 кг/м<sup>3</sup>.

**6.15.** Точечный заряд находится в однородном диэлектрике с проницаемостью  $\epsilon$ . Найти поляризованность диэлектрика как функцию длины радиуса-вектора.

**6.16.** Точечный заряд  $q$  находится в центре диэлектрического шара с проницаемостью  $\epsilon_1$  и радиусом  $R$ . Шар помещен в безграничный диэлектрик с проницаемостью  $\epsilon_2$ . Найти поверхностную плотность заряда на границе раздела диэлектриков.

**6.17.** По разные стороны от границы воздуха и керосина ( $\epsilon = 2$ ) на одном перпендикуляре к ней находятся два точечных заряда. Заряд в керосине вчетверо больше, чем в воздухе. Положение этих зарядов таково, что в точке на границе между ними поляризационные заряды отсутствуют. Во сколько раз отличаются расстояния от заряда до границы в воздухе и в керосине?

**6.18.** Напряженность электрического поля в воде ( $\epsilon_1 = 81$ ) вблизи границы со стеклом равна 100 В/м и направлена под углом  $60^\circ$  к нормали. Найти напряженность электрического поля в стекле, если диэлектрическая проницаемость в нем  $\epsilon_2 = 7$ .

**6.19.** По разные стороны от границы воздуха и керосина ( $\epsilon = 2$ ) на одном перпендикуляре к ней находятся два точечных заряда. Заряд в воздухе вдвое больше, чем в керосине. Положение этих зарядов таково, что в точке на границе между ними поляризационные заряды отсутствуют. Во сколько раз отличаются расстояния от заряда до границы в воздухе и в керосине?

**6.20.** Определить плотность связанных зарядов на поверхности слюдяной пластинки ( $\epsilon = 7$ ) толщиной 0,2 мм, служащей изолятором в плоском конденсаторе, заряженном до напряжения 400 В.

**6.21.** У поверхности фарфора ( $\epsilon = 5$ ) напряженность электрического поля в воздухе направлена под углом  $40^\circ$  к нормали. Определить угол между направлением электрического поля и нормалью в фарфоре.

**6.22.** Вектор напряженности электрического поля в воде ( $\epsilon_1 = 81$ ) вблизи границы со стеклом направлен под углом  $60^\circ$  к нормали. Найти угол между нормалью и направлением электрического поля в стекле, если диэлектрическая проницаемость в нем  $\epsilon_2 = 7$ .

**6.23.** В керосине ( $\epsilon = 2$ ) на глубине 3 см от поверхности находится точечный заряд 10 мкКл. Определить поверхностную плотность связанных электрических зарядов на расстоянии 5 см от источника.

**6.24.** В керосине ( $\epsilon = 2$ ) на глубине 3 см от поверхности находится точечный заряд 10 мкКл. Определить напряженность электрического поля в воздухе у поверхности диэлектрика на расстоянии 5 см от заряда.

**6.25.** Вблизи границы двух диэлектриков с проницаемостями  $\epsilon_1 = 5$  и  $\epsilon_2 = 7$  по разные стороны от этой границы на расстояниях  $r_1 = 7$  см и  $r_2 = 5$  см от нее на одном перпендикуляре помещены точечные заряды  $q_1 = 5$  мкКл и  $q_2 = 3$  мкКл. Найти поверхностную плотность связанных электрических зарядов на границе в точке между зарядами  $q_1$  и  $q_2$ .

**6.26.** Плоский конденсатор, состоящий из трех равноотстоящих пластин, заполнен диэлектриками с проницаемостями  $\epsilon_1 = 2$  и  $\epsilon_2 = 5$ . Крайние пластины заряжены разноименными зарядами  $\pm 3$  мкКл, а средняя заземлена. Найти заряд третьей пластины.

**6.27.** Напряженность электрического поля в воде ( $\epsilon_1 = 81$ ) вблизи границы со стеклом равна 100 В/м и направлена под углом  $60^\circ$  к нормали. Найти поверхностную плотность связанных электрических зарядов на границе, если диэлектрическая проницаемость стекла  $\epsilon_2 = 7$ .

**6.28.** Расстояние между обкладками плоского конденсатора равно 5 мм, а напряжение между ними – 1 кВ. Конденсатор заполнен стеклом

с диэлектрической проницаемостью, равной 7. Найти поверхностную плотность связанных зарядов на стекле.

**6.29.** У поверхности фарфора ( $\epsilon = 5$ ) напряженность электрического поля в воздухе равна 200 В/см и направлена под углом  $40^\circ$  к нормали. Определить напряженность электрического поля в фарфоре.

**6.30.** У поверхности фарфора ( $\epsilon = 5$ ) напряженность электрического поля в воздухе равна 200 В/см и направлена под углом  $40^\circ$  к нормали. Определить плотность связанных зарядов на границе фарфора.

## 7. Электрический ток

### *Теоретические сведения*

Электрический ток  $I$  связан с зарядом  $q$ , прошедшим по проводнику, соотношениями:

$$I = \frac{dq}{dt}; \quad (7.1)$$

$$q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt. \quad (7.2)$$

Плотность электрического тока  $j$  равна отношению тока  $I$  к площади поперечного сечения проводника  $S$

$$j = \frac{I}{S}. \quad (7.3)$$

Закон Ома для участка цепи

$$I = \frac{U}{R}, \quad (7.4)$$

где  $U$  – падение напряжения на проводнике;  $R$  – его электрическое сопротивление. Сопротивление проводника не зависит от приложенного к нему напряжения и от протекающего по нему тока. Оно зависит лишь от формы, размеров проводника и от материала, из которого он изготовлен. Для длинного тонкого провода

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (7.5)$$

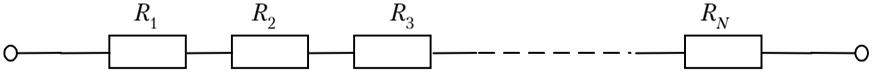
где  $\rho$  – удельное сопротивление материала;  $l$  – длина провода;  $S$  – площадь его поперечного сечения.

Для последовательно включенных резисторов (рис. 4):

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_N, \quad (7.6)$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_N, \quad (7.7)$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N. \quad (7.8)$$



**Рис. 4. Последовательно включенные резисторы**

Для параллельно включенных резисторов (рис. 5):

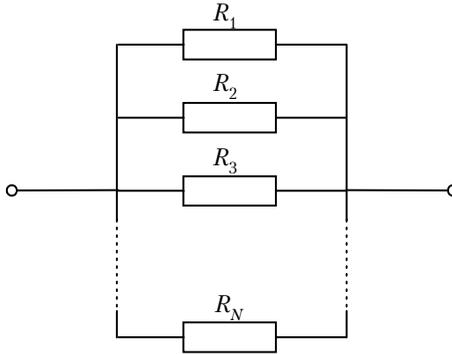
$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N, \quad (7.9)$$

$$U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_N, \quad (7.10)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}. \quad (7.11)$$

В случае двух параллельно включенных резисторов вместо формулы (7.11) можно использовать

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (7.12)$$



**Рис. 5. Параллельно включенные резисторы**

Закон Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (7.13)$$

где  $\varepsilon$  – ЭДС источника;  $r$  – его внутреннее сопротивление.

Для участка цепи с источником тока справедливо выражение

$$\Delta\varphi = I(R + r) \pm \varepsilon, \quad (7.14)$$

в котором  $\Delta\varphi$  – разность потенциалов на концах участка. Знак “+” или “–” при ЭДС определяется полярностью включения источника.

Мощность электрического тока, выделяющаяся на участке цепи:

$$N = IU, \quad (7.15)$$

включает в себя как тепловую, так и механическую мощность электродвигателей или других устройств.

Мощность источника электрического тока, выделяющаяся в самом источнике и на нагрузке (потребителе электроэнергии):

$$N = I\varepsilon. \quad (7.16)$$

Формулы (7.15) и (7.16) можно сочетать с законами Ома лишь для тех участков цепи, которые не содержат электродвигателей или других устройств, превращающих электрическую энергию в механическую.

Тепловая мощность, выделяющаяся на резисторе:

$$N_T = I^2 R. \quad (7.17)$$

Если на участке цепи справедлив закон Ома, выделяется только тепловая мощность, то формулы (7.15), (7.17) дают одинаковый результат. В этом случае можно пользоваться также формулой

$$N = \frac{U^2}{R}. \quad (7.18)$$

Теплота, выделяющаяся в резисторе за время протекания электрического тока, зависящего от времени  $I_{(t)}$ , находится по формуле

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I_{(t)}^2 R dt. \quad (7.19)$$

### *Задачи*

**7.1.** Ток в проводнике изменяется со временем по закону  $I = I_0 + \alpha t$ , где  $I_0 = 4$  А,  $\alpha = 2$  А/с. Какой электрический заряд проходит по проводнику за промежуток времени от 2 до 6 с?

**7.2.** Сила тока в проводнике равномерно нарастает от 0 до 3 А в течение 10 с. Найти электрический заряд, протекший за это время.

**7.3.** Какой электрический заряд протечет по проводнику за 10 с, если за это время сила тока равномерно уменьшилась от 10 до 5 А?

**7.4.** Какой электрический заряд протечет по проводнику за 10 с, если это время напряжение оставалось постоянным, сила тока уменьшилась от 10 до 5 А, а сопротивление проводника возросло линейно со временем?

**7.5.** Определить плотность электрического тока в медной проволоке длиной 10 м, если напряжение на ее концах 12 В. Удельное сопротивление меди 17,14 нОм·м.

**7.6.** Катушка и амперметр последовательно подключены к источнику тока. К зажимам катушки присоединен вольтметр сопротивлением 1 кОм. Показания амперметра 0,5 А, вольтметра 100 В. Найти сопротивление катушки.

**7.7.** Зашунтованный амперметр измеряет токи до 10 А. Какой наибольший ток может измерить этот амперметр без шунта, если его сопротивление 20 мОм, а сопротивление шунта 5 мОм?

**7.8.** Электрический источник, замкнутый на сопротивление 10 Ом, дает ток 3 А. Тот же источник, замкнутый на сопротивление 20 Ом, дает ток 1,6 А. Найти ЭДС и внутреннее сопротивление источника.

**7.9.** К электрическому источнику с ЭДС 1,5 В подключили катушку сопротивлением 0,1 Ом. Амперметр показал ток 0,5 А. Когда последовательно с источником тока включили еще один источник с такой же ЭДС, сила тока оказалась равной 0,4 А. Найти внутренние сопротивления первого и второго источников.

**7.10.** Две группы из трех последовательно соединенных элементов соединены параллельно. Внутреннее сопротивление каждого элемента равно 0,2 Ом, а ЭДС – 1,2 В. Полученная батарея замкнута на внешнее сопротивление 1,5 Ом. Найти ток во внешней цепи.

**7.11.** При токе 3 А во внешней цепи выделяется мощность 18 Вт, а при токе 1 А – 10 Вт. Определить внутреннее сопротивление источника.

**7.12.** Обмотка электрического чайника имеет две секции. Если включить одну секцию, то вода закипит через 10 минут; если вторую, то через 20. Через сколько минут закипит вода, если обе секции включить параллельно? Потерями тепла пренебречь.

**7.13.** Лампочка и реостат, соединенные последовательно, подключены к источнику тока. Напряжение на зажимах лампочки 40 В, сопротивление реостата 10 Ом. Внешняя цепь потребляет мощность 120 Вт. Найти силу тока в цепи.

**7.14.** ЭДС батареи 12 В, сила тока короткого замыкания 5 А. Какая наибольшая мощность может выделиться во внешней цепи, подключенной к такой батарее?

**7.15.** К батарее с ЭДС 2 В и внутренним сопротивлением 0,5 Ом, подключен реостат. При каком сопротивлении реостата выделяемая на нем мощность максимальна? Найти эту мощность.

**7.16.** Спираль электроплитки имеет две секции. Если включена одна секция, то вода закипает через 15 минут, если другая, то через 30. Через

сколько минут закипит вода, если обе секции включить параллельно? Потерями тепла во внешнюю среду пренебречь.

**7.17.** Аккумулятор с ЭДС 2,6 В, замкнутый на внешнее сопротивление, дает ток 1 А. При этом падение напряжения на нем равно 2 В. Найти тепловую мощность, выделяющуюся в источнике.

**7.18.** Требуется изготовить нагревательную спираль для электрической плитки мощностью 0,5 кВт, в сети с напряжением 220 В. Сколько метров нихромовой проволоки диаметром 0,4 мм нужно для этого взять? Удельное сопротивление нагретого нихрома 1,05 мкОм·м.

**7.19.** Обмотка электрического чайника имеет две секции. Если включить одну секцию, то вода закипит через 10 минут, если вторую, то через 20. Через сколько минут закипит вода, если обе секции включить последовательно? Потерями тепла пренебречь.

**7.20.** При токе 3 А во внешней цепи выделяется мощность 18 Вт, а при токе 1 А – 10 Вт. Определить ЭДС источника.

**7.21.** В конце зарядки аккумулятора при напряжении на его клеммах 12,8 В течет ток 4 А. При разрядке того же аккумулятора током 6 А напряжение на его клеммах 11,1 В. Найти ток короткого замыкания.

**7.22.** Спираль электроплитки имеет две секции. Если включена одна секция, то вода закипает через 15 минут, если другая, то через 30. Через сколько минут закипит вода, если обе секции включить последовательно? Потерями тепла во внешнюю среду пренебречь.

**7.23.** Сила тока в проводнике сопротивлением 100 Ом равномерно нарастает от 0 до 10 А в течение 30 с. Какое количество теплоты выделяется в этом проводнике за указанный промежуток времени?

**7.24.** Сила тока в проводнике сопротивлением 12 Ом равномерно убывает от 5 А до 0 в течение 10 с. Какое количество теплоты выделяется в этом проводнике за указанный промежуток времени?

**7.25.** Сколько тепла выделится в спирали с сопротивлением 75 Ом при протекании через нее заряда 100 Кл, если ток в проводнике равномерно убывал до нуля в течение 50 с?

**7.26.** Генератор мощностью 200 кВт передает по проводам сопротивлением 50 Ом под напряжением 100 кВ электроэнергию потребителю. Найти КПД линии электропередач, т. е. отношение мощности, выделяющейся на полезной нагрузке, к мощности генератора.

**7.27.** По проводнику сопротивлением 3 Ом течет ток, равномерно возрастающий в течение 8 с от нуля до максимального значения. Какой заряд протек через проводник, если за это время в нем выделилось 200 Дж теплоты?

**7.28.** Сила тока в проводнике сопротивлением 15 Ом равномерно возрастает от нуля до максимального значения в течение 5 с. За это время в проводнике выделилось 10 кДж теплоты. Найти среднюю силу тока в проводнике за этот промежуток времени.

**7.29.** Сила тока в проводнике сопротивлением 3 Ом равномерно возрастает от нуля до максимального значения в течение 10 с. За это время в проводнике выделилось 1000 Дж теплоты. Найти скорость нарастания тока в проводнике в этот промежуток времени.

