

Федеральное агентство по образованию

A



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МАМИ»

2007

Л.В. ВОЛКОВА, Е.Б. ВОЛОШИНОВ, В.В. НИЖЕГОРОДОВ

ФИЗИКА

Контрольные задания
и методические указания
для студентов заочного отделения

ЧАСТЬ II

БИБЛИОТЕКА
МАМИ
УЧЕБНЫЙ ФОНД.

- 200ж-3

Москва 2007

Федеральное агентство по образованию

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МАМИ»

Л.В. ВОЛКОВА, Е.Б. ВОЛОШИНОВ, В.В. НИЖЕГОРОДОВ

ФИЗИКА

ЧАСТЬ II

Учебное пособие для студентов
заочного отделения

*Допущено УМО вузов РФ по образованию в области
транспортных машин и транспортно – технологических комплексов
в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по специальности
Автомобиле – и тракторостроение*

МОСКВА
2007

53/025/
УДК 535(075)

Л.В. ВОЛКОВА, Е.Б. ВОЛОШИНОВ, В.В. НИЖЕГОРОДОВ. «ФИЗИКА»
Часть II.

Учебное пособие для студентов заочного отделения. – М.: МГТУ «МАМИ»,
2007. – 58 с.: ил. 21.

Допущено УМО вузов РФ по образованию в области транспортных машин
и транспортно-технологических комплексов в качестве учебного пособия для
студентов, обучающихся по специальности Автомобиле- и тракторостроение

АННОТАЦИЯ.

Учебное пособие включает в себя контрольные задания и методические
указания по разделам «Электричество и магнетизм» курса общей физики.

Рецензенты:

Кафедра физики колебаний физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова

Кандидат физико-математических наук, доцент
Московского государственного текстильного университета
имени А.Н. Косыгина И.И. Сулимцев

ISBN

© 2007

© Волкова Л.В. и др., 2007

РАЗДЕЛ III ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Основные формулы.

- Закон Кулона (сила F взаимодействия двух точечных зарядов q_1 и q_2):

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды; ϵ_0 — электрическая постоянная; r — расстояние между зарядами.

- Линейная τ и поверхностная σ плотности заряда:

$$\tau = \frac{dq}{dl}, \quad \sigma = \frac{dq}{dS}.$$

- Напряженность электрического поля:

а) через величину пробного заряда q_{np} , внесенного в электрическое поле,

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{np}},$$

где F — сила, действующая на пробный заряд;

б) созданного точечным зарядом q на расстоянии r от него

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2};$$

в) образованного заряженной бесконечной нитью на расстоянии r от нее

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r},$$

где τ — линейная плотность заряда на нити;

г) образованного заряженной бесконечной протяженной плоскостью

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0},$$

где σ — поверхностная плотность заряда;

д) образованного разноименно заряженными параллельными бесконечными плоскостями (поле плоского конденсатора)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}.$$

- Связь между напряженностью электрического поля \vec{E} и вектором электрического смещения (электрической индукцией) \vec{D} :

$$\vec{D} = \epsilon\epsilon_0 \vec{E}.$$

- Теорема Гаусса (поток вектора напряженности Φ_E электрического поля через замкнутую поверхность S , охватывающую заряды q_i):

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} \cdot \cos \alpha \cdot dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i$$

- Потенциал электрического поля

$$\varphi = \frac{W_{\pi}}{q_{np}},$$

где W_{π} — потенциальная энергия пробного заряда q_{np} , внесенного в это поле.

- Потенциал электрического поля, созданного точечным зарядом q , на расстоянии r от него

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

- Напряженность и потенциал поля, создаваемого проводящей заряженной сферой радиусом R на расстоянии r от центра сферы:

$$\text{а) } E = 0, \quad \varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R} \quad (\text{при } r < R);$$

$$\text{б) } E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2}, \quad \varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R} \quad (\text{при } r = R);$$

$$\text{в) } E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}, \quad \varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} \quad (\text{при } r > R);$$

где q — заряд сферы.

- Напряженность и потенциал поля, создаваемого системой точечных зарядов (принцип суперпозиции электрических полей):

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i; \quad \varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i,$$

где \vec{E}_i , φ_i — напряженность и потенциал в данной точке поля, создаваемые зарядом.

- Связь между напряженностью E и потенциалом φ электрического поля:

$$E = -\frac{d\varphi}{dr},$$

в случае однородного поля (поля плоского конденсатора)

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

где U — разность потенциалов между пластинами.

- Напряженность и потенциал поля, создаваемого точечными зарядами:

$$d\vec{E} = \frac{dq}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \vec{r}_0; \quad d\varphi = \frac{dq}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r},$$

где \vec{r}_0 — единичный вектор, направленный из точки, где находится заряд dq , в рассматриваемую точку поля.

- Работа перемещения заряда q в электрическом поле

$$A = q \int_1^2 E_n dr = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

- Энергия взаимодействия W системы точечных зарядов $q_1, q_2 \dots q_n$:

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \varphi_i,$$

здесь φ_i — потенциал поля, создаваемого всеми $(n-1)$ зарядами (за исключением i -го) в точке, где расположен заряд q_i .

- Электрический момент диполя

$$\vec{p} = |q| \vec{l},$$

где \vec{l} — плечо диполя.

- Электрическая емкость уединенного проводника и конденсатора:

$$C = \frac{q}{\varphi}; \quad C = \frac{|q|}{U},$$

где q — заряд, сообщенный проводнику (пластине конденсатора); φ — потенциал проводника; U — разность потенциалов пластин конденсатора.

- Электрическая емкость:

а) уединенной проводящей сферы радиуса R

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R;$$

б) плоского конденсатора

$$C = \epsilon\epsilon_0 \frac{S}{d},$$

где S — площадь одной пластины; d — расстояние между пластинами.

$$W = \frac{C\varphi^2}{2},$$

где C — емкость проводника; φ — потенциал проводника; $\varphi_\infty = 0$.

- Энергия заряженного конденсатора

$$W = \frac{CU^2}{2},$$

где U — разность потенциалов на пластинах конденсатора.

- Емкость батареи конденсаторов:

при параллельном соединении конденсаторов

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n,$$

при последовательном соединении

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$

- Сила и плотность электрического тока:

$$I = \frac{dq}{dt}; \quad j = \frac{dl}{dS},$$

где dq — заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за время dt .

- Сопротивление R проводника:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

ρ — удельное сопротивление проводника; l — длина проводника, S — площадь поперечного сечения проводника.

- Сопротивление системы проводников:

а) $R = \sum_{i=1}^n R_i$ — при последовательном соединении;

б) $\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$ — при параллельном соединении,

где R_i — сопротивление i -го проводника.