**7.30.** Сила тока в проводнике спадает по закону  $I = I_0 \exp(-t/\tau)$ , где  $I_0 = 0,1$  А, а  $\tau = 30$  с. Какой заряд пройдет по проводнику за все время протекания тока?

## МАГНЕТИЗМ

### 8. Расчет магнитных полей и магнитных моментов

#### *Теоретические сведения*

Закон Био–Савара–Лапласа

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \left[ d\vec{l} \times \frac{\vec{r}}{r^3} \right] I, \quad (8.1)$$

где  $d\vec{B}$  – магнитная индукция, создаваемая элементом проводника  $d\vec{l}$  с током  $I$  на расстоянии  $r$  от него. Здесь  $\mu$  – магнитная проницаемость,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Величина вектора  $d\vec{B}$  выражается формулой

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I \sin \alpha}{r^2} dl, \quad (8.2)$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$ .

Магнитная индукция в центре кругового витка с током

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R}. \quad (8.3)$$

Здесь  $R$  – радиус витка.

Если провод является дугой окружности радиуса  $R$ , опирающейся на угол  $\phi$  (рис. 6, а), магнитная индукция в его центре

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R} \frac{\varphi}{2\pi}. \quad (8.4)$$

Магнитная индукция, создаваемая отрезком проводника:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi b} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2). \quad (8.5)$$

Обозначения ясны из рис. 6, б. При симметричном расположении проводника относительно точки наблюдения  $\cos\alpha_1 = -\cos\alpha_2 = \cos\alpha$ :

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi b} \cos\alpha. \quad (8.6)$$

В случае когда провод можно считать бесконечно длинным:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi b}. \quad (8.7)$$

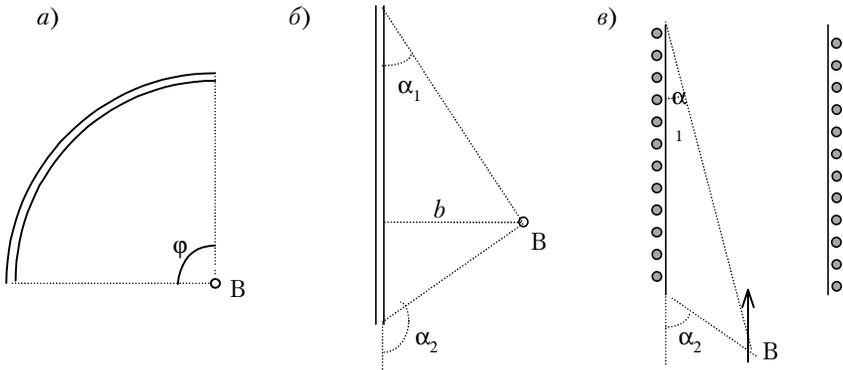


Рис. 6. Определение магнитной индукции в различных случаях

Магнитная индукция тороида или длинного соленоида в средней его части

$$B = \mu\mu_0 nI. \quad (8.8)$$

В этой и следующих формулах  $n$  – плотность намотки провода, т. е. количество витков, приходящихся на единицу длины катушки.

Магнитная индукция соленоида конечной длины

$$B = \mu\mu_0 nI(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2). \quad (8.9)$$

Смысл всех обозначений ясен из рис. 6, в.

Магнитная индукция электрического заряда  $q$ , движущегося со скоростью  $v$ :

$$\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi r^3} \left[ \vec{v} \times \vec{r} \right]. \quad (8.10)$$

Здесь  $r$  – текущее расстояние от точки наблюдения до заряда. Величину магнитной индукции движущегося заряда можно найти по формуле

$$B = \frac{\mu\mu_0 v}{4\pi r^2} \sin \alpha, \quad (8.11)$$

в которой  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{r}$ .

Принцип суперпозиции магнитных полей: магнитная индукция результирующего поля равна векторной сумме магнитных индукций складываемых полей

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots + \vec{B}_N = \sum_i^N \vec{B}_i. \quad (8.12)$$

В частном случае наложения двух полей  $B_1$  и  $B_2$  величина магнитной индукции

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1 B_2 \cos \alpha}. \quad (8.13)$$

В этой формуле  $\alpha$  – угол между направлениями векторов  $B_1$  и  $B_2$ .

Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции в вакууме: циркуляция вектора магнитной индукции по замкнутому контуру равна алгебраической сумме всех токов, охваченных этим контуром;

$$\oint_l (\vec{B} d\vec{l}) = \mu_0 \sum_i I_i. \quad (8.14)$$

Суммирование токов нужно проводить с учетом направлений, в которых они пересекают контур циркуляции.

Магнитный момент контура с током

$$\vec{P}_m = I\vec{S}, \quad (8.15)$$

где  $\vec{S}$  – вектор, равный по модулю площади контура и направленный по нормали к ней.

Эквивалентный круговой ток, возникающий при вращении заряженного тела вокруг некоторой оси, можно найти по формуле

$$I = q/T = q\nu, \quad (8.16)$$

в которой  $T$  – период;  $\nu$  – частота вращения тела.

Вращающееся заряженное тело следует разбить на элементарные круговые токи и найти элементарные магнитные моменты, создаваемые этими токами:

$$dP_m = dIS = 0,5\omega r^2 dq. \quad (8.17)$$

В этой формуле  $\omega$  – циклическая частота вращения тела;  $dq$  – заряд, создающий элементарный круговой ток;  $r$  – радиус вращения этого заряда. Полный магнитный момент находится суммированием всех элементарных магнитных моментов, т. е. интегрированием по всему телу

$$P_m = \int_{(V)} dP_m. \quad (8.18)$$

Момент импульса твердого тела с моментом инерции  $J$

$$L = J\omega. \quad (8.19)$$

Моменты инерции материальной точки и тонкого кольца

$$J = mr^2. \quad (8.20)$$

Момент инерции тонкого стержня длиной  $l$  относительно его центра

$$J = (1/12)ml^2. \quad (8.21)$$

### *Задачи*

**8.1.** Катушка длиной 20 см и диаметром тоже 20 см содержит 100 витков. По обмотке течет ток 5 А. Определить магнитную индукцию в точке, лежащей на оси катушки на расстоянии 10 см от ее конца.

**8.2.** Обмотка катушки диаметром 10 см состоит из плотно намотанных витков тонкой проволоки. Определить минимальную длину катушки, при которой магнитная индукция в ее центре при том же токе отличается от магнитной индукции бесконечного соленоида с такой же плотностью намотки не более, чем на 0,5%.

**8.3.** По двум длинным параллельным проводам, расположенным на расстоянии 5 см друг от друга, текут одинаковые токи 10 А в противоположных направлениях. Найти магнитную индукцию в точке на расстоянии 2 см от одного провода и 3 см от другого.

**8.4.** По двум длинным параллельным проводам, расположенным на расстоянии 5 см друг от друга, текут одинаковые токи 30 А в одном направлении. Найти магнитную индукцию в точке на расстоянии 4 см от одного провода и 3 см от другого.

**8.5.** По двум длинным параллельным проводам, расположенным на расстоянии 10 см друг от друга, текут токи 50 и 100 А в одном направлении. Найти магнитную индукцию в точке, удаленной от обоих проводов на одинаковое расстояние 10 см.

**8.6.** Два бесконечно длинных прямых провода скрещены под прямым углом. По проводам текут токи 80 и 60 А. Длина отрезка, соединяюще-

го ближайшие точки проводов равна, 10 см. Определить магнитную индукцию в середине этого отрезка.

**8.7.** По бесконечно длинному прямому проводу, согнутому под углом  $120^\circ$ , течет ток 50 А. Найти магнитную индукцию в точке на биссектрисе угла на расстоянии 5 см от вершины.

**8.8.** Определить максимальную магнитную индукцию поля, создаваемого электроном, летящим со скоростью 10 Мм/с, в точке, отстоящей от траектории на 1 нм.

**8.9.** По квадрату со стороной 20 см течет ток 50 А. Определить магнитную индукцию в центре этого квадрата.

**8.10.** По прямоугольнику со сторонами 30 и 40 см течет ток 60 А. Определить магнитную индукцию в центре этого прямоугольника.

**8.11.** По проводу, изогнутому в виде правильного шестиугольника со стороной 10 см, течет ток 25 А. Найти магнитную индукцию в центре этого контура.

**8.12.** Длинный проводник с током 5 А изогнут под прямым углом. Найти магнитную индукцию в точке, отстоящей от плоскости проводника на 35 см напротив точки изгиба.

**8.13.** Ток 11 А течет по длинному прямому проводнику, сечение которого имеет форму тонкого полукольца радиусом 5 см. Найти индукцию магнитного поля в центре полукольца.

**8.14.** По тонкому проволочному кольцу течет ток. Не изменяя силы тока, проводнику придали форму квадрата. Во сколько раз изменилась магнитная индукция в центре контура?

**8.15.** Точечный заряд, движущийся со скоростью 900 м/с, создает в некоторый момент напряженность электрического поля 600 В/м. Угол между направлениями векторов напряженности и скорости частицы равен  $30^\circ$ . Найти магнитную индукцию в выбранной точке.

**8.16.** Электрон в невозбужденном атоме водорода движется вокруг ядра по окружности радиусом 53 пм. Найти силу эквивалентного кругового тока и магнитную индукцию в центре орбиты.

**8.17.** По круговому витку радиусом 0,1 м из тонкого провода течет ток 1 А. Найти магнитную индукцию в центре витка и на оси витка в точке, отстоящей от его центра на 0,1 м.

**8.18.** Найти магнитную индукцию в центре прямоугольного контура с диагоналями 16 см, угол между которыми  $30^\circ$ . Ток в контуре 5 А.

**8.19.** Ток 5 А течет по замкнутому тонкому проводнику, состоящему из двух частей: дуги окружности радиусом 0,12 м, опирающейся на угол

270°, и отрезка, замыкающего эту дугу. Найти магнитную индукцию в центре дуги.

**8.20.** Однородный ток плотностью  $100 \text{ А/м}^2$  течет по неограниченной пластине толщиной 20 см параллельно ее поверхности. Найти индукцию магнитного поля в точках, отстоящих от средней плоскости на 15 и 5 см. Магнитная проницаемость равна единице.

**8.21.** Определить магнитную индукцию тока, линейно распределенного по плоскости с линейной плотностью  $10 \text{ А/м}$ .

**8.22.** Найти индукцию магнитного поля, создаваемого прямым отрезком проводника с током  $20 \text{ А}$ , в  $5 \text{ см}$  от отрезка на серединном перпендикуляре к нему, в точке, откуда он виден под углом  $60^\circ$ .

**8.23.** Найти магнитный момент тонкого кругового витка с током радиусом  $0,1 \text{ м}$ , если индукция магнитного поля в его центре  $6 \text{ мТл}$ .

**8.24.** Непроводящий диск радиусом  $10 \text{ см}$ , равномерно заряженный с одной стороны с поверхностной плотностью  $10 \text{ мкКл/м}^2$ , вращается вокруг своей оси с угловой скоростью  $50 \text{ рад/с}$ . Найти магнитный момент диска.

**8.25.** По тонкому стержню длиной  $20 \text{ см}$  равномерно распределен заряд  $240 \text{ нКл}$ . Стержень вращается вокруг своего серединного перпендикуляра с угловой скоростью  $10 \text{ рад/с}$ . Определить магнитный момент стержня и его отношение к моменту импульса.

**8.26.** Считая, что электрон в атоме водорода движется вокруг ядра по круговой орбите, выразить отношение магнитного момента эквивалентного кругового тока к моменту импульса орбитального движения электрона через массу и заряд электрона.

**8.27.** Непроводящая сфера радиусом  $50 \text{ мм}$ , равномерно заряженная с поверхностной плотностью  $10 \text{ мкКл/м}^2$ , вращается вокруг своей оси с угловой скоростью  $70 \text{ рад/с}$ . Найти индукцию магнитного поля в центре сферы.

**8.28.** Непроводящий диск радиусом  $10 \text{ см}$ , равномерно заряженный с одной стороны с поверхностной плотностью  $10 \text{ мкКл/м}^2$ , вращается вокруг своей оси с угловой скоростью  $50 \text{ рад/с}$ . Найти индукцию магнитного поля в центре диска.

**8.29.** Непроводящая сфера радиусом  $50 \text{ мм}$ , равномерно заряженная с поверхностной плотностью  $10 \text{ мкКл/м}^2$ , вращается вокруг своей оси с угловой скоростью  $70 \text{ рад/с}$ . Найти магнитный момент сферы.

**8.30.** Тонкое кольцо радиусом  $10 \text{ см}$  и массой  $20 \text{ г}$ , несущее заряд  $10 \text{ нКл}$ , равномерно вращается с частотой  $10 \text{ Гц}$  относительно перпендикуляра, проведенного из его центра. Определить магнитный момент кольца и его отношение к моменту импульса.

## 9. Движение заряженных частиц в магнитном поле

### Теоретические сведения

Сила Лоренца, действующая на заряд  $q$ , движущийся со скоростью  $v$  в магнитном поле с индукцией  $B$ , выражается формулой

$$\vec{F}_\Lambda = q[\vec{v}\vec{B}], \quad (9.1)$$

задающей как величину, так и направление этой силы (рис. 7). Величину силы Лоренца удобнее вычислять по формуле, записанной в скалярном виде:

$$F_\Lambda = |q|vB \sin \alpha, \quad (9.2)$$

в которой  $\alpha$  – угол между векторами магнитной индукции и скорости частицы.

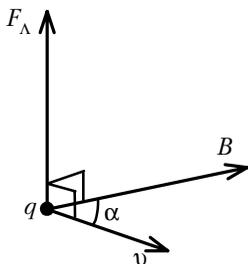


Рис. 7. Направление силы Лоренца

### Задачи

**9.1.** Ион, несущий один элементарный заряд, движется в однородном магнитном поле с индукцией 0,015 Тл по окружности радиусом 10 см. Определить импульс иона.

**9.2.** Частица, несущая один элементарный заряд, влетела в однородное магнитное поле с индукцией 0,5 Тл. Найти момент импульса частицы, если она движется по дуге окружности радиусом 2 мм.

**9.3.** Электрон движется в магнитном поле с индукцией 0,02 Тл по окружности радиусом 1 см. Найти его кинетическую энергию.

**9.4.** Заряженная частица, двигаясь в магнитном поле по дуге окружности радиусом 2 см, прошла сквозь свинцовую пластину и потеряла часть своей энергии. Вследствие этого радиус траектории уменьшился до 1 см. Найти относительное изменение энергии.

**9.5.** Заряженная частица, прошедшая ускоряющее напряжение 2 кВ, движется в однородном магнитном поле с индукцией 15,1 мТл по окружности радиусом 1 см. Определить отношение заряда частицы к ее массе.

**9.6.** Заряженная частица с энергией 1 кэВ движется в однородном магнитном поле по окружности радиусом 1 мм. Найти силу, действующую на частицу.

**9.7.** Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл перпендикулярно линиям индукции. Найти силу, действующую на электрон, если радиус кривизны его траектории равен 5 мм.