- Закон Ома:

а) $I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}$ — для участка цепи, не содержащего ЭДС, где $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ —

разность потенциалов (напряжение) на концах участка цепи; R — сопротивление участка;

$$б) I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \pm \varepsilon_{12}}{R} \text{ для участка цепи, содержащего ЭДС,}$$

где ε_{12} — ЭДС источника тока; R — полное сопротивление участка (сумма внешних и внутренних сопротивлений);

$$в) I = \frac{\varepsilon}{R + r} \text{ для полной (замкнутой) цепи,}$$

где R — внешнее сопротивление цепи; r — внутреннее сопротивление цепи.

- Законы Кирхгофа:

$$а) \sum I_i = 0 \text{ — первый закон;}$$

$$б) \sum I_i R_i = \sum \varepsilon_i \text{ — второй закон,}$$

где $\sum I_i$ — алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле; $\sum I_i R_i$ — алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивления участков; $\sum \varepsilon_i$ — алгебраическая сумма ЭДС.

- Закон Джоуля—Ленца (количество тепла Q , выделившегося на сопротивлении R за время t при прохождении через него электрического тока):

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t = \frac{U^2}{R} t = I U t$$

- Полная мощность, развиваемая источником,

$$P = I \cdot \varepsilon.$$

- Полезная мощность P_R , выделяемая на внешнем сопротивлении R ,

$$P_R = I U = I^2 R.$$

- КПД источника тока

$$\eta = \frac{P_R}{P}.$$

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1. Два точечных заряда $9q$ и $-q$ закреплены на расстоянии $l=50$ см друг от друга. Третий заряд q_1 может перемещаться только вдоль прямой, проходящей через заряды. Определить положение заряда q_1 , при котором он будет находиться в равновесии. При каком знаке заряда q_1 равновесие будет устойчивым?

Дано:

$9q$

$-q$

$l = 50 \text{ см} = 0,5 \text{ м}$

$x = ?$

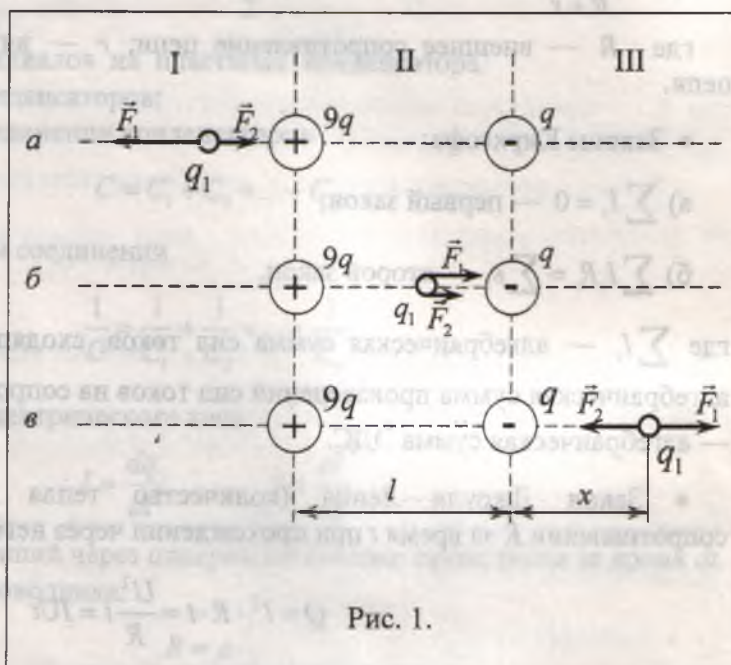


Рис. 1.

Решение.

Заряд q_1 находится в равновесии в том случае, если геометрическая сумма сил, действующих на него, равна нулю. Это значит, что на заряд q_1 должны действовать две силы, равные по модулю и противоположные по направлению. Рассмотрим, на каком из трех участков: I, II, III (рис.1) может быть выполнено это условие. Для определенности будем считать, что заряд q_1 — положительный.

На участке I (рис. 1,а) на заряд q_1 будут действовать две противоположно направленные силы: F_1 и F_2 . Сила F_1 , действующая со стороны заряда $9q$, в любой точке этого участка больше силы F_2 , действующей со стороны заряда $-q$, так как больший заряд $9q$ находится всегда ближе к заряду q_1 , чем меньший (по модулю) заряд $-q$. Поэтому равновесие на этом участке невозможно.

На участке II (рис. 1,б) обе силы F_1 и F_2 направлены в одну сторону — к заряду $-q$. Следовательно, и на втором участке равновесие невозможно.

На участке III (рис. 1,в) силы F_1 и F_2 направлены в противоположные стороны, так же, как и на участке I, но в отличие от него меньший заряд $-q$

всегда находится ближе к заряду q_1 , чем больший заряд $9q$. Это значит, что можно найти такую точку на прямой, где силы F_1 и F_2 будут одинаковы по модулю, т. е.

$$F_1 = F_2. \quad (1)$$

Пусть x и $l+x$ — расстояние от меньшего и большего зарядов до заряда q_1 . Выразая в равенстве (1) F_1 и F_2 в соответствии с законом Кулона, получим:

$$\frac{9q \cdot q_1}{4\pi\epsilon_0(l+x)^2} = \frac{q \cdot q_1}{4\pi\epsilon_0 x^2},$$

$$\text{или} \quad l+x = \pm 3x,$$

$$\text{откуда} \quad x_1 = +\frac{l}{2}, \quad x_2 = -\frac{l}{4}.$$

Корень x_2 не удовлетворяет физическому смыслу задачи (в этой точке силы F_1 и F_2 хотя и равны по модулю, но сонаправлены).

Определим знак заряда q_1 , при котором равновесие будет устойчивым. Равновесие называется устойчивым, если при смещении заряда от положения равновесия возникают силы, возвращающие его в положение равновесия. Рассмотрим смещение заряда q в двух случаях: когда заряд положителен и отрицателен.

Если заряд q положителен, то при смещении его влево обе силы F_1 и F_2 возрастают. Так как сила F_1 возрастает медленнее, то результирующая сила, действующая на заряд q_1 , будет направлена в ту же сторону, в которую смещен этот заряд, т. е. влево. Под действием этой силы заряд q_1 будет удаляться от положения равновесия. То же происходит и при смещении заряда q_1 вправо. Сила F_2 убывает быстрее, чем сила F_1 . Геометрическая сумма сил в этом случае направлена вправо. Заряд под действием этой силы также будет перемещаться вправо, т. е. удаляться от положения равновесия. Таким образом, в случае положительного заряда равновесие будет неустойчивым.

Если заряд q_1 отрицателен, то его смещение влево вызовет увеличение сил F_1 , и F_2 , но сила F_1 возрастает медленнее, чем F_2 , т.е. $|F_2| > |F_1|$; результирующая сила будет направлена вправо, под ее действием заряд q_1 , возвращается к положению равновесия. При смещении q_1 вправо сила F_2 убывает быстрее, чем F_1 , т.е. $|F_1| > |F_2|$, результирующая сила направлена влево и заряд q_1 опять будет возвращаться к положению равновесия.

При отрицательном заряде равновесие является устойчивым. Величина самого заряда q_1 не существенна.

Ответ: равновесие будет устойчивым, если заряд q_1 будет отрицательным и находится на расстоянии $x = 0,25$ м от заряда q .

Пример 2. Два точечных электрических заряда $q_1 = 1$ нКл и $q_2 = -2$ нКл находятся в воздухе на расстоянии $d = 10$ см друг от друга. Определить напряженность E и потенциал φ поля, создаваемого этими зарядами в точке A , удаленной от заряда q_1 на расстояние $r_1 = 9$ см и от заряда q_2 на расстояние $r_2 = 7$ см.

Дано:

$$q_1 = 1 \text{ нКл} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_2 = -2 \text{ нКл} = -2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$d = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$\varepsilon = 1$$

$$r_1 = 9 \text{ см} = 0,09 \text{ м}$$

$$r_2 = 7 \text{ см} = 0,07 \text{ м}$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$$

$$E = ? \quad \varphi = ?$$

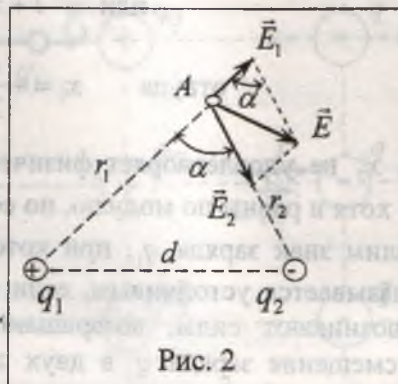


Рис. 2

Решение. Согласно принципу суперпозиции электрических полей, каждый заряд создает поле независимо от присутствия в пространстве других зарядов. Поэтому напряженность \vec{E} электрического поля в искомой точке может быть найдена как геометрическая сумма напряженностей \vec{E}_1 и \vec{E}_2 полей, создаваемых каждым зарядом в отдельности: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Напряженность электрического поля, создаваемого в воздухе ($\varepsilon = 1$) зарядами q_1 и q_2 :

$$E_1 = \frac{|q_1|}{4\pi\varepsilon_0 r_1^2}, \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{|q_2|}{4\pi\varepsilon_0 r_2^2}. \quad (2)$$

Вектор \vec{E}_1 (рис. 2) направлен по силовой линии от заряда q_1 , так как этот заряд положителен; вектор \vec{E}_2 направлен также по силовой линии, то к заряду q_2 , так как этот заряд отрицателен.

Модуль вектора \vec{E} найдем по теореме косинусов:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2 \cos \alpha}, \quad (3)$$

где α — угол, который может быть найден из треугольника со сторонами r_1 , r_2 и d :

$$\cos \alpha = \frac{r_1^2 + r_2^2 - d^2}{2r_1r_2}.$$

В данном случае во избежание громоздких записей удобно значение $\cos \alpha$ вычислить отдельно:

$$\cos \alpha = \frac{0,09^2 + 0,07^2 - 0,1^2}{2 \cdot 0,09 \cdot 0,07} = 0,238.$$

Подставляя выражения E_1 из уравнения (1) и E_2 из уравнений (2) в (3) и вынося общий множитель $1/(4\pi\epsilon_0)$ за знак корня, получаем:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{q_1^2}{r_1^4} + \frac{q_2^2}{r_2^4} - 2 \frac{|q_1||q_2|}{r_1^2 r_2^2} \cos \alpha}. \quad (4)$$

В соответствии с принципом суперпозиции электрических полей потенциал φ результирующего поля, создаваемого двумя зарядами q_1 и q_2 , равен алгебраической сумме потенциалов:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2. \quad (5)$$

Потенциал электрического поля, создаваемого в вакууме точечным зарядом q на расстоянии r от него, выражается формулой

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (6)$$

В нашем случае согласно формулам (5) и (6) получим:

$$\varphi = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2},$$

или

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} \right).$$

Произведем проверку единиц измерения:

$$[E] = \left[\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{q_1^2}{r_1^4} + \frac{q_2^2}{r_2^4} - 2 \frac{q_1 q_2}{r_1^2 r_2^2} \cos \alpha} \right] = \frac{1}{\Phi/\text{м}} \sqrt{\frac{\text{Кл}^2}{\text{м}^4}} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{м}}{\Phi \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{В}}{\text{Кл} \cdot \text{м}} = \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

$$[\varphi] = \left[\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} \right) \right] = \frac{1}{\Phi/\text{м}} \cdot \frac{\text{Кл}}{\text{м}} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{м}}{\Phi \cdot \text{м}} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{В}}{\text{Кл}} = \text{В}.$$

Произведем вычисления:

$$E = \frac{1}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \sqrt{\frac{(10^{-9})^2}{0,09^4} + \frac{(2 \cdot 10^{-9})^2}{0,07^4} - 2 \frac{10^{-9} \cdot 2 \cdot 10^{-9}}{0,09^2 \cdot 0,07^2}} (0,238) =$$

$$= 3,58 \cdot 10^3 \text{ В/м};$$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \left(\frac{10^{-9}}{0,09} + \frac{-2 \cdot 10^{-9}}{0,07} \right) = -157 \text{ В}.$$

Ответ: напряженность и потенциал в точке A соответственно равны:

$$E = 3,58 \cdot 10^3 \text{ В/м}, \quad \varphi = -157 \text{ В}.$$

Пример 3. На тонком стержне длиной $l = 20$ см находится равномерно распределенный электрический заряд. На продолжении оси стержня на расстоянии $a = 10$ см от ближайшего конца находится точечный заряд $q_1 = 40$ нКл, который взаимодействует со стержнем с силой $F = 6$ мкН. Определить линейную плотность τ заряда на стержне.

Дано:

$$l = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$$

$$a = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$q_1 = 40 \text{ нКл} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$F = 6 \text{ мкН} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$$

$$\tau = ?$$

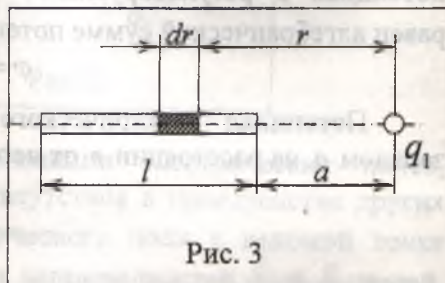


Рис. 3

Решение. Сила взаимодействия F заряженного стержня с точечным зарядом q_1 зависит от линейной плотности τ заряда на стержне. Зная эту зависимость, можно определить τ . При вычислении силы F следует иметь в виду, что заряд на стержне не является точечным, поэтому закон Кулона непосредственно применить нельзя. В этом случае можно поступить следующим образом. Выделим из стержня (рис. 3) малый участок dr с зарядом $dq = \tau dr$. Этот заряд можно рассматривать как точечный. Тогда, согласно закону Кулона:

$$dF = \frac{q_1 \tau dr}{4\pi \varepsilon_0 r^2}.$$

Интегрируя это выражение в пределах от a до $a+l$, получаем:

$$F = \frac{q_1 \tau}{4\pi \varepsilon_0} \int_a^{a+l} \frac{dr}{r^2} = \frac{q_1 \tau}{4\pi \varepsilon_0} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a+l} \right) = \frac{q_1 \tau l}{4\pi \varepsilon_0 a(a+l)},$$