**9.8.** Определить частоту вращения электрона по круговой орбите в магнитном поле, индукция которого равна  $0,2$  Тл.

**9.9.** Электрон в однородном магнитном поле с индукцией  $0,1$  Тл движется по окружности. Найти силу эквивалентного кругового тока.

**9.10.** Заряженная частица, прошедшая ускоряющее напряжение  $2$  кВ, движется в однородном магнитном поле с индукцией  $15,1$  мТл по окружности радиусом  $1$  см. Определить скорость частицы.

**9.11.** В однородном магнитном поле с индукцией  $100$  мкТл движется электрон по винтовой линии. Определить скорость электрона, если шаг винтовой линии равен  $20$  см, а радиус  $5$  см.

**9.12.** Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией  $9$  мТл по винтовой линии, радиус которой равен  $1$  см, а шаг  $7,8$  см. Определить скорость электрона.

**9.13.** В однородном магнитном поле с индукцией  $2$  Тл движется протон по винтовой линии с радиусом  $10$  см и шагом  $60$  см. Определить кинетическую энергию протона.

**9.14.** Электрон, ускоренный напряжением  $300$  В, движется параллельно прямолинейному длинному проводу на расстоянии  $4$  мм от него. Какая сила будет действовать на электрон, если по проводу пустить ток  $5$  А?

**9.15.** В однородном магнитном поле с индукцией  $10$  мТл, направленной вдоль оси  $(o; x)$ , из начала координат в направлении этой оси вылетает слегка расходящийся пучок моноэнергетических электронов со скоростью  $6$  Мм/с. На каком наименьшем расстоянии от начала координат этот пучок вновь сфокусируется?

**9.16.** Протон, пройдя ускоряющую разность потенциалов  $800$  В, влетел в однородные, скрещенные под прямым углом магнитное ( $B = 50$  мТл) и электрическое поля. Определить напряженность электрического поля, если протон в этих полях движется прямолинейно.

**9.17.** Заряженная частица движется по окружности радиусом  $1$  см в однородном магнитном поле с индукцией  $0,1$  Тл. Параллельно магнитному полю на короткое время включается электрическое с напряженностью  $100$  В/м. На какое время следует включить электрическое поле, чтобы кинетическая энергия частицы удвоилась?

**9.18.** Протон влетает со скоростью  $100$  км/с в область пространства с электрическим ( $E = 210$  В/м) и магнитным ( $B = 3,3$  мТл) полями, силовые линии которых параллельны. Найти ускорение протона в начальный момент времени, если он влетел в эти поля: а) вдоль силовых линий, б) перпендикулярно силовым линиям.

**9.19.** Протон, ускоренный напряжением 500 кВ, пролетел слой толщиной 10 см, в котором создано поперечное магнитное поле с индукцией 0,51 Тл. На какой угол протон отклонился от своего начального направления, если к первой границе он подлетел по нормали?

**9.20.** Электрон, ускоренный разностью потенциалов 1 кВ, движется в однородном магнитном поле с индукцией 29 мТл под углом  $30^\circ$  к силовым линиям. Найти шаг винтовой линии электрона.

**9.21.** Протон движется прямолинейно в скрещенных электрическом ( $E = E_y = 4$  кВ/м) и магнитном ( $B = B_z = 50$  мТл) полях. Траектория протона лежит в плоскости ( $x; z$ ), и составляет угол  $30^\circ$  с осью ( $o; x$ ). Найти шаг винтовой линии, по которой будет двигаться протон после выключения электрического поля.

**9.22.** Найти скорость и кинетическую энергию  $\alpha$ -частиц, вылетающих из циклотрона, если у выходного окна они движутся по окружности радиусом 50 см. Индукция магнитного поля циклотрона равна 1,7 Тл.

**9.23.** Пучок протонов проходит, не отклоняясь, через область, в которой созданы однородные поперечные взаимно перпендикулярные электрическое ( $E = 120$  кВ/м) и магнитное ( $B = 50$  мТл) поля, и попадает на заземленную мишень. С какой силой пучок действует на мишень, если ток в пучке равен 0,8 мА?

**9.24.** Начальные участки траекторий двух протонов, один из которых до взаимодействия покоился, после столкновения имеют радиусы кривизны 2 и 4 см. Траектории лежат в плоскости, перпендикулярной магнитной индукции, величина которой 10 мТл. Какую энергию имел до столкновения двигавшийся протон?

**9.25.** Электрон влетает со скоростью 1 Мм/с в область однородного магнитного поля с индукцией 1 мТл перпендикулярно силовым линиям. Угол между направлением скорости и нормалью к границе поля составляет  $30^\circ$ . Определить максимальную глубину проникновения электрона в область магнитного поля.

**9.26.** Определить удельный заряд частиц, ускоренных в циклотроне с магнитной индукцией 1,7 Тл при частоте ускоряющего напряжения 25,9 МГц.

**9.27.** Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией 9 мТл по винтовой линии. Найти период обращения электрона.

**9.28.** Два однозарядных иона, ускоренные одним и тем же напряжением, влетели в однородное магнитное поле и стали двигаться в нем по окружностям с радиусами 6 и 4 см. Найти отношение атомных масс этих ионов.

**9.29.** Электрон, влетевший в однородное магнитное поле с индукцией 2 мТл, движется по круговой орбите радиусом 15 см. Определить магнитный момент эквивалентного кругового тока.

**9.30.** В однородное магнитное поле с магнитной индукцией 0,2 Тл перпендикулярно линиям индукции влетает частица. В течение 5 мкс параллельное магнитному включается электрическое поле с напряженностью 500 В/м. Определить шаг винтовой линии частицы после выключения электрического поля.

## 10. Проводники с током в магнитном поле

### Теоретические сведения

Сила Ампера, действующая на проводник с током  $I$  в магнитном поле с индукцией  $B$ , выражается формулой

$$\vec{F}_A = I [\vec{l} \vec{B}]. \quad (10.1)$$

В этой формуле  $\vec{l}$  – вектор, равный по модулю длине проводника и направленный по току. Формула (10.1) задает как величину, так и направление силы Ампера (рис. 8). Величину этой силы удобнее вычислять по формуле, записанной в скалярном виде:

$$F_A = BIl \sin \alpha, \quad (10.2)$$

в которой  $\alpha$  – угол между векторами магнитной индукции и скорости частицы.

Сила взаимодействия двух прямых бесконечно длинных параллельных проводников с токами  $I_1$  и  $I_2$ , находящихся на расстоянии  $b$  друг от друга, рассчитанная на отрезок провода длиной  $l$  выражается формулой

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{b}. \quad (10.3)$$

Магнитный момент контура с током

$$\vec{P}_m = I\vec{S}, \quad (10.4)$$

где  $\vec{S}$  – вектор, равный по модулю площади контура и направленный по нормали к ней.

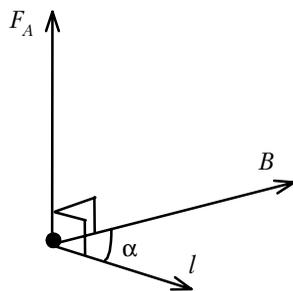


Рис. 8. Направление силы Ампера

Механический момент, действующий на контур с током в однородном магнитном поле:

$$\vec{M} = [\vec{P}_m \vec{B}]. \quad (10.5)$$

Модуль механического момента

$$M = P_m B \sin \alpha, \quad (10.6)$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{P}_m$  и  $\vec{B}$ .

Потенциальная энергия магнитного диполя в магнитном поле

$$W_{\text{п}} = -(\vec{P}_m \vec{B}) = -P_m B \cos \alpha. \quad (10.7)$$

Сила, действующая в магнитном поле на контур с током, ориентированный вдоль линии индукции (по оси  $oz$ ):

$$F_z = P \frac{\partial B}{\partial z}, \quad (10.8)$$

где  $\frac{\partial B}{\partial z}$  – величина неоднородности магнитного поля. Эта сила затягивает магнитный диполь в область более сильного поля.

Период малых крутильных колебаний магнитного диполя (контур с током) во внешнем поле

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{P_m B}}, \quad (10.9)$$

где  $J$  – момент инерции диполя.

Момент инерции тонкого кольца относительно его диаметра

$$J = \frac{1}{2} m R^2. \quad (10.10)$$

Момент инерции проволочного квадрата со стороной  $a$  относительно оси, проходящей через его центр параллельно двум сторонам:

$$J = (1/6) m a^2. \quad (10.11)$$

### **Задачи**

**10.1.** Участок прямого проводника длиной 10 см с током 20 А находится в магнитном поле с индукцией 10 мТл. На проводник действует сила 0,01 Н. Найти угол между направлениями проводника и магнитной индукции.

**10.2.** Квадратная рамка лежит в одной плоскости с длинным прямым проводом так, что ближайшая сторона рамки находится от провода на расстоянии, равном ее длине. По рамке и по проводу текут одинаковые токи 10 А. Какая сила действует на рамку?

**10.3.** Тонкое проводящее полукольцо радиусом 10 см помещено в однородное магнитное поле с индукцией 0,05 Тл так, что его плоскость перпендикулярна линиям индукции. Найти силу, действующую на проводник, если по нему течет ток 10 А, а подводющие провода выведены за пределы поля.

**10.4.** Линейный проводник с током 2 А массой 10 г и длиной 20 см, подвешенный горизонтально на двух невесомых нитях, помещают в магнитном поле с индукцией, направленной вертикально и равной 0,25 Тл. На какой угол нити отклонятся от вертикали?

**10.5.** По двум параллельным проводам длиной 1 м текут одинаковые токи. Расстояние между проводами 1 см, сила взаимодействия токов 1 мН. Найти токи в проводах.

**10.6.** По трем параллельным проводам, находящимся на равном расстоянии 10 см друг от друга, текут одинаковые токи 100 А разных направлений. Найти величину и направление силы, действующей на единицу длины каждого провода.

**10.7.** По двум прямолинейным параллельным длинным проводам текут одинаковые токи в одном направлении. Найти эти токи, если известно, что для удвоения расстояния между проводниками нужно совершить работу 55 мкДж/м на единицу длины провода.

**10.8.** Провод с током 2 А согнут под прямым углом. Найти силу, действующую на элемент этого провода длиной 1 см, находящийся на расстоянии 4 м от точки сгиба.

**10.9.** Два длинных прямых отроgonальных провода с одинаковыми токами 4 А отстоят друг от друга на 0,5 м. Найти максимальное значение силы Ампера на единицу длины провода в этой системе.

**10.10.** По двум тонким кольцам радиусами 10 см текут одинаковые токи 10 А. Найти силу взаимодействия колец, если их плоскости параллельны, а расстояние между ними, равное 1 мм, считать малым по сравнению с радиусами колец.

**10.11.** По двум параллельным квадратным контурам со стороной 20 см текут одинаковые токи 10 А. Найти силу взаимодействия контуров, если расстояние между соответствующими сторонами равно 2 мм. Считать расстояние между контурами малым по сравнению с их размерами.

**10.12.** Шины электростанции представляют собой параллельные медные полосы длиной 3 м, находящиеся на расстоянии 50 см. При коротком замыкании по ним может пройти ток 10000 А. С какой силой взаимодействуют при этом шины? Считать расстояние между шинами малым по сравнению с их длиной.

**10.13.** Деревянный цилиндр массой 0,25 кг и длиной 0,1 м лежит на наклонной плоскости. На цилиндр намотан продольный прямоугольный виток с током 12,5 А. Плоскость витка параллельна наклонной плоскости, ось цилиндра лежит в плоскости витка. При какой величине магнитной индукции, направленной вверх, цилиндр не будет скатываться?

**10.14.** На наклонной плоскости лежит проволочный виток радиусом 10 см с массой 31,4 г, помещенный в горизонтальное магнитное поле с индукцией 0,1 Тл. Какой минимальный ток нужно пропустить через виток, чтобы он перевернулся?

**10.15.** Квадратный контур с током 0,8 А из медного провода диаметром 0,4 мм может свободно вращаться вокруг своей верхней горизонтальной стороны. На какой угол отклонится плоскость контура, если его поместить в вертикальное магнитное поле с индукцией 3 мТл? Плотность меди  $8900 \text{ кг/м}^3$ .

**10.16.** Медный провод сечением  $0,25 \text{ мм}^2$  согнут в виде правильного треугольника и шарнирно подвешен за одну из своих вершин в однородном вертикальном магнитном поле с индукцией 1 мТл. На какой угол отклонится плоскость контура при включении тока 0,3 А? Плотность меди  $8900 \text{ кг/м}^3$ .

**10.17.** Проволока длиной 63 см свернута в круглый виток, по которому пропущен ток 0,5 А. Какой максимальный механический вращательный момент может действовать на этот контур в магнитном поле с индукцией 0,1 Тл?

**10.18.** Квадратная рамка со стороной 17,3 см шарнирно закреплена в серединах двух противоположных сторон. Две другие стороны параллельны длинному прямому проводу, удаленному от центра рамки на 5 см. Эти стороны равноудалены от провода. Какой механический вращательный момент действует на рамку, если ток по проводу 10 А, а по рамке – 1 А?

**10.19.** Плоская рамка площадью  $10 \text{ см}^2$ , состоящая из 50 витков тонкой проволоки, подвешена на упругой нити. При повороте рамки на  $1^\circ$  в нити возникает вращательный момент 9,8 мкН·м. Рамка помещена в магнитное поле, линии индукции которого параллельны ее плоскости.

При какой величине магнитной индукции рамка повернется на  $15^\circ$ , если по ней пущен ток  $1\text{ А}$ ?

**10.20.** Рамка гальванометра длиной  $4\text{ см}$  и шириной  $1,5\text{ см}$ , состоящая из  $200$  витков тонкой проволоки, помещена в магнитное поле с индукцией  $0,21\text{ Тл}$  параллельно силовым линиям. Какой вращательный момент действует на рамку при токе  $1\text{ мА}$ ?

**10.21.** Короткая катушка с площадью поперечного сечения  $150\text{ см}^2$ , состоящая из  $200$  витков, помещена в однородное магнитное поле напряженностью  $8\text{ кА/м}$ . Найти вращательный момент, действующий на катушку со стороны поля, если угол между ее осью и линиями индукции составляет  $60^\circ$ . Ток в катушке  $4\text{ А}$ .

**10.22.** Рамка гальванометра площадью  $1\text{ см}^2$ , состоящая из  $200$  витков, подвешена на упругой нити в магнитном поле с индукцией  $5\text{ мТл}$  параллельно силовым линиям. При токе в катушке  $2\text{ мкА}$  рамка повернулась на  $30^\circ$ . Найти постоянную кручения нити, т.е. отношение момента приложенных сил к углу поворота.

**10.23.** Из тонкой проволоки массой  $2\text{ г}$  изготовлена квадратная рамка, которая подвешена на неупругой нити в магнитном поле с индукцией  $2\text{ мТл}$ . Определить период малых колебаний рамки, если по ней пропустить ток  $6\text{ А}$ .