откуда

$$\tau = \frac{4\pi\epsilon_0 a(a+l)F}{q_1 \cdot l}$$

Проведем проверку единиц измерения:

$$[\tau] = \left[\frac{4\pi\epsilon_0 a(a+l)F}{q_1 l} \right] = \frac{\Phi / \text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{Н}}{\text{Кл} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{Н}}{\text{В} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{Н}}{\text{В}} =$$

$$= \frac{\text{Н} \cdot \text{Кл}}{\text{Дж}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{Кл}}{\text{Н} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Кл}}{\text{м}}$$

Произведем вычисления:

$$\tau = \frac{4\pi\epsilon_0 a(a+l)F}{q_1 l} = \frac{0,1(0,1+0,2)6 \cdot 10^{-6}}{9 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 10^{-8} \cdot 0,2} = 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/м}$$

Ответ: линейная плотность заряда на стержне $\tau = 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/м}$.

Пример 4. Заряд $q = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ переносится из бесконечности в точку, находящуюся на расстоянии $r = 1 \text{ см}$ от поверхности заряженного шара радиусом $R = 9 \text{ см}$. Поверхностная плотность заряда шара $\sigma = 10^{-4} \text{ Кл/м}^2$. Определить совершаемую при этом работу.

Дано:

$$q = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$r = 1 \text{ см} = 0,01 \text{ м}$$

$$R = 9 \text{ см} = 0,09 \text{ м}$$

$$\sigma = 1 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/м}^2$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$$

$$A = ?$$

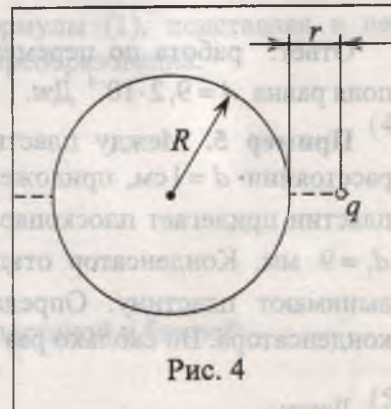


Рис. 4

Решение. Работа внешней силы A по перемещению заряда q из точки поля с потенциалом φ_1 в другую точку с потенциалом φ_2 равна по абсолютной величине, но противоположна по знаку работе A' сил поля по перемещению заряда между этими точками поля, т.е. $A = -A'$. Работа сил электрического поля определяется по формуле $A' = q(\varphi_1 - \varphi_2)$. Тогда

$$A = q(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (1)$$

где φ_1 — потенциал в начальной точке; φ_2 — потенциал в конечной точке.

Потенциал, создаваемый заряженным шаром радиусом R в точке на расстоянии r от его поверхности, определяется по формуле

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0(R+r)}, \quad (2)$$

где $q = \sigma 4\pi R^2$ — заряд шара.

Потенциал φ_1 в бесконечно удаленной точке (при $r = \infty$) будет равен нулю.

Потенциал φ_2 из формулы (2) подставим в формулу (1) и после преобразований получим:

$$A = \frac{q\sigma R^2}{\epsilon\epsilon_0(R+r)}.$$

Проверим единицы измерения:

$$A = \left[\frac{q\sigma R^2}{\epsilon\epsilon_0(R+r)} \right] = \frac{\text{Кл} \cdot \text{Кл} / \text{м}^2 \cdot \text{м}^2}{\text{Ф} / \text{м} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{Кл}}{\text{Ф}} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{Кл} \cdot \text{В}}{\text{Кл}} = \text{Дж}.$$

Расчет:

$$A = \frac{q\sigma R^2}{\epsilon\epsilon_0(R+r)} = \frac{1 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,09^2}{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} (0,09 + 0,01)} = 9,2 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}.$$

Ответ: работа по перемещению заряда из бесконечности в данную точку поля равна $A = 9,2 \cdot 10^{-4}$ Дж.

Пример 5. Между пластинами плоского конденсатора, находящимися на расстоянии $d = 1$ см, приложена разность потенциалов $U_1 = 200$ В. К одной из пластин прилежит плоскопараллельная стеклянная пластина ($\epsilon_1 = 7$) толщиной $d_1 = 9$ мм. Конденсатор отключают от источника напряжения и после этого вынимают пластину. Определить разность потенциалов между пластинами конденсатора. Во сколько раз изменится энергия конденсатора?

Дано:

$$d = 1 \text{ см} = 0,01 \text{ м}$$

$$d_1 = 9 \text{ мм} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$U_1 = 200 \text{ В}$$

$$\epsilon_1 = 7$$

$$\epsilon_2 = 1$$

$$U_2 = ? \quad \frac{W_2}{W_1} = ?$$

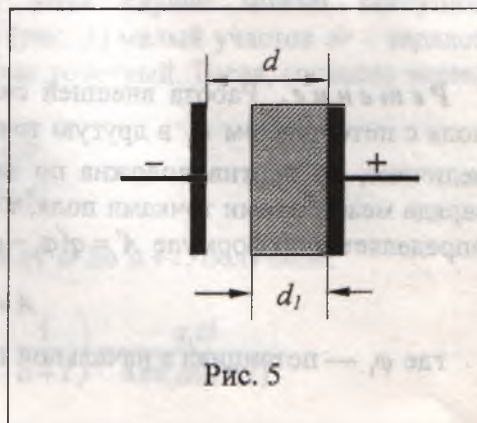


Рис. 5

Решение. Разность потенциалов между пластинами конденсатора в случае отключения его от источника напряжения находится из условия, что заряд на его пластинах остается неизменным, т. е.

$$C_1 U_1 = C_2 U_2 \quad (1)$$

где C_1 и C_2 — емкости конденсатора; U_1 и U_2 — разности потенциалов.

В условиях данной задачи конденсатор вначале является слоистым и его емкость C_1 находится по формуле, используемой для определения емкости батареи последовательно соединенных конденсаторов:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 S}{\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d - d_1}{\varepsilon_2}}, \quad (2)$$

где S — площадь пластины; ε_1 и ε_2 — диэлектрические проницаемости стекла и воздуха; d_1 — толщина стеклянной пластины; d — зазор между пластинами.