**10.24.** Тонкий проводник в виде кольца массой  $3\text{ г}$  свободно подвешен на неупругой нити в однородном магнитном поле. По кольцу течет ток  $2\text{ А}$ , период малых крутильных колебаний равен  $1,2\text{ с}$ . Найти индукцию магнитного поля.

**10.25.** На оси точечного диполя с магнитным моментом  $10\text{ мА}\cdot\text{м}^2$  на расстоянии  $50\text{ см}$  находится другой такой же диполь, магнитный момент которого перпендикулярен оси. Найти механический момент, действующий на второй диполь.

**10.26.** Небольшая магнитная стрелка совершает в магнитном поле Земли малые колебания с периодом  $1,33\text{ с}$ . Внутри соленоида с током период колебаний уменьшается до  $0,16\text{ с}$ . Найти магнитную индукцию внутри соленоида, если горизонтальная составляющая магнитного поля Земли равна  $18\text{ мкТл}$ .

**10.27.** Виток радиусом  $10\text{ см}$  может вращаться вокруг вертикальной оси, совпадающей с его диаметром. По витку, установленному в плоскости магнитного меридиана идет ток,  $10\text{ А}$ . Какой вращательный момент может удержать виток в начальном положении? Горизонтальная составляющая магнитного поля Земли  $20\text{ мкТл}$ .

**10.28.** Магнитное поле создано бесконечно длинным проводником с током 100 А. На расстоянии 10 см от него находится точечный диполь с магнитным моментом  $1 \text{ мА}\cdot\text{м}^2$ , ориентированным вдоль линий индукции. Найти силу, действующую на диполь.

**10.29.** Определить степень неоднородности магнитного поля, если максимальная сила, действующая на точечный диполь с магнитным моментом  $2 \text{ мА}\cdot\text{м}^2$ , равна 1 мН.

**10.30.** Проволочный виток радиусом 20 см расположен в плоскости магнитного меридиана. В центре витка установлен компас. Какой ток течет по витку, если магнитная стрелка отклонилась на угол  $9^\circ$ ? Горизонтальную составляющую магнитного поля принять равной 20 мкТл.

## 11. Механическая работа в магнитном поле. ЭДС индукции. Индуктивность

### *Теоретические сведения*

Магнитный поток, пронизывающий поверхность:

$$\Phi = \left( \vec{B} \vec{S} \right) = BS \cos \alpha = B_n S, \quad (11.1)$$

где  $\vec{S}$  – вектор, равный по модулю площади контура и направленный по нормали к ней;  $B_n$  – проекция вектора магнитной индукции на это направление;  $\alpha$  – угол между направлением магнитной индукции и нормалью.

В случае неоднородного поля

$$\Phi = \int_{(S)} B_n dS, \quad (11.2)$$

где интегрирование ведется по всей площади  $S$ .

Потокоцепление или полный магнитный поток, сцепленный со всеми витками соленоида или тороида в случае однородного поля:

$$\Psi = N \Phi, \quad (11.3)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток через один виток;  $N$  – число витков.

Магнитная индукция бесконечно длинного провода с током  $I$  на расстоянии  $b$  от него

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi b}. \quad (11.4)$$

Здесь и далее  $\mu$  – магнитная проницаемость среды,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ .

Магнитная индукция тороида или длинного соленоида в средней его части

$$B = \mu\mu_0 nI. \quad (11.5)$$

В этой и следующих формулах  $n$  – плотность намотки провода, т. е. количество витков, приходящихся на единицу длины катушки.

Потокосцепление контура

$$\Psi = LI, \quad (11.6)$$

где  $I$  – ток в контуре;  $L$  – его индуктивность.

Индуктивность соленоида или тороида с объемом  $V$ :

$$L = \mu\mu_0 n^2 V. \quad (11.7)$$

Работа по перемещению замкнутого контура с током в магнитном поле

$$A = I\Delta\Phi, \quad (11.8)$$

где  $\Delta\Phi$  – изменение магнитного потока, пронизывающего поверхность, ограниченную контуром с током  $I$ .

Закон электромагнитной индукции Фарадея

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt} = -N\frac{d\Phi}{dt}, \quad (11.9)$$

где  $\varepsilon_i$  – ЭДС индукции. Знак “–” в этой формуле нужно учитывать в том случае, когда имеет значение полярность этой ЭДС, т. е. она не является единственным источником в цепи.

Иногда нужно найти среднее значение ЭДС индукции. В таком случае формулы (11.9) следует переписать в виде

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Psi}{\Delta t} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (11.10)$$

На концах прямого проводника, движущегося с некоторой скоростью в магнитном поле и пересекающего линии магнитной индукции, скапливаются электрические заряды, т. е. возникает индуцированный электрический диполь. Напряжение на концах проводника длиной  $l$ , движущегося со скоростью  $v$  в магнитном поле с индукцией  $B$ , есть смешанное произведение этих векторов

$$U = \left( \vec{l} \left[ \vec{v} B \right] \right). \quad (11.11)$$

Вектор  $\vec{l}$  (плечо диполя) направлен от минуса к плюсу. Как правило, для вычисления этого напряжения можно пользоваться формулой

$$U = l\nu B \sin \alpha, \quad (11.12)$$

в которой  $\alpha$  – угол между двумя из этих трех векторов.

Электродвижущая сила индукции, возникающая в рамке, состоящей из  $N$  витков, при вращении с угловой скоростью  $\omega$  в однородном магнитном поле с индукцией  $B$

$$\varepsilon_i = BNS\omega \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (11.13)$$

где  $(\omega t + \varphi_0)$  – мгновенное значение угла между направлением вектора магнитной индукции и нормалью к рамке.

Электродвижущая сила самоиндукции, возникающая в замкнутом контуре при изменении силы тока в нем:

$$\varepsilon_i = -L \frac{dI}{dt}, \quad \text{или} \quad |\varepsilon_i| = L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (11.14)$$

Электрический заряд  $q$ , протекающий в контуре, при изменении связанного с ним потокосцепления  $\Delta\Psi$

$$q = \frac{\Delta\Psi}{R}, \quad (11.15)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление этого контура.

### *Задачи*

**11.1.** Участок прямого проводника длиной 80 см с током 4,5 А помещен в однородное магнитное поле с индукцией 50 мТл перпендикулярно к линиям индукции. Проводник переместился на 20 см под углом  $30^\circ$  к направлению линий индукции. Найти работу сил поля.

**11.2.** В однородном магнитном поле с индукцией 50 мТл проводник длиной 20 см с током 2 А движется со скоростью 30 см/с. Вектор скорости направлен перпендикулярно магнитной индукции и образует с осью проводника угол  $30^\circ$ . Какая мощность расходуется для такого перемещения проводника?

**11.3.** Плоскость квадратной рамки составляет угол  $20^\circ$  с линиями индукции магнитного поля. По рамке течет ток 20 А, сторона рамки 10 см, магнитная индукция 0,1 Тл. Какую работу нужно совершить, чтобы вывести рамку за пределы поля?

**11.4.** Виток диаметром 10 см с током 20 А свободно установился в однородном магнитном поле с индукцией 0,016 Тл. Какую работу нужно совершить, чтобы повернуть виток на  $90^\circ$  вокруг диаметра?

**11.5.** Рядом с длинным прямым проводом с током 4 А находится квадратная рамка с током 0,5 А. Рамка и провод лежат в одной плоскости. Расстояние от провода до ближней стороны 10 см, а длина стороны квадрата 4 см. Найти работу, которую нужно совершить при развороте рамки на угол  $180^\circ$  вокруг оси, лежащей в плоскости рамки и проходящей через ее центр.

**11.6.** Рядом с длинным прямым проводом с током 4 А находится квадратная рамка с током 0,5 А. Рамка и провод лежат в одной плоскости. Расстояние от провода до ближней стороны 10 см, а длина стороны квадрата 4 см. Найти работу, которую нужно совершить, чтобы сохраняя ориентацию рамки увеличить расстояние до ближней стороны до 24 см.

**11.7.** Магнитный поток, пронизывающий замкнутый контур, увеличивается за 10 мс до величины 0,12 Вб. Среднее значение ЭДС индукции при этом равно 10 В. Найти начальное значение магнитного потока.

**11.8.** Магнитный поток, пронизывающий замкнутый контур, уменьшается за 2 мс до величины 0,02 Вб. Среднее значение ЭДС индукции при этом равно 20 В. Найти начальное значение магнитного потока.

**11.9.** По витку радиусом 20 см течет ток 5 А. На оси витка параллельно ему расположена рамка площадью  $1 \text{ см}^2$ . Какая ЭДС индукции возникнет в рамке при ее перемещении вдоль оси со скоростью 0,2 м/с в тот момент, когда расстояние между центрами витка и рамки равно 10 см? Рамку считать точечным диполем.

**11.10.** Прямой проводник длиной 40 см движется со скоростью 5 м/с перпендикулярно магнитным силовым линиям. При этом напряжение на концах проводника равно 0,6 В. Найти индукцию магнитного поля.

**11.11.** В однородном магнитном поле с индукцией 1 Тл находится проводник длиной 20 см, ориентированный поперек поля. Концы проводника замкнуты за пределами поля на сопротивление 0,1 Ом. Какая мощность затрачивается для перемещения этого проводника со скоростью 2,5 м/с?

**11.12.** Рамка площадью  $200 \text{ см}^2$  вращается с частотой 10 Гц в магнитном поле с индукцией 0,2 Тл относительно оси, лежащей в плоскости рамки и перпендикулярной силовым линиям. Каково максимальное значение ЭДС индукции?

**11.13.** В однородном магнитном поле с индукцией 0,4 Тл с частотой 16 Гц вращается стержень длиной 10 см. Ось вращения параллельна линиям индукции, перпендикулярна стержню и проходит через его конец. Найти разность потенциалов на концах стержня.

**11.14.** Рамка площадью  $200 \text{ см}^2$  вращается с частотой  $10 \text{ Гц}$  в магнитном поле с индукцией  $0,2 \text{ Тл}$  относительно оси, лежащей в плоскости рамки и перпендикулярной силовым линиям. Каково среднее значение ЭДС индукции за время, в течение которого магнитный поток, пронизывающий рамку, меняется от нуля до максимального значения?

**11.15.** В однородном магнитном поле с индукцией  $0,35 \text{ Тл}$  вращается с частотой  $480 \text{ об/мин}$  рамка площадью  $50 \text{ см}^2$ , содержащая  $1500$  витков. Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции. Найти максимальную ЭДС индукции в рамке.

**11.16.** В однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции движется прямой проводник длиной  $40 \text{ см}$ . Найти силу Лоренца, действующую на свободный электрон в проводнике, если разность потенциалов между его концами  $10 \text{ мкВ}$ .

**11.17.** Короткая катушка радиусом  $10 \text{ см}$ , содержащая  $1000$  витков, вращается в магнитном поле с индукцией  $0,04 \text{ Тл}$  с угловой скоростью  $5 \text{ рад/с}$  относительно оси, совпадающей с диаметром и перпендикулярной силовым линиям. Определить мгновенное значение ЭДС индукции в тот момент, когда плоскость катушки составляет  $60^\circ$  с линиями индукции.

**11.18.** Проволочное кольцо радиусом  $0,1 \text{ м}$  и сопротивлением  $0,1 \text{ Ом}$  лежит на столе. Какой заряд протечет по кольцу, если его перевернуть с одной стороны на другую? Вертикальная составляющая магнитного поля Земли равна  $50 \text{ мкТл}$ .

**11.19.** На расстоянии  $1 \text{ м}$  от длинного прямого провода с током  $10 \text{ А}$  находится маленький виток радиусом  $1 \text{ см}$  и сопротивлением  $0,1 \text{ Ом}$ . Ориентация витка такова, что магнитный поток, его пронизывающий, максимален. Какой заряд протечет по витку, если направление тока в проводе изменить на противоположное? Виток считать точечным диполем.

**11.20.** Плоский проволочный изолированный контур сопротивлением  $10 \text{ Ом}$ , перпендикулярный силовым линиям магнитного поля с индукцией  $0,1 \text{ Тл}$ , имеет форму восьмерки с радиусами  $4$  и  $6 \text{ см}$ . Какой заряд протечет по контуру, если деформировать контур в окружность?

**11.21.** Рамка площадью  $100 \text{ см}^2$  из провода сопротивлением  $10 \text{ мОм}$  равномерно вращается в магнитном поле с индукцией  $50 \text{ мТл}$ . Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции. Какой заряд протечет через рамку при изменении ее угла поворота от  $30^\circ$  до  $60^\circ$ ?

**11.22.** В проволочное кольцо, присоединенной к баллистическому гальванометру, вставили прямой магнит. В цепи протек заряд  $10 \text{ мкКл}$ . Определить магнитный поток, пересекший кольцо, если полное сопротивление цепи гальванометра равно  $30 \text{ Ом}$ .

**11.23.** На расстоянии  $1 \text{ м}$  от длинного прямого провода с током  $10 \text{ А}$  находится маленький виток радиусом  $1 \text{ см}$  и сопротивлением  $0,1 \text{ Ом}$ . Ориентация витка такова, что магнитный поток, его пронизывающий, максимален. Какой заряд протечет по витку, если ток в проводе выключить? Виток считать точечным диполем.

**11.24.** Плоский проволочный изолированный контур сопротивлением  $10 \text{ Ом}$ , перпендикулярный силовым линиям магнитного поля с индукцией  $0,1 \text{ Тл}$ , имеет форму восьмерки с радиусами  $4$  и  $6 \text{ см}$ . Какой заряд протечет по контуру, если повернуть малое кольцо на  $180^\circ$ ?

**11.25.** Переменный ток с амплитудой  $10 \text{ А}$  и частотой  $50 \text{ Гц}$  протекает по катушке с индуктивностью  $2 \text{ мГн}$ . Чему равно среднее значение ЭДС самоиндукции, возникающей за время, в течение которого ток меняется от минимального до максимального значения?

**11.26.** Соленоид с индуктивностью  $4 \text{ мГн}$  содержит  $600$  витков. Чему равен магнитный поток при токе в обмотке  $12 \text{ А}$ ?

**11.27.** Рассчитать индуктивность соленоида, полученного при намотке провода длиной  $10 \text{ м}$  на цилиндрический железный сердечник длиной  $10 \text{ см}$ . Магнитная проницаемость железа равна  $400$ . Катушку следует считать длинной.

**11.28.** Определить индуктивность двухпроводной линии на участке длиной  $1 \text{ км}$ . Радиус провода равен  $1 \text{ мм}$ , а расстояние между осями проводов –  $0,4 \text{ м}$ . Следует учитывать лишь магнитный поток, пронизывающий контур, ограниченный проводами. Радиусы проводов считать малыми по сравнению с расстоянием между ними.

**11.29.** Две катушки расположены на небольшом расстоянии друг от друга. Когда сила тока в одной из них меняется со скоростью  $5 \text{ А/с}$ , во второй возникает ЭДС индукции  $0,1 \text{ В}$ . Найти коэффициент взаимной индукции катушек.

**11.30.** Обмотка тороида с немагнитным сердечником имеет  $251$  виток. Средний диаметр тороида  $8 \text{ см}$ , диаметр витков  $2 \text{ см}$ . На тороид намотана вторая обмотка со  $100$  витками. При подключении первой обмотки к источнику в ней в течение  $1 \text{ мс}$  установился ток  $3 \text{ А}$ . Найти среднее значение ЭДС индукции во второй обмотке.

# ОПТИКА

## 12. Отражение и преломление света

### Теоретические сведения

Показатель преломления среды

$$n = \frac{c}{v}, \quad (12.1)$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме;  $v$  – скорость света в среде.

Законы отражения и преломления света (рис. 9):

$$\alpha' = \alpha, \quad (12.2)$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (12.3)$$

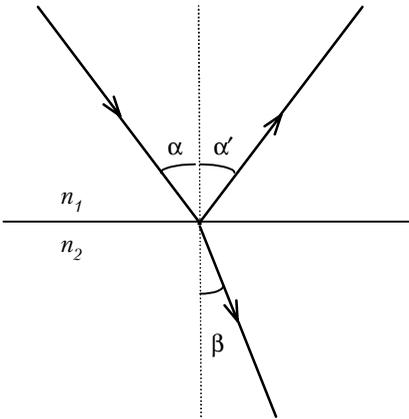


Рис. 9. Законы отражения и преломления света

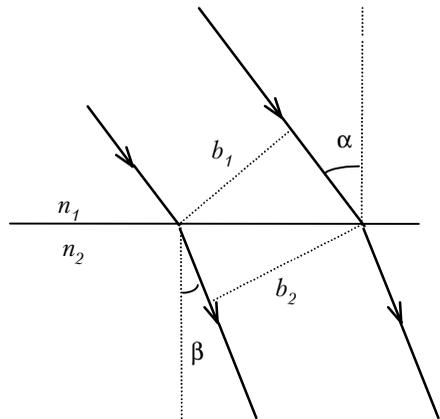


Рис. 10. Изменение сечения светового пучка

При преломлении волнового фронта изменяется сечение светового пучка (рис. 10):

$$\frac{b_1}{b_2} = \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}, \quad (12.4)$$

где  $b_1$  и  $b_2$  – поперечные сечения световых пучков.

В случае когда свет идет из оптически более плотной среды в менее плотную, условие (12.3) не может быть удовлетворено для углов  $\beta$ , больших предельного:

$$\beta_{\text{пр}} = \arcsin \frac{n_1}{n_2}, \quad (12.5)$$

при котором преломленный луч выходит параллельно границе раздела сред (рис. 11).

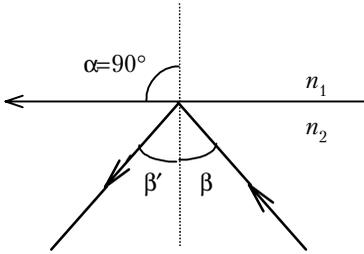


Рис. 11. Полное внутреннее отражение света

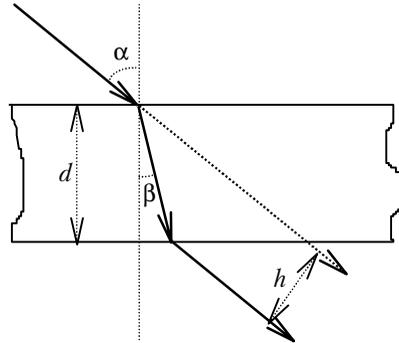


Рис. 12. Смещение луча в плоско-параллельной пластине

Луч света, прошедший сквозь плоскопараллельную пластину, смещается относительно своей первоначальной оси на величину  $h$  (рис. 11).

Для величин  $h$ ,  $d$  и углов  $\alpha$ ,  $\beta$  справедливо соотношение

$$\frac{h}{d} = \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}. \quad (12.6)$$

Луч света, прошедший треугольную равнобедренную призму, отклоняется от своего первоначального направления к ее основанию (рис. 13). Угол отклонения луча  $\delta$  складывается из двух углов  $\delta = \delta_1 + \delta_2$ . Этот угол минимален в том случае, когда в призме луч света идет параллельно основанию (рис. 14), т. е. выполняются условия:

$$\beta_1 = \beta_2 = \gamma/2, \quad \alpha_1 = \alpha_2 = \arcsin(n \sin \gamma/2). \quad (12.7)$$

При освещении круглого предмета диаметром  $D$  источником диаметром  $d$  на экране образуется тень  $H$  и полутень  $h$  (рис. 15).

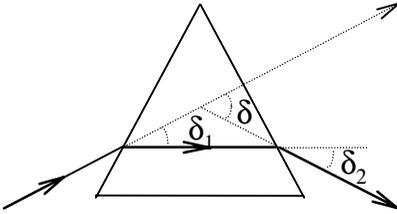


Рис. 13. Отклонение светового луча в призме

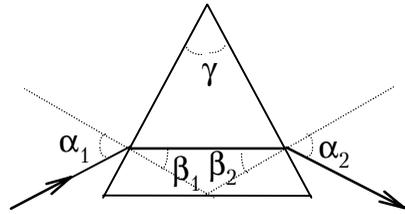


Рис. 14. Угол наименьшего отклонения луча

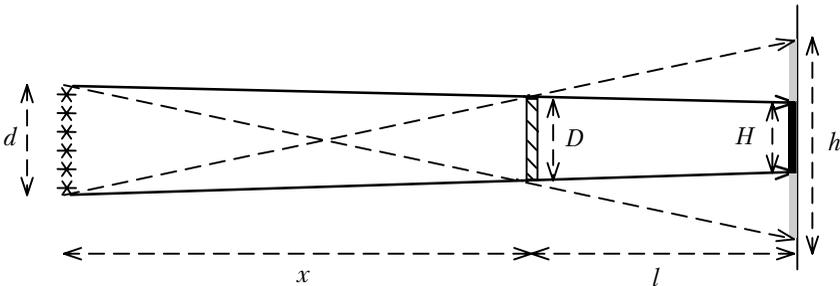


Рис. 15. Образование тени и полутени

### Задачи

12.1. Показать, что луч света, последовательно отразившийся от трех взаимно перпендикулярных зеркал, изменит свое направление на противоположное.

12.2. Луч света падает на плоскопараллельную стеклянную пластину толщиной 6 см под углом  $60^\circ$  к нормали. Найти величину смещения луча, прошедшего эту пластину.

12.3. Найти угол наименьшего отклонения луча света при прохождении стеклянной призмы с преломляющим углом  $60^\circ$ .

12.4. Показать, что в призме с малым углом при вершине  $\gamma$  луч света отклоняется от своего первоначального направления на угол  $\delta = (n-1)\gamma$ , независимо от угла падения, если последний тоже мал.

12.5. Найти угол наибольшего отклонения луча света при прохождении стеклянной призмы с преломляющим углом  $60^\circ$ .

12.6. Какой угол наименьшего отклонения дает трехгранная стеклянная призма с преломляющим углом  $60^\circ$  в воде?

**12.7.** Луч света, содержащий две монохроматические компоненты, падает под углом  $60^\circ$  на плоскопараллельную пластину толщиной 50 см. Найти расстояние между вышедшими из пластины компонентами, если показатели преломления для них равны 1,515 и 1,520.

**12.8.** На плоскопараллельную стеклянную пластину толщиной 1 см падает луч света под углом  $60^\circ$ . Часть света отражается от верхней, а часть – от нижней грани. Найти расстояние между соседними отраженными от пластины лучами.

**12.9.** Луч монохроматического света падает нормально на боковую поверхность стеклянной призмы с преломляющим углом  $40^\circ$ . Найти угол отклонения луча от своего первоначального направления.

**12.10.** Под каким углом луч монохроматического света падает на боковую поверхность стеклянной призмы с преломляющим углом  $30^\circ$ , если из призмы он выходит перпендикулярно другой грани.

**12.11.** Преломляющий угол стеклянной призмы равен  $10^\circ$ . Найти угол выхода луча из призмы, если угол падения на боковую грань равен  $10^\circ$ . Рассмотреть два возможных случая.

**12.12.** Луч монохроматического света падает нормально на боковую поверхность стеклянной призмы и испытывает полное внутреннее отражение от другой. При каком наименьшем преломляющем угле призмы это возможно?

**12.13.** Луч света падает под углом  $30^\circ$  на плоскопараллельную пластину с показателем преломления  $n = 1,5$  и выходит параллельно падающему лучу, сместившись на 1,95 см. Найти толщину пластины.

**12.14.** Высота Солнца над горизонтом  $20^\circ$ . При помощи плоского зеркала в пруд пускают зайчик. Под каким углом к горизонту следует расположить зеркало, чтобы под воду луч света вошел под углом  $60^\circ$  к ее поверхности. Найти два решения.

**12.15.** Человек смотрит на свое изображение в зеркале, лежащем на дне сосуда с водой. На какое расстояние аккомодирован глаз, если он находится на высоте 10 см над водой, а глубина воды 6 см?

**12.16.** Луч света падает на поверхность воды под углом  $45^\circ$ . Определить расстояние между точками входа и выхода луча из воды, если на глубине 1,5 м лежит плоское горизонтальное зеркало.

**12.17.** Свет Солнца на высоте  $60^\circ$  над горизонтом падает на ровно обрешанный торец горизонтального стекла толщиной 4 мм. Сколько отражений от обеих сторон совершит за 1 нс солнечный свет, оказавшийся в стекле?

**12.18.** В сосуде с водой на глубине 25 см находится точечный источник света. Над ним плавает непрозрачный круг. При каком наименьшем диаметре круга свет не выйдет из воды?

**12.19.** Длинное волокно из оптического материала с показателем преломления 1,36 используется как световод. Под каким максимальным углом к оси волокна свет может падать на его торец, чтобы пройти световод без ослабления?

**12.20.** Параллельный пучок света сечением  $16 \text{ см}^2$  входит в воду под углом  $45^\circ$  к нормали. Найти площадь сечения преломленного пучка.

**12.21.** Свет Солнца на высоте  $60^\circ$  над горизонтом падает на ровно обрезанный торец горизонтального стекла. Сколько отражений от обеих сторон совершит солнечный свет, прошедший вдоль стекла?

**12.22.** Параллельный пучок света падает нормально на основание стеклянного конуса высотой 3 см и радиусом основания 4 см. Под каким углом к оси свет выйдет из конуса?

**12.23.** При освещении диска радиусом 5 см на экране, находящемся от него на расстоянии 1,5 м получается тень радиусом 10 см и полутень радиусом 12,5 см. Найти радиус источника, если источник, диск и экран параллельны друг другу, и их центры лежат на одном перпендикуляре.

**12.24.** Диаметр фотосферы Солнца равен  $1,39 \cdot 10^6$  км, расстояние от Солнца до Земли  $150 \cdot 10^6$  км. Расстояние от поверхности Земли до центра Луны меняется в пределах от  $0,357 \cdot 10^6$  до  $0,399 \cdot 10^6$  км. Диаметр Луны равен 3480 км. При каких расстояниях от поверхности Земли до Луны затмение бывает полным, и при каких – кольцеобразным?

**12.25.** Параллельный пучок света падает нормально на одну из граней правильной треугольной стеклянной призмы и выходит из двух других. Найти угол между двумя вышедшими из призмы лучами.

**12.26.** При освещении диска радиусом 5 см на экране, находящемся от него на расстоянии 1,5 м получается тень радиусом 10 см и полутень радиусом 12,5 см. Найти расстояние от источника до диска, если источник, диск и экран параллельны друг другу, и их центры лежат на одном перпендикуляре.

**12.27.** Связать угол наименьшего отклонения луча в призме с преломляющим углом и показателем преломления призмы.

**12.28.** При каком угле падения луча света на стекло угол между отраженным и преломленным лучами окажется равным  $120^\circ$ ?

**12.29.** Параллельный пучок света падает в воде нормально на одну из граней правильной треугольной стеклянной призмы и выходит из двух других тоже в воде. Найти угол между двумя вышедшими лучами. Отраженные от границы в стекло лучи не рассматривать.

**12.30.** Предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло–жидкость равен  $65^\circ$ . Найти показатель преломления жидкости.

### 13. Интерференция света

#### *Теоретические сведения*

Скорость света в оптической среде

$$v = c/n, \quad (13.1)$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме;  $n$  – абсолютный показатель преломления среды.

Оптическая длина пути световой волны

$$L = n l, \quad (13.2)$$

где  $l$  – геометрическая длина пути световой волны в среде с показателем преломления  $n$ .

Оптическая разность хода двух световых волн

$$\Delta = L_2 - L_1. \quad (13.3)$$

Связь оптической разности хода двух световых волн с разностью фаз колебаний  $\Delta\phi$

$$\Delta = \lambda \frac{\Delta\phi}{2\pi}. \quad (13.4)$$

Оптическая разность хода световых волн, отраженных от двух граней тонкой пленки (рис. 16, *а*), и оптическая разность хода двух световых волн, прошедших тонкую пленку (рис. 16, *б*):

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \lambda/2; \quad (13.5) \quad \Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}; \quad (13.7)$$

или

или

$$\Delta = 2dn \cos \beta + \lambda/2; \quad (13.6) \quad \Delta = 2dn \cos \beta. \quad (13.8)$$

Слагаемое  $\lambda/2$  в этих формулах учитывает изменение фазы световой волны на  $\pi$  при ее отражении от оптически более плотной среды.

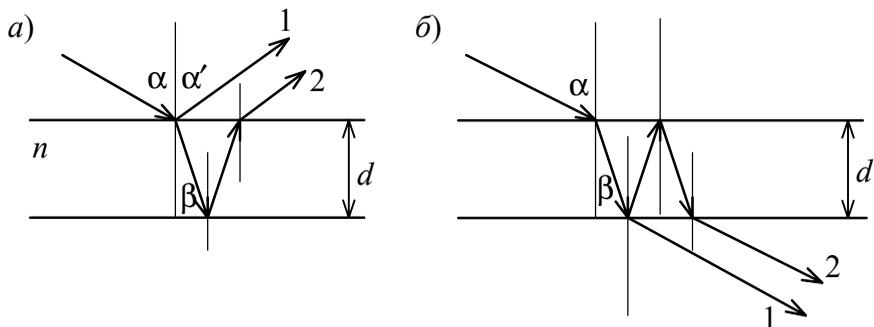


Рис. 16. Интерференция лучей, отраженных от пленки и прошедших через нее

Максимум интенсивности при интерференции двух световых лучей наблюдается при условии

$$\Delta = k\lambda, \text{ где } k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (13.9)$$

Минимум интенсивности при интерференции двух световых лучей наблюдается при условии

$$\Delta = (k + \frac{1}{2})\lambda, \text{ где } k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (13.10)$$

Радиусы светлых колец Ньютона в отраженном свете и темных – в проходящем

$$r_k = \sqrt{(k - \frac{1}{2})R\lambda}. \quad (13.11)$$

Радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете и светлых – в проходящем

$$r_k = \sqrt{kR\lambda}. \quad (13.12)$$

В этих формулах  $k = 1, 2, 3 \dots$  – номер кольца;  $R$  – радиус кривизны поверхности линзы.