После удаления стеклянной пластины из зазора конденсатор становится простейшим плоским конденсатором с емкостью

$$C_2 = \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_0 S}{d}. \quad (3)$$

Разность потенциалов U_2 которая устанавливается после удаления из зазора стеклянной пластины, определим из формулы (1), подставляя в нее формулы (2) и (3) и производя соответствующие преобразования:

$$U_2 = \frac{C_1}{C_2} U_1 = \frac{\varepsilon_1 d}{d_1 \varepsilon_2 + (d - d_1) \varepsilon_1} U_1. \quad (4)$$

Энергия конденсатора

$$W = \frac{CU^2}{2}.$$

Найдем отношение энергий конденсаторов с пластиной и без неё:

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{C_2 U_2^2}{C_1 U_1^2}. \quad (5)$$

Это отношение можно определять двумя способами:

1. Если подставить выражения для входящих в отношение (5) величин, то после преобразований и вычислений получим:

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{\varepsilon_1 d}{d_1 \varepsilon_2 + (d - d_1) \varepsilon_1}.$$

2. Отношение (5) можно представить в виде:

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{C_2 U_2 U_2}{C_1 U_1 U_1}.$$

Так как по условию $C_1 U_1 = C_2 U_2$, то

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{U_2}{U_1}.$$

Делаем проверку единиц измерения:

$$[U_2] = \left[\frac{\varepsilon_1 d \cdot U_1}{d_1 \varepsilon_2 + (d - d_1) \varepsilon_1} \right] = \frac{\text{м}}{\text{м}} \text{В} = \text{В}.$$

Расчет:

$$U_2 = \frac{\varepsilon_1 d}{d_1 \varepsilon_2 + (d - d_1) \varepsilon_1} U_1 = \frac{7 \cdot 10^{-2}}{9 \cdot 10^{-3} \cdot 1 + (1 \cdot 10^{-2} - 9 \cdot 10^{-3}) \cdot 7} \times 200 = 875 \text{ В}.$$

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{875}{200} = 4,38.$$

Ответ: после выемки стеклянной пластины разность потенциалов между пластинами конденсатора станет равной $U_2 = 875 \text{ В}$, а энергия увеличится в 4,38 раза.

Пример 6. Определить максимальную мощность, которая может выделяться во внешней цепи, питаемой от батареи с ЭДС 12 В, если наибольшая сила тока, которую может дать батарея, равна $I_{\text{max}} = 5 \text{ А}$.

Дано:

$$\varepsilon = 12 \text{ В}$$

$$I_{\text{max}} = 5 \text{ А}$$

$$P_{\text{max}} = ?$$

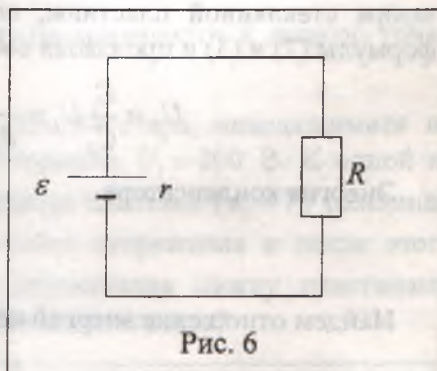


Рис. 6

Решение. Используем закон Ома для полной цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (1)$$

где R — сопротивление внешней цепи; r — внутреннее сопротивление источника тока.

Мощность P , выделяемая во внешней цепи, определяется по формуле $P = I^2 R$. Преобразуем это выражение, используя формулу (1):

$$P = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2}. \quad (2)$$

Таким образом, мощность зависит от внешнего сопротивления цепи R . Мощность будет максимальной при таком значении R , при котором первая производная $\frac{dP}{dR}$ обращается в нуль.

Возьмем первую производную:

$$\frac{dP}{dR} = \frac{\varepsilon^2(r^2 - R^2)}{(R+r)^4}. \quad (3)$$

Из уравнения (3) видно, что $\frac{dP}{dR} = 0$ при $R = r$. Определим r . Максимальный ток возникает при коротком замыкании цепи, т.е. когда внешнее сопротивление $R = 0$. Исходя из этого, $I_{\max} = \frac{\varepsilon}{r}$, откуда $r = \frac{\varepsilon}{I_{\max}}$, значит

$$R = \frac{\varepsilon}{I_{\max}}. \quad (4)$$

Подставив уравнение (4) в уравнение (2) и выполнив преобразования, получим:

$$P_{\max} = \frac{\varepsilon I_{\max}}{4}. \quad (5)$$

Проверка единиц измерения:

$$[P_{\max}] = \left[\frac{\varepsilon I_{\max}}{4} \right] = \text{ВА} = \text{Вт}.$$

Расчет:

$$P_{\max} = \frac{\varepsilon I_{\max}}{4} = \frac{12 \cdot 5}{4} = 15 \text{ Вт}.$$

Ответ: максимальная мощность, выделяемая во внешней цепи, равна $P_{\max} = 15 \text{ Вт}$.

Пример 7. Три источника тока с электродвижущими силами $\varepsilon_1 = 2,5 \text{ В}$; $\varepsilon_2 = 2 \text{ В}$; $\varepsilon_3 = 1,5 \text{ В}$ и сопротивлениями $R_1 = 2 \text{ Ом}$; $R_2 = 3 \text{ Ом}$ и $R_3 = 0,8 \text{ Ом}$ соединены, как показано на рис. 7. Определить токи в сопротивлениях. Внутренними сопротивлениями источников пренебречь.

Дано:

$$\varepsilon_1 = 2,5 \text{ В}$$

$$\varepsilon_2 = 2 \text{ В}$$

$$\varepsilon_3 = 1,5 \text{ В}$$

$$R_1 = 2 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 3 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 0,8 \text{ Ом}$$

$$I_1 = ? \quad I_2 = ? \quad I_3 = ?$$

Решение.

Для решения задачи применим правила Кирхгофа. Для этого на чертеже укажем направление протекания токов I_1 , I_2 , I_3 и направление обхода контуров.

Первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_{i=1} I_i = 0.$$

При этом токи, подходящие к узлу, считаются положительными, а токи, отходящие от узла, — отрицательными. Для узла A (см. рис. 7) имеем:

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0. \quad (1)$$

Второе правило Кирхгофа: в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивление соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме ЭДС в контуре.

При этом, если токи по направлению совпадают с выбранным направлением обхода контура, то они считаются положительными, а несовпадающие — отрицательными.

ЭДС источника берется со знаком «плюс», если при выбранном обходе контура осуществляется переход внутри источника от отрицательного полюса к положительному, в противном случае ЭДС берется со знаком «минус».