### Задачи

**13.1.** На каком пути в вакууме укладывается столько же длин волн, сколько их укладывается на отрезке 3 см в воде?

**13.2.** Какой путь пройдет фронт волны монохроматического света в вакууме за то же время, за которое он проходит путь 1 м в воде?

**13.3.** На пути монохроматического света с длиной волны 0,6 мкм помещена плоскопараллельная стеклянная пластинка толщиной 0,1 мм. Свет падает на нее нормально. На какой угол следует повернуть пластину, чтобы оптическая длина пути изменилась на половину длины волны?

**13.4.** Найти все длины волн в диапазоне видимого света (от 0,38 до 0,76 мкм), которые будут: 1) максимально усилены; 2) максимально ослаблены при оптической разности хода интерферирующих лучей равной 1,8 мкм.

**13.5.** Расстояние между двумя когерентными источниками света с длиной волны 0,5 мкм равно 0,1 мм. Расстояние между интерференционными полосами в средней части экрана равно 1 см. Найти расстояние от источников до экрана.

**13.6.** Расстояние между двумя щелями в опыте Юнга равно 1 мм, расстояние от щелей до экрана 3 м. Определить длину волны света, если ширина полос интерференции на экране равна 1,5 мм.

**13.7.** В опыте Юнга расстояние между щелями 0,8 мм. На каком расстоянии от щелей следует поставить экран, чтобы ширина интерференционной полосы оказалась 2 мм? Длина волны 0,5 мкм.

**13.8.** В опыте с зеркалами Френеля расстояние между мнимыми изображениями источника света равно 0,5 мм, расстояние от них до экрана равно 3 м. Длина волны света 0,6 мкм. Определить ширину полос интерференции на экране.

**13.9.** Пучок монохроматического света с длиной волны 0,6 мкм падает под углом  $30^\circ$  на мыльную пленку. При какой наименьшей толщине пленки отраженный от нее свет будет максимально усилен интерференцией?

**13.10.** На тонкий стеклянный клин по нормали к его поверхности падает монохроматический свет с длиной волны 0,6 мкм. Определить преломляющий угол клина, если расстояние между смежными интерференционными максимумами в прошедшем свете равно 4 мм.

**13.11.** На мыльную пленку нормально падает пучок лучей белого света. При какой наименьшей толщине пленки отраженный свет с длиной волны 0,55 мкм окажется максимально усиленным в результате интерференции?

**13.12.** Пучок монохроматического света с длиной волны 0,6 мкм падает под углом  $30^\circ$  на мыльную пленку. При какой наименьшей толщине пленки отраженный от нее свет будет максимально ослаблен интерференцией?

**13.13.** На тонкий стеклянный клин по нормали к его поверхности падает монохроматический свет с длиной волны 0,6 мкм. Определить

преломляющий угол клина, если расстояние между смежными интерференционными минимумами в отраженном свете равно 4 мм.

**13.14.** Между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинками вдоль линии их соприкосновения на расстоянии 75 мм от нее положили очень тонкую проволочку. Определить ее диаметр, если на расстоянии 30 мм наблюдается 16 интерференционных полос. Длина волны 0,5 мкм.

**13.15.** Между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинками образовался воздушный клин с углом  $30''$ . На одну из пластин нормально падает монохроматический свет с длиной волны 0,6 мкм. Найти расстояние между интерференционными полосами.

**13.16.** Две плоскопараллельные стеклянные пластинки образуют клин с углом  $30''$ . Пространство между пластинками заполнено глицерином с показателем преломления, равным 1,47. На клин нормально к его поверхности падает пучок монохроматического света с длиной волны 0,6 мкм. Какое число интерференционных полос приходится на 1 см длины клина в отраженном свете?

**13.17.** На поверхности стекла находится пленка воды. На нее под углом  $30^\circ$  к нормали падает свет с длиной волны 0,68 мкм. Найти скорость, с которой вследствие испарения уменьшается толщина пленки, если за 15 мин интерференционная картина смещается на одну полосу.

**13.18.** На мыльную пленку под углом  $52^\circ$  к нормали падает пучок белого света. При какой наименьшей толщине пленки отраженный пучок в результате интерференции будет окрашен в желтый цвет с длиной волны 0,60 мкм?

**13.19.** Плосковыпуклая линза своей выпуклой стороной лежит на стеклянной пластине. Определить толщину воздушного клина там, где в отраженном свете с длиной волны 0,6 мкм наблюдается первое светлое кольцо Ньютона.

**13.20.** Диаметры двух светлых колец Ньютона в отраженном свете соответственно равны 4,0 и 4,8 мм. Порядковые номера колец не определялись, но известно, что между ними лежат еще три светлых кольца. Найти радиус кривизны использованной линзы, если длина волны света равна 500 нм.

**13.21.** На экране наблюдается интерференционная картина от двух когерентных источников света с длиной волны 0,48 мкм. Когда на пути одного пучка поместили тонкую пластину плавленого кварца, интер-

ференционная картина сместилась на 69 полос. Найти толщину кварцевой пластины.

**13.22.** В интерферометре Жамена находятся две одинаковые откачанные трубки длиной 10 см. После наполнения одной из них водородом интерференционная картина сместилась на 23,7 полосы. Найти показатель преломления водорода. Длина волны света 590 нм.

**13.23.** В интерферометр Жамена были помещены две одинаковые наполненные воздухом трубки длиной 15 см. Показатель преломления воздуха равен 1,000292. Когда в одной из трубок воздух заменили ацетиленом, интерференционная картина сместилась на 80 полос. Найти показатель преломления ацетилена. Длина волны света 590 нм.

**13.24.** Определить перемещение зеркала в интерферометре Майкельсона, если интерференционная картина сместилась на 100 полос. Опыт проводился со светом с длиной волны 546 нм.

**13.25.** Для измерения показателя преломления аргона в одно из плеч интерферометра Майкельсона поместили пустую стеклянную трубку длиной 12 см. При наполнении этой трубки аргоном интерференционная картина сместилась на 106 полос. Найти показатель преломления аргона, если длина волны света равна 639 нм.

**13.26.** В одно из плеч интерферометра Майкельсона поместили стеклянную трубку длиной 10 см, заполненную хлористым водородом. После замены хлористого водорода бромистым водородом произошло смещение интерференционной картины на 42 полосы. Определить разность показателей преломления бромистого и хлористого водорода, если длина волны света равна 590 нм.

**13.27.** В двухлучевом интерферометре используется желтая линия ртути, состоящая из двух компонент с длинами волн 576,97 и 579,03 нм. В каком наименьшем порядке интерференции четкость картины будет наилучшей?

**13.28.** В интерферометре Жамена используется желтая линия натрия, состоящая из двух компонент с длинами волн 589,0 и 589,6 нм. В каких трех наименьших порядках интерференции наблюдается картина с наилучшей четкостью?

**13.29.** На стеклянную пластинку положена выпуклой стороной плосковыпуклая линза. Радиус 5-го светлого кольца Ньютона в отраженном свете равен 5 мм. Найти радиус 3-го светлого кольца.

**13.30.** Во сколько раз возрастет радиус  $m$ -го кольца Ньютона при увеличении длины световой волны в 1,5 раза?

## 14. Дифракция света

### Теоретические сведения

Для сферической волны справедливо соотношение

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{k\lambda}{R_k^2} = \frac{1}{F}, \quad (14.1)$$

где  $\lambda$  – длина волны света;  $k$  – номер зоны Френеля;  $R_k$  – радиус  $k$ -й зоны Френеля;  $d$  – расстояние от точечного источника до зонной пластинки Френеля;  $f$  – расстояние от этой пластинки до приемника;  $F$  – фокусное расстояние зонной пластинки.

Дифракция света на щели при нормальном падении лучей:

$$\text{условие минимума} \quad b \sin \varphi = k\lambda; \quad (14.2)$$

$$\text{условие максимума} \quad b \sin \varphi = (k+0,5)\lambda, \quad (14.3)$$

где  $b$  – ширина щели;  $\varphi$  – угол дифракции;  $k = 1, 2, 3 \dots$  – порядок дифракции или номер минимума (максимума),  $\lambda$  – длина волны света.

При дифракции света на дифракционной решетке при нормальном падении лучей условие главных максимумов

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad (14.4)$$

где  $d$  – период решетки;  $\varphi$  – угол дифракции;  $\lambda$  – длина волны света;  $k = 0, 1, 2, 3 \dots$  – порядок дифракции.

Разрешающей способностью  $R$  называется отношение длины волны  $\lambda$  спектральной линии к минимальной разности длин волн двух соседних спектральных линий –  $\delta\lambda$ , которые наблюдаются раздельно:

$$R = \lambda / \delta\lambda. \quad (14.5)$$

Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = kN, \quad (14.6)$$

где  $k$  – порядок дифракции;  $N$  – полное число ее освещенных штрихов.

Угловой дисперсией называется отношение угла  $\delta\varphi$ , на который разведены две спектральные линии, к разности длин волн  $\delta\lambda$  этих линий

$$D_\varphi = \frac{\delta\varphi}{\delta\lambda}. \quad (14.7)$$

Угловая дисперсия дифракционной решетки

$$D_\varphi = \frac{k}{d \cos \varphi}, \quad (14.8)$$

или для малых углов дифракции

$$D_{\varphi} = k/d. \quad (14.9)$$

Линейной дисперсией называется отношение расстояния  $\delta l$ , на которое разведены две близкие спектральные линии на экране, к разности длин волн  $\delta\lambda$  этих линий

$$D_l = \frac{dl}{d\lambda}. \quad (14.10)$$

Линейная дисперсия связана с угловой соотношением

$$D_l = D_{\varphi} F, \quad (14.11)$$

где  $F$  – фокусное расстояние объектива, создающего на экране изображение.

Формула Брэггов–Вульфа

$$2d\sin\theta = k\lambda, \quad (14.12)$$

где  $d$  – расстояние между атомными плоскостями в кристалле;  $\theta$  – угол скольжения.

Разрешающая сила объектива телескопа

$$R = \frac{1}{\beta} = \frac{D}{1,22\lambda}, \quad (14.13)$$

где  $\beta$  – минимальное угловое расстояние между двумя светлыми точками при котором их изображения еще можно наблюдать отдельно;  $D$  – диаметр объектива телескопа;  $\lambda$  – длина волны света.

### *Задачи*

**14.1.** Вычислить радиус пятой зоны Френеля для плоского волнового фронта с длиной волны 0,5 мкм, если построение делается для точки, находящейся на расстоянии 1 м от фронта волны.

**14.2.** Радиус четвертой зоны Френеля для плоского волнового фронта равен 3 мм. Определить радиус шестой зоны Френеля.

**14.3.** На диафрагму с круглым отверстием диаметром 4 мм падает нормально параллельный пучок лучей монохроматического света с длиной волны 0,5 мкм. Точка наблюдения находится на расстоянии 1 м. Сколько зон Френеля укладывается в отверстии?

**14.4.** Плоская световая волна длиной 0,5 мкм падает нормально на диафрагму с круглым отверстием диаметром 1 см. На каком расстоянии

от отверстия должна находиться точка наблюдения, чтобы отверстие открывало две зоны Френеля?

**14.5.** Плоская световая волна длиной 0,7 мкм падает нормально на диафрагму с круглым отверстием радиусом 1,4 мм. Определить расстояния от диафрагмы до трех наиболее удаленных от нее точек, в которых наблюдается минимум интенсивности.

**14.6.** Точечный источник света с длиной волны 0,5 мкм расположен в 1 м перед диафрагмой с круглым отверстием радиуса 1 мм. Найти расстояние от диафрагмы до точки наблюдения, для которой число зон Френеля в отверстии составляет 3.

**14.7.** Свет с длиной волны 0,6 мкм падает нормально на поверхность стеклянного диска, который перекрывает полторы зоны Френеля для некоторой точки. При какой наименьшей толщине стекла интенсивность света в выбранной точке будет максимальной?

**14.8.** На пути плоской световой волны с длиной 0,54 мкм поставлена тонкая собирающая линза с фокусным расстоянием 50 см, непосредственно за ней – диафрагма, и на расстоянии 75 см от диафрагмы – экран. При каком максимальном радиусе отверстия центр дифракционной картины на экране максимально освещен?

**14.9.** Точечный источник монохроматического света расположен перед зонной пластинкой на расстоянии 1,5 м от нее. Изображение источника образуется на расстоянии 1 м от пластинки. Найти фокусное расстояние зонной пластинки.

**14.10.** На щель шириной 0,021 мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны 0,63 мкм. Сколько дифракционных минимумов можно наблюдать на экране за этой щелью?

**14.11.** На щель шириной 0,05 мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны 0,6 мкм. Найти угол отклонения света на четвертую темную дифракционную полосу.

**14.12.** Сколько штрихов на миллиметр содержит дифракционная решетка, если при нормальном падении на нее монохроматического света с длиной волны 0,6 мкм максимум пятого порядка наблюдается под углом  $18^\circ$ ?

**14.13.** На дифракционную решетку, содержащую 100 штрихов на миллиметр, падает нормально монохроматический свет. Зрительная труба наведена на максимум третьего порядка. Чтобы навести трубу на другой максимум того же порядка, ее нужно повернуть на  $20^\circ$ . Найти длину волны света.

**14.14.** Дифракционная решетка освещена нормально падающим монохроматическим светом. Максимум второго порядка наблюдается под углом  $14^\circ$ . Под каким углом наблюдается максимум третьего порядка?

**14.15.** Дифракционная решетка содержит 200 штрихов на миллиметр. На нее нормально падает монохроматический свет с длиной волны  $0,6$  мкм. Максимум какого наибольшего порядка дает эта решетка?

**14.16.** Дифракционная решетка содержит 200 штрихов на миллиметр. На нее нормально падает монохроматический свет с длиной волны  $0,6$  мкм. Найти общее число дифракционных максимумов в спектре этой дифракционной решетки.

**14.17.** При освещении дифракционной решетки белым светом спектры второго и третьего порядков отчасти перекрываются. На какую длину волны в спектре второго порядка накладывается фиолетовая линия с длиной волны  $0,4$  мкм в спектре третьего порядка?

**14.18.** На дифракционную решетку с периодом  $10$  мкм под углом  $30^\circ$  падает монохроматический свет с длиной волны  $600$  нм. Найти угол дифракции для второго главного максимума.

**14.19.** Какой наименьшей разрешающей силой должна обладать дифракционная решетка, чтобы с ее помощью можно было разрешить две спектральные линии калия с длинами волн  $578$  и  $580$  нм? Каким должно быть число штрихов, чтобы это разрешение было возможным в спектре второго порядка?

**14.20.** С помощью дифракционной решетки с периодом  $20$  мкм требуется разрешить дублет натрия с длинами волн  $589,0$  и  $589,6$  нм в спектре второго порядка. При какой минимальной длине решетки это возможно?