По второму правилу Кирхгофа для контура $A\varepsilon_2 B\varepsilon_1 A$ имеем:

$$I_2 R_2 - I_1 R_1 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2; \quad (2)$$

для контура $A\varepsilon_3 B\varepsilon_2 A$:

$$-I_3 R_3 - I_2 R_2 = -\varepsilon_3 - \varepsilon_2; \quad (3)$$

для контура $A\varepsilon_3 B\varepsilon_1 A$:

$$-I_3 R_3 - I_1 R_1 = -\varepsilon_3 + \varepsilon_1; \quad (4)$$

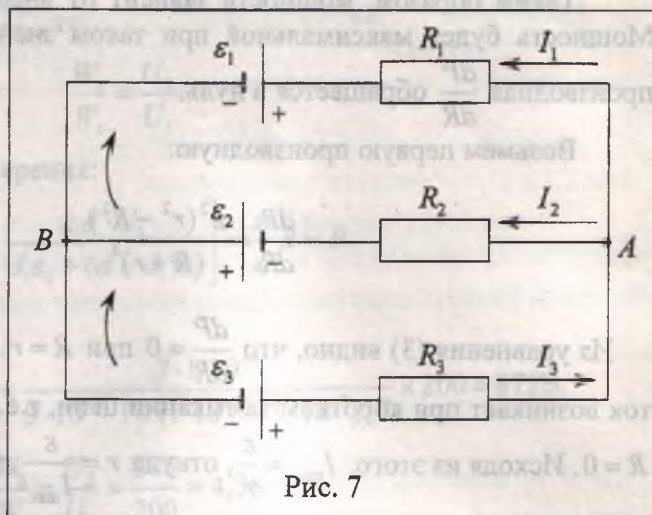


Рис. 7

Преобразуем формулы (1), (2), (3), подставляя в них численные значения ЭДС и сопротивлений, взятые из условия задачи:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0; \quad (5)$$

$$3I_2 - 2I_1 = 4,5; \quad (6)$$

$$0,8I_3 + 3I_2 = 3,5. \quad (7)$$

Из уравнения (5) находим I_3 и подставляем в уравнение (7):

$$I_3 = I_1 + I_2; \quad 0,8(I_1 + I_2) + 3I_2 = 3,5.$$

Решим систему:

$$\begin{cases} 3I_2 - 2I_1 = 4,5 \\ 3,8I_2 + 0,8I_1 = 3,5 \end{cases} \quad I_2 = 1,06 \text{ А}$$

Значение I_2 подставим во второе уравнение системы и найдем значение I_1 :

$$3 \cdot 1,06 - 2I_1 = 4,5, \quad -2I_1 = 1,32, \quad I_1 = -0,66 \text{ А.}$$

Найдем значение I_3 , подставляя значение I_2 в уравнение (7):

$$0,8I_3 + 3 \cdot 1,06 = 3,5, \quad 0,8I_3 = 0,32, \quad I_3 = 0,4 \text{ А.}$$

Проверяем решение по первому правилу Кирхгофа:

$$\text{при } I_1 = -0,66 \text{ А, } I_2 = 1,06 \text{ А, } I_3 = 0,4 \text{ А получим} \\ -0,66 + 1,06 - 0,4 = 0.$$

Знак «минус» перед значением тока I_1 показывает, что этот ток направлен в сторону, противоположную указанной на чертеже.

Пример 8. Сила тока в проводнике сопротивлением $R = 20$ Ом нарастает в течение времени $\Delta t = 2$ с по линейному закону от $I_0 = 0$ до $I = 6$ А (рис. 8). Определить теплоту Q , выделившуюся в этом проводнике за вторую секунду.

Дано:

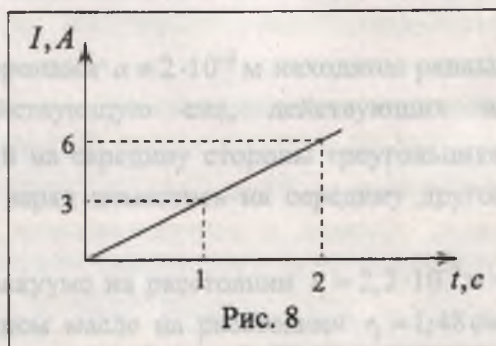
$$R = 20 \text{ Ом}$$

$$\Delta t = 2 \text{ с}$$

$$I_0 = 0$$

$$I = 6 \text{ А}$$

$$Q = ?$$



Решение. Закон Джоуля—Ленца в виде $Q = I^2 R t$ справедлив для постоянного тока ($I = \text{const}$). Если же сила тока в проводнике изменяется, то указанный закон справедлив для бесконечно малого интервала времени и записывается в виде

$$dQ = I^2 R dt. \quad (1)$$

Здесь сила тока I является некоторой функцией времени. В данном случае

$$I = kt, \quad (2)$$

где k — коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость изменения силы тока:

$$k = \Delta I / \Delta t = 6/2 = 3 \text{ A/c}.$$

С учетом формулы (2) формула (1) примет вид

$$dQ = k^2 R t^2 dt. \quad (3)$$

Для определения теплоты, выделившейся за конечный интервал времени Δt , выражение (3) надо проинтегрировать в пределах от t_1 до t_2 :

$$Q = k^2 R \int_{t_1}^{t_2} t^2 dt = \frac{1}{3} k^2 R (t_2^3 - t_1^3).$$

Проверка единиц измерения:

$$[Q] = \left[\frac{1}{3} k^2 R (t_2^3 - t_1^3) \right] = (\text{A}^2/\text{c}^2) \text{Ом} \times \text{c}^3 = \text{A}^2 \cdot \text{Ом} \cdot \text{c} = \text{A} \cdot \text{В} \cdot \text{c} = \text{Дж}.$$

Расчет:

$$Q = \frac{1}{3} k^2 R (t_2^3 - t_1^3) = \frac{1}{3} 3^2 \cdot 20 (8 - 1) = 420 \text{ Дж}.$$

Ответ: за вторую секунду в проводнике выделится количество теплоты $Q = 420 \text{ Дж}$.

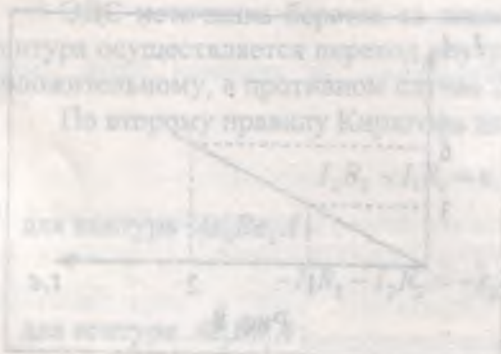


Таблица вариантов к контрольной работе №3

Вариант	Номера задач					
	1	2	3	4	5	6
1	3.01	3.16	3.31	3.46	3.61	3.76
2	3.02	3.17	3.32	3.47	3.62	3.77
3	3.03	3.18	3.33	3.48	3.63	3.78
4	3.04	3.19	3.34	3.49	3.64	3.79
5	3.05	3.20	3.35	3.50	3.65	3.80
6	3.06	3.21	3.36	3.51	3.66	3.81
7	3.07	3.22	3.37	3.52	3.67	3.82
8	3.08	3.23	3.38	3.53	3.68	3.83
9	3.09	3.24	3.39	3.54	3.69	3.84
10	3.10	3.25	3.40	3.55	3.70	3.85
11	3.11	3.26	3.41	3.56	3.71	3.86
12	3.12	3.27	3.42	3.57	3.72	3.87
13	3.13	3.28	3.43	3.58	3.73	3.88
14	3.14	3.29	3.44	3.59	3.74	3.89
15	3.15	3.30	3.45	3.60	3.75	3.90

3.01 На расстоянии $l = 12$ см друг от друга расположены два тела с положительными зарядами $q_1 = 1 \cdot 10^{-4}$ Кл и $q_2 = 1 \cdot 10^{-6}$ Кл. На каком расстоянии от тела с меньшим зарядом помещен пробный точечный заряд, если он находится в равновесии?

3.02 Шары массами $m_1 = 10$ г и $m_2 = 1$ г заряжены. Заряд первого шара равен $q_1 = 3 \cdot 10^{-4}$ Кл, заряд второго надо определить. Известно, что сила их кулоновского отталкивания уравнивается силой ньютоновского притяжения.

3.03 Два точечных заряда находятся в воде на некотором расстоянии друг от друга, взаимодействуя с некоторой силой. Во сколько раз необходимо изменить расстояние между ними, чтобы они взаимодействовали с такой же силой в воздухе?

3.04 В вершинах треугольника со сторонами $a = 2 \cdot 10^{-2}$ м находятся равные заряды $q = 2 \cdot 10^{-9}$ Кл. Найти равнодействующую сил, действующих на четвертый заряд $q_4 = 10^{-9}$ Кл, помещенный на середину стороны треугольника. Как изменится равнодействующая, если заряд поместить на середину другой стороны треугольника?

3.05 Два заряда взаимодействуют в вакууме на расстоянии $r_1 = 2,2 \cdot 10^{-2}$ м с такой же силой, как и в трансформаторном масле на расстоянии $r_2 = 1,48$ см. Какова диэлектрическая проницаемость трансформаторного масла?

3.06 Два шарика массами по $m = 0,5\text{ г}$ подвешены на шелковых нитях длиной $l = 1\text{ м}$ в одной точке. При сообщении шарикам зарядов они разошлись на $r = 4\text{ см}$. Определить заряд каждого шарика и силу их электростатического отталкивания.

3.07 На расстоянии $d = 20\text{ см}$ находятся два точечных заряда: $q_1 = -50\text{ нКл}$ и $q_2 = 100\text{ нКл}$. Определить силу F , действующую на заряд $q_3 = -10\text{ нКл}$, удаленный от обоих зарядов на одинаковое расстояние, равное d .

3.08 Расстояние d между двумя точечными зарядами $q_1 = 2\text{ нКл}$ и $q_2 = 4\text{ нКл}$ равно 60 см . Определить точку, в которую нужно поместить третий заряд q_3 так, чтобы система зарядов находилась в равновесии. Определить заряд q_3 и его знак. Устойчивое или неустойчивое будет равновесие?

3.09 Два шарика массой $m = 0,1\text{ г}$ каждый подвешены в одной точке на нитях длиной $l = 20\text{ см}$ каждая. Получив одинаковый заряд, шарики разошлись так, что нити образовали между собой угол $\alpha = 60^\circ$. Найти заряд каждого шарика.

3.10 Два шарика одинакового радиуса и массы подвешены на двух нитях так, что их поверхности соприкасаются. Какой заряд нужно сообщить шарикам, чтобы натяжение нитей стало равным 98 мН ? Расстояние от точки подвеса до центра шарика $l = 10\text{ см}$. Масса каждого шарика $m = 5\text{ г}$.

3.11 В вершинах правильного треугольника со сторонами $a = 10\text{ см}$ находятся заряды $q_1 = 10\text{ мКл}$, $q_2 = 20\text{ мКл}$ и $q_3 = 30\text{ мКл}$. Определить силу F , действующую на заряд q_1 со стороны двух других зарядов.

3.12. В вершинах квадрата находятся одинаковые заряды $q = 0,3\text{ нКл}$ каждый. Какой отрицательный заряд q_1 нужно поместить в центре квадрата, чтобы сила взаимного отталкивания положительных зарядов была уравновешена силой притяжения отрицательного заряда?

3.13. Два одинаковых проводящих заряженных шара находятся на расстоянии $r = 60\text{ см}$. Сила отталкивания F_1 шаров равна $70 \cdot 10^{-6}\text{ Н}$. После того, как шары привели в соприкосновение и удалили друг от друга на прежнее расстояние, сила отталкивания возросла и стала равной $F_2 = 1,6 \cdot 10^{-4}\text{ Н}$. Вычислить заряды q_1 и q_2 , которые были на шарах до их соприкосновения. Размерами шаров пренебречь.

3.14. Два одинаковых проводящих заряженных шара находятся на расстоянии $r = 30\text{ см}$. Сила притяжения F_1 шаров равна 90 мкН . После того, как шары привели в соприкосновение и удалили друг от друга на прежнее расстояние, сила отталкивания возросла и стала равной $F_2 = 160\text{ мкН}$. Вычислить заряды q_1 и q_2 , которые были на шарах до их соприкосновения. Размерами шаров пренебречь.

3.15. На шелковых нитях длиной $l=1$ м висят, соприкасаясь друг с другом, два шарика малого диаметра; масса шариков по $m=1$ г каждый. На какое расстояние разойдутся шарики, если каждому из них сообщить заряд $q=2 \cdot 10^{-4}$ Кл? Принять $g=10$ м/с².

3.16. Расстояние d между двумя точечными зарядами $q_1=+8$ нКл и $q_2=-5,3$ нКл равно 40 см. Вычислить напряженность E поля в точке, лежащей посередине между зарядами. Чему будет равна напряженность, если второй заряд будет положительным?

3.17. Электрическое поле создано двумя точечными зарядами $q_1=10$ нКл и $q_2=20$ нКл. Расстояние между зарядами $d=0,2$ м. Определить напряженность электрического поля в точке находящейся на расстоянии $r_1=0,4$ м от первого и $r_2=0,5$ м от второго заряда.

3.18. В трех вершинах квадрата со стороной $a=0,4$ м находятся одинаковые, положительные заряды по $q=5 \cdot 10^{-9}$ Кл каждый. Найти напряженность поля в четвертой вершине.

3.19. Два точечных заряда $q_1=2q$ и $q_2=-q$ находятся на расстоянии d друг от друга. Найти положение точки на прямой, проходящей через эти заряды, напряженность E поля в которой равна нулю.

3.20. Тонкая нить несет равномерно распределенный по длине заряд ($\tau=2$ мКл/м). Вблизи средней части нити на расстоянии $r=1$ см, малом по сравнению с ее длиной, находится точечный заряд $q=0,1$ мКл. Определить силу, действующую на заряд.

3.21. Расстояние между двумя длинными тонкими проволоками, расположенными параллельно друг другу, $d=16$ см. Проволоки равномерно заряжены разноименными зарядами с линейной плотностью $\tau=150$ нКл/м. Какова напряженность поля в точке, удаленной на $d=10$ см как от первой, так и от второй проволоки?