**14.21.** Угловая дисперсия дифракционной решетки при малых углах дифракции составляет  $5$  мин/нм. Определить разрешающую силу решетки, если ее длина равна  $2$  см.

**14.22.** Определить угловую дисперсию дифракционной решетки для длины волны  $600$  нм при угле дифракции  $30^\circ$ . Ответ дать в угловых минутах на нанометр.

**14.23.** На дифракционную решетку, содержащую  $500$  штрихов на миллиметр, нормально падает монохроматический свет с длиной волны  $700$  нм. За решеткой помещена собирающая линза с фокусным расстоянием  $50$  см, в фокальной плоскости которой расположен экран. На экране наблюдается спектр второго порядка. Найти линейную дисперсию этой системы в миллиметрах на нанометр.

**14.24.** На поверхность дифракционной решетки нормально падает пучок света. За решеткой помещена собирающая линза с оптической силой 1 дптр, в фокальной плоскости которой расположен экран. Найти число штрихов на миллиметр этой решетки, если при малых углах дифракции линейная дисперсия равна 1 мм/нм.

**14.25.** На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет с длиной волны 650 нм. За решеткой помещена собирающая линза с экраном в фокальной плоскости. На экране под углом  $30^\circ$  наблюдается дифракционная картина. При каком фокусном расстоянии линзы линейная дисперсия равна 0,5 мм/нм?

**14.26.** На каком расстоянии друг от друг будут находиться на экране две линии ртутной дуги с длинами волн 577 и 579,1 нм в спектре первого порядка, полученном при помощи дифракционной решетки с периодом 2 мкм и линзы с фокусным расстоянием 0,6 м?

**14.27.** Какое фокусное расстояние должна иметь линза, проецирующая на экран спектр, полученный при помощи дифракционной решетки с периодом 2 мкм, чтобы расстояние между линиями калия 404,4 и 404,7 нм в спектре первого порядка было равным 0,1 мм?

**14.28.** Для какой длины волны дифракционная решетка с периодом 5 мкм имеет угловую дисперсию  $6,3 \cdot 10^5$  рад/м в спектре третьего порядка?

**14.29.** Угловая дисперсия дифракционной решетки в спектре первого порядка для длины волны 668 нм равна  $2,02 \cdot 10^5$  рад/м. Найти период дифракционной решетки.

**14.30.** Период дифракционной решетки равен 2,5 мкм. Найти угловую дисперсию в спектре первого порядка для длины волны 589 нм.

## 15. Поляризация света

### *Теоретические сведения*

Закон Малюса

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (15.1)$$

где  $I_0$  – интенсивность света, падающего на анализатор;  $I$  – интенсивность света, прошедшего анализатор;  $\alpha$  – угол между плоскостью пропускания поляризатора и плоскостью поляризации световой волны. Эта формула описывает пропускание идеального поляризатора. Реальный поляризатор имеет собственный коэффициент поглощения  $\gamma$  и создает частично поляризованный свет.

Пропускание поглощающего поляризатора

$$I = I_0 (1 - \gamma) \cos^2 \alpha. \quad (15.2)$$

Степень поляризации света

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (15.3)$$

где  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  – максимальная и минимальная интенсивности в частично поляризованном свете.

Угол  $\varphi$  поворота плоскости поляризации оптически активными веществами на пути  $d$  света в среде:

в твердых телах

$$\varphi = \alpha d, \quad (15.4)$$

где  $\alpha$  – постоянная вращения;

в чистых жидкостях

$$\varphi = \gamma \rho d, \quad (15.5)$$

где  $\gamma$  – постоянная вращения;  $\rho$  – плотность жидкости;

в растворах

$$\varphi = \sigma C d, \quad (15.6)$$

где  $\sigma$  – постоянная вращения;  $C$  – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе;

в магнитном поле (эффект Фарадея)

$$\varphi = V B d, \quad (15.7)$$

где  $V$  – постоянная Верде;  $B$  – индукция магнитного поля.

Формулы Френеля определяют коэффициенты отражения  $R$  и пропускания  $T$  поляризованного света от границы двух сред. Для света, поляризованного в плоскости падения:

$$R_{\parallel} = \left( \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)} \right)^2, \quad (15.8)$$

$$T_{\parallel} = \frac{n_2}{n_1} \left( \frac{4 \sin \alpha \cos \beta}{\sin 2\alpha + \sin 2\beta} \right)^2. \quad (15.9)$$

Для света, поляризованного перпендикулярно плоскости падения:

$$R_{\perp} = \left( \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \right)^2, \quad (15.10)$$

$$T_{\perp} = \frac{n_2}{n_1} \left( \frac{2 \cos \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \right)^2. \quad (15.11)$$

В этих формулах  $\alpha$  – угол падения;  $\beta$  – угол преломления,  $n_1$  и  $n_2$  – коэффициенты преломления первой и второй сред.

Для коэффициентов отражения и пропускания справедливы следующие соотношения:

$$R_{\parallel} + \frac{n_2}{n_1} T_{\parallel} = 1, \quad (15.12)$$

$$R_{\perp} + \frac{n_2}{n_1} T_{\perp} = 1. \quad (15.13)$$

Угол Брюстера  $\alpha_B$  – это угол падения, при котором отраженный луч перпендикулярен преломленному, т. е.  $\alpha + \beta = 90^\circ$ .

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{n_2}{n_1}. \quad (15.14)$$

### *Задачи*

**15.1.** Пучок естественного света, идущий в воде, отражается от грани алмаза, погруженного в воду. При каком угле падения отраженный свет полностью поляризован?

**15.2.** Параллельный пучок естественного света рассеивается стеклянным конусом, ось которого направлена вдоль пучка. Найти угол рассеяния света, если отраженный свет полностью поляризован.

**15.3.** Анализатор в два раза уменьшает интенсивность света, приходящего к нему от поляризатора. Определить угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора.

**15.4.** Угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора равен  $45^\circ$ . Во сколько раз уменьшится интенсивность света, выходящего из анализатора, если угол увеличить до  $60^\circ$ ?

**15.5.** Во сколько раз ослабляется интенсивность света, проходящего через два поляризатора, плоскости пропускания которых образуют  $30^\circ$ , если в каждом из них теряется по 10% интенсивности падающего на него света?

**15.6.** Имеются два одинаковых несовершенных поляризатора, каждый из которых обуславливает степень поляризации 0,8. Какую максимальную степень поляризации могут обеспечить два эти поляризатора, установленные последовательно друг за другом?

**15.7.** В частично поляризованном свете амплитуда светового вектора, соответствующая максимальной интенсивности света, в 2 раза больше амплитуды, соответствующей минимальной интенсивности. Определить степень поляризации света.

**15.8.** Степень поляризации частично поляризованного света равна 0,5. Во сколько раз максимальная интенсивность света, проходящего через анализатор, больше минимальной?

**15.9.** На пути частично поляризованного света со степенью поляризации 0,6 поставили анализатор таким образом, чтобы он пропускал максимальную интенсивность света. Во сколько раз уменьшится интенсивность прошедшего через анализатор света, если его плоскость пропускания повернуть на  $30^\circ$ ?

**15.10.** На поляризатор падает пучок частично поляризованного света таким образом, что его пропускание минимально. После поворота плоскости поляризатора на  $45^\circ$  интенсивность прошедшего света возросла в 1,5 раза. Найти степень поляризации света.

**15.11.** Пластина кристаллического кварца толщиной 2 мм, вырезанная перпендикулярно оптической оси, поворачивает плоскость поляризации света на  $53^\circ$ . Какой минимальной толщины пластину нужно поместить между поляризаторами с параллельными плоскостями пропускания, чтобы они полностью задерживали свет?

**15.12.** Чистый никотин в стеклянной трубке длиной 8 см поворачивает плоскость поляризации желтого света на угол  $137^\circ$ . Плотность никотина  $1010 \text{ кг/м}^3$ . Определить удельное вращение никотина.

**15.13.** Раствор глюкозы с массовой концентрацией  $280 \text{ кг/м}^3$ , содержащийся в стеклянной трубке, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света на  $32^\circ$ . Определить массовую концентрацию глюкозы в другом растворе, налитом в ту же трубку, если он поворачивает плоскость поляризации света на  $24^\circ$ .

**15.14.** Угол поворота плоскости поляризации желтого света при прохождении через трубку с раствором сахара равен  $40^\circ$ . Длина трубки 15 см. Удельное вращение сахара равно  $0,0117 \text{ (рад}\cdot\text{м}^2\text{)/кг}$ . Определить массовую концентрацию сахара в растворе.

**15.15.** Найти угол полной поляризации при отражении света от стекла, показатель преломления которого равен 1,57.

**15.16.** При падении естественного света на некоторый поляризатор, сквозь него проходит 30% светового потока, через два таких поляризатора 13,5%. Найти угол между плоскостями пропускания этих поляризаторов.

**15.17.** Пучок естественного света падает на систему из шести поляризаторов, плоскость пропускания каждого из которых повернута на  $30^\circ$  относительно плоскости пропускания предыдущего. Какая доля светового потока проходит через эту систему?

**15.18.** Естественный свет падает на систему трех одинаковых поляризаторов. Плоскость пропускания среднего поляризатора составляет  $60^\circ$  с плоскостями пропускания двух других. Каждый из поляризаторов пропускает не больше 81% падающего на него поляризованного света. Сколько процентов света пропустит вся система?

**15.19.** На пути частично поляризованного света помещен поляризатор в положении, пропускающем максимальное количество света. При его повороте на  $60^\circ$  интенсивность прошедшего света уменьшилась в три раза. Найти степень поляризации падающего света.

**15.20.** Естественный свет падает под углом Брюстера на поверхность стекла. Определить с помощью формул Френеля коэффициент отражения.

**15.21.** Пучок естественного света падает под углом Брюстера на поверхность воды. Коэффициент отражения равен 0,039. Найти коэффициент пропускания.

**15.22.** На поверхность воды под углом Брюстера падает пучок поляризованного света. Плоскость колебания светового вектора составляет  $45^\circ$  с плоскостью падения. Найти коэффициент отражения.

**15.23.** Определить с помощью формул Френеля коэффициент отражения естественного света при нормальном падении на поверхность стекла.

**15.24.** На поверхность стекла падает пучок естественного света. Угол падения равен  $45^\circ$ . Найти с помощью формул Френеля степень поляризации отраженного света.

**15.25.** На поверхность стекла падает пучок естественного света. Угол падения равен  $45^\circ$ . Найти с помощью формул Френеля степень поляризации преломленного света.

**15.26.** Монохроматический неполяризованный свет падает на систему двух скрещенных поляризаторов с кварцевой пластиной между ними. Найти минимальную толщину пластины, при которой эта система будет пропускать 30% светового потока. Постоянная вращения кварца равна 17 град/мм.

**15.27.** Во сколько раз ослабляется интенсивность естественного света проходящего через два поляризатора, плоскости пропускания которых образуют угол  $60^\circ$ , если в каждом из них теряется не менее 15% падающего света?

**15.28.** Предельный угол полного внутреннего отражения пучка света на границе жидкости с воздухом равен  $43^\circ$ . Определить угол Брюстера для падения луча из воздуха на поверхность этой жидкости.

**15.29.** На пути частично поляризованного света со степенью поляризации, равной 0,5, поставлен анализатор. Найти максимальный и минимальный коэффициент пропускания этого анализатора.

**15.30.** Между двумя скрещенными поляризаторами поставили третий под углом  $\alpha$ . При каком угле  $\alpha$  коэффициент пропускания такой системы максимален и при каком – минимален?

### ***Показатели преломления***

Стекло .....	1,5
Плавленный кварц .....	1,46
Вода .....	1,33
Мыльная пленка .....	1,3
Алмаз .....	2,42

*Примечание:* указанные значения следует рассматривать как условные и использовать только в случае, когда в условии задачи показатель преломления не задан.

### ***Значения физических постоянных***

Электрическая постоянная .....	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная .....	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-12}$ Ф/м

Скорость света в вакууме .....

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Элементарный заряд .....	$e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Заряд $\alpha$ -частицы .....	$q_\alpha = 2e = 3,2 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса электрона .....	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса протона .....	$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса $\alpha$ -частицы .....	$m_\alpha = 6,64 \cdot 10^{-27}$ кг

## ОТВЕТЫ

**1.1.** 4,2 нКл **1.2.** 2 **1.3.** 287 мН **1.4.** 0,076 мм **1.5.** -0,58 нКл **1.6.** 54 мН  
**1.7.** 8,3 см **1.8.** 140 нКл, 20 нКл **1.9.** 8,3 см **1.10.** 2,25 Мм/с **1.11.** -0,287 нКл  
**1.12.** 4,5 Н **1.13.** 161 мкН **1.14.** 583 нКл или 17 нКл **1.15.** 100 кВ/м  
**1.16.** 6 кВ/м **1.17.** 535 В/м **1.18.** 8,3 см **1.19.** 2 см **1.20.**  $64^{\circ}24'$  **1.21.**  $64^{\circ}24'$   
**1.22.**  $76^{\circ}54'$  **1.23.** 4 см **1.24.** - **1.25.** 100 В/м **1.26.** - **1.27.** 113 В/м, 226 В/м  
**1.28.** 56,5 мН **1.29.** 3,6 мН/м **1.30.** 47,6 кВ/м

**2.1.** 45 В **2.2.** 26,4 кВ **2.3.** 90 мкДж **2.4.** -63 мкДж **2.5.** 48,8 мкДж  
**2.6.** 4 см и 12 см **2.7.** 505 В **2.8.** 36,5 В **2.9.** 125 В **2.10.** 56,6 В **2.11.** 360 В  
**2.12.** 150 В, 90 В, 9В **2.13.** 84 В **2.14.** 200 В **2.15.** 150 В **2.16.** 1,1 В  
**2.17.** 141 В **2.18.** 170 В **2.19.** 77 В **2.20.** 432 В **2.21.** 1,2 кВ **2.22.** 28,26 В  
**2.23.** 250 В **2.24.** 200 В/м **2.25.** 540 Дж **2.26.** 25,2 мкДж **2.27.** 47 мкДж  
**2.28.** 31,2 мДж **2.29.** 300 кВ **2.30.** 100 В

**3.1.** 0,8 мкКл·м **3.2.** 2,82 мкКл·м В **3.3.** 0,9 нКл·м **3.4.** 9,35 В/м  
**3.5.** 59,5 В **3.6.** 1,892 Рад ( $108^{\circ}24'$ ) **3.7.** 3 мкДж **3.8.** 0,9 Дж **3.9.** 60 мкДж  
**3.10.** 36 В/м **3.11.** 18 В/м **3.12.** 9 В/м **3.13.** 27 В/м **3.14.** 9 В/м **3.15.** 27 В/м  
**3.16.** 27 В/м **3.17.** 27 В/м **3.18.** 4 мДж **3.19.** 4,5 мДж **3.20.** 4,5 Дж **3.21.** 9 В  
**3.22.** 2,12 В **3.23.** 2,83 В **3.24.** 4 Н **3.25.** 8 Н **3.26.** 0,314 с **3.27.** 0,7854 ( $\pi/4$ ) нс  
**3.28.**  $2,1 \cdot 10^{-16}$  Н **3.29.** 1,35 мкН **3.30.**  $\varphi = A \sin(\omega t)$ , где  $A = 90$  В.

**4.1.** 1,76 см **4.2.** 2,19 м/с **4.3.** 24,3 МКл/кг **4.4.** 5,19 мм **4.5.** 1 см  
**4.6.** 2,24 Мм/с **4.7.** 2,13 мм **4.8.** 0, 24 Мм/с **4.9.** 23,3 В **4.10.** 4,07 Мм/с  
**4.11.** 3,7 мкКл/м **4.12.** 29,7 Мм/с **4.13.** 5,9 мм **4.14.** 79,6 В **4.15.** 22,5 В  
**4.16.**  $8 \cdot 10^{-19}$  Кл **4.17.**  $4,1 \cdot 10^{-18}$  Кл **4.18.** 1 с **4.19.** 0,02 м **4.20.** 22 мкм  
**4.21.** 5 мм **4.22.** 530 В/м **4.23.** 4,7 нКл/м<sup>2</sup> **4.24.** 2,53 Мм/с **4.25.** 36,4 Мм/с  
**4.26.** 13,3 Мм/с **4.27.** 0,01 м **4.28.** 2,24 **4.29.** 21,9 см **4.30.**  $1,05 \cdot 10^{17}$  м/с<sup>2</sup>

**5.1.** 16 **5.2.** 156 пФ **5.3.** 51,1 мН **5.4.** 770 нФ **5.5.** 0,11 мДж/м<sup>3</sup> **5.6.** 15 пФ  
**5.7.** 220 нДж **5.8.** 880 В **5.9.** 0,354 Па **5.10.** 1,1 нДж **5.11.** 530 нДж  
**5.12.** 270 нДж **5.13.** 25 **5.14.** 4,2 мкКл/м<sup>2</sup> **5.15.** 26,55 нКл/м<sup>2</sup>, 2,95 нКл/м<sup>2</sup>  
**5.16.** 124 нФ **5.17.** 0,71 мФ **5.18.** 300 пФ **5.19.** 88,5 нА **5.20.** 2250 В  
**5.21.** 3000 В **5.22.** 0,1 мкА **5.23.** 31,92 нКл/м<sup>2</sup>, 7,98 нКл/м<sup>2</sup> **5.24.** 83,3 пФ  
**5.25.** 10 пФ **5.26.** 3 мкКл **5.27.** 7,5 мкКл **5.28.** 400 В **5.29.** 200 В **5.30.** 0,1 мкФ

**6.1.** - **6.2.** 0,4425 нКл/м<sup>2</sup> **6.3.** 0,443 нКл/м<sup>2</sup> **6.4.** 212 нКл/м<sup>2</sup> **6.5.** 3,606  
**6.6.** 1,33 Рад ( $75^{\circ}59'$ ) **6.7.** 5,15 В/м **6.8.** 0,80 рад ( $45^{\circ}59'$ ) **6.9.** 65,7 пКл/м<sup>2</sup>  
**6.10.** 2 мкКл/м<sup>2</sup> **6.11.** 1,15 МВ/м **6.12.** 1 **6.13.** 3,54 нКл/м<sup>2</sup> **6.14.** 2900  
**6.15.** - **6.16.** - **6.17.** 0,5 **6.18.** 585 В/м **6.19.** 1,41 **6.20.** 106 мкКл/м<sup>2</sup>

**6.21.** 1,337 рад (  $76^{\circ}35'$ ) **6.22.** 0,149 рад ( $8^{\circ}30'$ ) **6.23.** 95,5 мкКл/м<sup>2</sup>  
**6.24.** 25,9 МВ/м **6.25.** 10,3 мкКл/м<sup>2</sup> **6.26.** 0,9 мкКл **6.27.** 4,68 нКл/м<sup>2</sup>  
**6.28.** 10,62 мкКл/м<sup>2</sup> **6.29.** 11,9 кВ/м **6.30.** 108 нКл/м<sup>2</sup>

**7.1.** 48 Кл **7.2.** 15 Кл **7.3.** 75 Кл **7.4.** 69 Кл **7.5.** 70 МА/м<sup>2</sup> **7.6.** 250 Ом  
**7.7.** 2 А **7.8.** 1,43 Ом **7.9.** 2,9 Ом, 4,5 Ом **7.10.** 2 А **7.11.** 2 Ом **7.12.** 6 мин 40 с  
**7.13.** 2 А **7.14.** 15 Вт **7.15.** 0,5 Ом, 2 Вт **7.16.** 10 мин **7.17.** 0,6 Вт **7.18.** 12 м  
**7.19.** 30 мин **7.20.** 12 В **7.21.** 71,3 А **7.22.** 45 мин **7.23.** 100 кДж **7.24.** 1 кДж  
**7.25.** 20 кДж **7.26.** 0,999 **7.27.** 20 Кл **7.28.** 10 А **7.29.** 1 А/с **7.30.** 3 Кл

**8.1.** 606 мкТл **8.2.** 1 м **8.3.** 166 мкТл **8.4.** 251 мкТл **8.5.** 87,2 мкТл  
**8.6.** 400 мкТл **8.7.** 346 мкТл **8.8.** 16 мТл **8.9.** 282 мкТл **8.10.** 166 мкТл  
**8.11.** 173 мкТл **8.12.** 2 мкТл **8.13.** 28 мкТл **8.14.** 1,15 **8.15.** 3 пТл **8.16.** 1,1 мА,  
12 Тл **8.17.** 6,3 мкТл, 2,3 мкТл **8.18.** 0,1 мкТл **8.19.** 28 мкТл **8.20.** 6,28 мкТл,  
12,56 мкТл **8.21.** 6,28 мкТл **8.22.** 39,94 мкТл **8.23.** 0,03 А·м<sup>2</sup>  
**8.24.** 39,2 нА·м<sup>2</sup> **8.25.** 4 нА·м<sup>2</sup>, 10 мкКл/кг **8.26.** -87,9 ГКл/кг **8.27.** 29 пТл  
**8.28.** 31,4 пТл **8.29.** 4,4 мА·м<sup>2</sup> **8.30.** 3,14 мА·м<sup>2</sup>, 0,25 мкКл/кг

**9.1.**  $2,4 \cdot 10^{-22}$  Н·с **9.2.**  $3,2 \cdot 10^{-25}$  Дж·с **9.3.** 3,52 кэВ = 0,563 фДж  
**9.4.** 0,75 **9.5.** 175 ГКл/кг **9.6.** 0,32 пН **9.7.** 1,4 пН **9.8.** 562 МГц **9.9.** 448 МГц  
**9.10.** 13,21 Мм/с **9.11.** 1,04 Мм/с **9.12.** 25 Мм/с **9.13.** 580 фДж **9.14.**  $4 \cdot 10^{-16}$  Н  
**9.15.** 21 мм **9.16.** 19,6 кВ/м **9.17.** 10 мкс **9.18.** а) 20,1 Гм/с<sup>2</sup>, б) 37,5 Гм/с<sup>2</sup>  
**9.19.** 30° **9.20.** 2 см **9.21.** 6 см **9.22.** 41 Мм/с, 0,558 пДж = 34,9 МэВ  
**9.23.** 20 мкН **9.24.** 9,57 эВ **9.25.** 28 мм **9.26.** 0,957 ГКл/кг **9.27.** 3,97 нс  
**9.28.** 2,25 **9.29.** 0,632 пА/м<sup>2</sup> **9.30.** 7,85 см

**10.1.** 30° **10.2.** 10 мкН **10.3.** 0,1 Н **10.4.** 45° **10.5.** 7,1 А **10.6.** 20 мН/м,  
34,6 мН/м **10.7.** 20 А **10.8.** 1 нН **10.9.** 3,2 мкН/м **10.10.** 12,6 мН **10.11.** 8 мН  
**10.12.** 120 Н **10.13.** 1 Тл **10.14.** 10 А **10.15.** 6°18' **10.16.** 1°57' **10.17.** 6,32 мН·м  
**10.18.** 0,3 мкН **10.19.** 11,3 мТл **10.20.** 25,2 мкН·м **10.21.** 0,104 Н·м  
**10.22.** 0,33 нН·м/рад (19 нН·м/град) **10.23.** 1,05 с **10.24.** 6,59 мТл  
**10.25.** 160 пН·м<sup>2</sup> **10.26.** 1,24 мТл **10.27.** 6,28 мкН·м **10.28.** 2 мкН  
**10.29.** 0,5 Тл/м **10.30.** 1,1 А

**11.1.** 18 мкДж **11.2.** 3 мВт **11.3.** 6,8 мДж **11.4.** 2,51 м Дж **11.5.** 10,8 нДж  
**11.6.** 11,1 нДж **11.7.** 0,02 Вб **11.8.** 0,06 Вб **11.9.** 1,35 нВ **11.10.** 0,3 Тл  
**11.11.** 2,5 Вт **11.12.** 0,25 В **11.13.** 20,1 В **11.14.** 0,16 В **11.15.** 0,88 мВ  
**11.16.**  $4 \cdot 10^{-25}$  Н **11.17.** 3,14 В **11.18.** 39 пКл **11.19.** 12,6 нКл **11.20.** 0,25 мКл  
и 0,38 мКл **11.21.** 18,3 мКл **11.22.** 0,3 мВб **11.23.** 0,63 нКл **11.24.** 101 мкКл  
**11.25.** 4 В **11.26.** 80 мКвб **11.27.** 0,04 Гн **11.28.** 2,4 мГн **11.29.** 0,02 Гн  
**11.30.** 0,118 В

**12.1.** – **12.2.** 3,08 см **12.3.** 37°12' **12.4.** – **12.5.** 57°58' **12.6.** 8°30'  
**12.7.** 0,85 мм **12.8.** 7,06 мм **12.9.** 34°37' **12.10.** 48°35' **12.11.** 25°27', 5°02'  
**12.12.** 41°48' **12.13.** 2,75 см **12.14.** 30°42', 79°18' **12.15.** 36 см **12.16.** 1,87 м  
**12.17.** 35 **12.18.** 0,285 м **12.19.** 36°53' **12.20.** 9,59 см<sup>2</sup> **12.21.** 250  
**12.22.** 27°18' **12.23.** 1 см **12.24.** 376·10<sup>3</sup> км **12.25.** 120° **12.26.** 1,2 м  
**12.27.** – **12.28.** 36°36' **12.29.** 34° **12.30.** 1,359

**13.1.** 3,99 см **13.2.** 1,33 м **13.3.** 5°27' **13.4.** max – 0,6 и 0,45 мкм,  
min – 0,72; 0,51 и 0,4 мкм **13.5.** 2 м **13.6.** 500 нм **13.7.** 3,2 м **13.8.** 3,6 мм  
**13.9.** 0,125 мкм **13.10.** 5·10<sup>-5</sup> рад (10,3") **13.11.** 0,11 мкм **13.12.** 0,25 мкм  
**13.13.** 5·10<sup>-5</sup> рад (10,3") **13.14.** 10 мкм **13.15.** 2,1 мм **13.16.** 7 **13.17.** 0,3 нм/с  
**13.18.** 0,145 мкм **13.19.** 0,15 мкм **13.20.** 0,88 м **13.21.** 72 мкм  
**13.22.** 1,00014 **13.23.** 1,000607 **13.24.** 27,3 мкм **13.25.** 1,000282  
**13.26.** 1,24·10<sup>-4</sup> **13.27.** 140 **13.28.** 490, 1470, ... **13.29.** 3,73 мм **13.30.** 1,22 раза

**14.1.** 1,58 мм **14.2.** 3,67 мм **14.3.** 8 **14.4.** 25 м **14.5.** 1,4 м, 0,7 м, 0,47 м  
**14.6.** 2 м **14.7.** 0,75 мкм **14.8.** 0,9 мм **14.9.** 0,6 м **14.10.** 33 **14.11.** 2°45'  
**14.12.** 103 штр/мм **14.13.** 580 нм **14.14.** 21°17' **14.15.** 8 **14.16.** 17  
**14.17.** 0,6 мкм **14.18.** 38°18' **14.19.** R = 290, N = 145 **14.20.** 9,8 мм  
**14.21.** 29000 **14.22.** 3,31 мин/мм **14.23.** 0,7 мм/нм **14.24.** 1000 штр/мм  
**14.25.** 42,2 см **14.26.** 0,72 мм **14.27.** 0,626 м **14.28.** 510 нм **14.29.** 5 мкм  
**14.30.** 4,1·10<sup>5</sup> рад/м

**15.1.** 61°12' **15.2.** 67°22' **15.3.** 45° **15.4.** 2 раза **15.5.** 3,3 раза **15.6.** 0,976  
**15.7.** 0,6 **15.8.** 3 раза **15.9.** 1,23 раза **15.10.** 0,5 **15.11.** 3,4 мм  
**15.12.** 0,03 рад·м<sup>2</sup>/кг (1,7 град·м<sup>2</sup>/кг) **15.13.** 210 кг/м<sup>3</sup> **15.14.** 398 кг/м<sup>3</sup>  
**15.15.** 1,004 рад (57°30') **15.16.** 30° **15.17.** 0,12 **15.18.** 1,7% **15.19.** 0,8  
**15.20.** 0,07 **15.21.** 0,3 **15.22.** 0,04 **15.23.** 0,04 **15.24.** 0,8 **15.25.** 0,045  
**15.26.** 3 мм **15.27.** 11 раз **15.28.** 0,973 рад (55°42') **15.29.** 0,25 и 0,75  
**15.30.** min – 0°, ±90°, ±180°; max ±45°, ±135°.

### Библиографический список

1. Савельев И. В. Курс физики: В 3 т. М., 1989. Т. 2.
2. Савельев И. В. Курс общей физики: В 3 т. М., 1992. Т. 2.
3. Яворский Б. М., Детлаф А. А. и др. Курс физики: В 2 т. М., 1989. Т. 2.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО .....	4
1. Взаимодействие электрических зарядов. Напряженность электрического поля .....	4
2. Потенциальная энергия и потенциал электрического поля .....	8
3. Электрический диполь .....	12
4. Движение заряженных частиц в электрическом поле .....	18
5. Электрическая емкость. Конденсаторы .....	22
6. Диэлектрики .....	26
7. Электрический ток .....	31
МАГНЕТИЗМ .....	36
8. Расчет магнитных полей и магнитных моментов .....	36
9. Движение заряженных частиц в магнитном поле .....	42
10. Проводники с током в магнитном поле .....	45
11. Механическая работа в магнитном поле. ЭДС индукции. Индуктивность .....	50
ОПТИКА .....	56
12. Отражение и преломление света .....	56
13. Интерференция света .....	61
14. Дифракция света .....	66
15. Поляризация света .....	70
Показатели преломления .....	76
Значения физических постоянных .....	76
Ответы .....	77
Библиографический список .....	79