3.22. Очень длинная тонкая прямая проволока несет заряд, равномерно распределенный по всей ее длине. Вычислить линейную плотность τ заряда, если напряженность E поля на расстоянии $a=0,5$ м от проволоки против ее середины равна 200 В/м.

3.23. Электрическое поле создано двумя бесконечными параллельными пластинами, несущими одинаковый равномерно распределенный по площади заряд ($\sigma=1$ нКл/м²). Определить напряженность поля: 1) между пластинами; 2) вне пластин.

3.24. Электрическое поле создано двумя бесконечными параллельными пластинами, несущими равномерно распределенный по площади заряд с поверхностными плотностями $\sigma_1=1$ нКл/м² и $\sigma_2=3$ нКл/м². Определить напряженность поля: 1) между пластинами; 2) вне пластин.

3.25. Тонкое кольцо радиусом $R=8$ см несет заряд, равномерно распределенный с линейной плотностью $\tau=10$ нКл/м. Какова напряженность E электрического поля в точке, равноудаленной от всех точек кольца на расстояние $r=10$ см?

3.26. Электрическое поле создано двумя бесконечными параллельными пластинами, несущими равномерно распределенный по площади заряд с поверхностными плотностями $\sigma_1=2$ нКл/м² и $\sigma_2=-5$ нКл/м². Определить напряженность E поля: 1) между пластинами; 2) вне пластин. Построить график изменения напряженности вдоль линии, перпендикулярной пластинам.

3.27. Точечный заряд $q=1$ мкКл находится вблизи большой равномерно заряженной пластины против ее середины. Вычислить поверхностную плотность σ заряда пластины, если на точечный заряд действует сила $F=0,06$ Н.

3.28. Бесконечная плоскость несет заряд, равномерно распределенный с поверхностной плотностью $\sigma=1$ нКл/м². На некотором расстоянии от плоскости параллельно ей расположен круг радиусом $r=10$ см. Вычислить поток Φ_E вектора напряженности через этот круг.

3.29. Прямоугольная, плоская площадка со сторонами, длины a и b которых равны 3 и 2 см соответственно, находится на расстоянии $R=1$ м от точечного заряда $q=1$ мкКл. Площадка ориентирована так, что линии напряженности составляют угол $\alpha=30^\circ$ с ее поверхностью. Найти поток Φ_E вектора напряженности через площадку.

3.30. Электрическое поле создано тонкой бесконечно длинной нитью, равномерно заряженной с линейной плотностью τ равной 30 нКл/м. На расстоянии $a=20$ см от нити находится плоская круглая площадка радиусом $r=1$ см. Определить поток вектора напряженности через эту площадку, если плоскость ее составляет угол $\beta=30^\circ$ с линией напряженности, проходящей через середину площадки.

3.31. На окружности радиусом $R=2$ см на одинаковом расстоянии расположены электрические заряды $q_1=4,8 \cdot 10^{-7}$ Кл, $q_2=q_3=1,6 \cdot 10^{-7}$ Кл, $q_4=-1,6 \cdot 10^{-7}$ Кл. Определить потенциал электрического поля, образованного всеми зарядами в центре окружности.

3.32. Два точечных электрических заряда $q_1=2,64 \cdot 10^{-8}$ Кл и $q_2=3,3 \cdot 10^{-9}$ Кл находятся в вакууме на расстоянии 0,6 м один от другого. Какую работу следует совершить, чтобы сблизить заряды до расстояния 25 см?

3.33. Определить потенциал электрического поля в точке, удаленной от зарядов $q_1=-0,2$ мкКл и $q_2=0,5$ мкКл соответственно на расстояния $r_1=15$ см и $r_2=25$ см.

3.34. На какое расстояние могут сблизиться два электрона, если они движутся навстречу друг другу с относительной скоростью 10^8 см/с?

3.35. Шарик массой $m=1$ г и зарядом $q=1\cdot 10^{-3}$ Кл перемещается из точки А, потенциал которой $\varphi_A=600$ В, в точку В, потенциал которой равен нулю. Чему была равна его скорость в точке А, если в точке В она стала равной $V_B=20$ см/с?

3.36. Бесконечная, длинная тонкая нить несет равномерно распределенный по длине заряд с линейной плотностью $\tau=0,01$ мкКл/м. Определить разность потенциалов двух точек поля, удаленных от нити на расстояния $r_1=2$ см и $r_2=4$ см.

3.37. Вычислить потенциальную энергию системы двух точечных зарядов $q_1=100$ нКл и $q_2=10$ нКл, находящихся на расстоянии $r=10$ см друг от друга.

3.38. Металлический шарик диаметром $d=2$ см заряжен отрицательно до потенциала $\varphi=150$ В. Сколько электронов находится на поверхности шара?

3.39. Сто одинаковых капель ртути, заряженных до потенциала $\varphi=20$ В, сливаются в одну большую каплю. Каков потенциал образовавшейся капли?

3.40. На расстоянии $r_1=4$ см от бесконечно длинной заряженной нити находится точечный заряд $q=0,67\cdot 10^{-9}$ Кл. Под действием поля заряд перемещается до расстояния $r_2=2$ см, при этом совершается работа $A=5\cdot 10^6$ Дж. Найти плотность заряда нити.

3.41. Какова потенциальная энергия W_n системы четырех одинаковых точечных зарядов $q=10$ нКл, расположенных в вершинах квадрата со стороной длиной $a=10$ см.

3.42. Тонкий стержень длиной $l=10$ см несет равномерно распределенный заряд $q=1$ нКл. Определить потенциал φ электрического поля в точке, лежащей на оси стержня на расстоянии $a=20$ см от ближайшего его конца.

3.43. Две бесконечные параллельные плоскости находятся на расстоянии $d=0,5$ см друг от друга. На плоскостях равномерно распределены заряды с поверхностными плотностями $\sigma_1=0,2$ мкКл/м² и $\sigma_2=-0,3$ мкКл/м². Определить разность потенциалов U между плоскостями.

3.44. Напряженность E однородного электрического поля в некоторой точке равна 600 В/м. Вычислить разность потенциалов U между этой точкой и другой, лежащей на прямой, составляющей угол $\alpha=60^\circ$ с направлением вектора напряженности. Расстояние $\Delta r=1$ мм.

3.45. Заряженная частица, пройдя ускоряющую разность потенциалов $U=600$ кВ, приобрела скорость $V=5,4\cdot 10^6$ м/с. Определить удельный заряд частицы (отношение заряда к массе).

3.46. Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора равна $U=90$ В. Площадь каждой пластины $S=60$ см², заряд $q=10^{-9}$ Кл. На каком расстоянии друг от друга находятся пластины?

3.47. Два металлических шара радиусами $R_1=2$ см и $R_2=6$ см соединены проводником, емкостью которого можно пренебречь. Шарам сообщен заряд $q=1$ нКл. Найти поверхностную плотность σ зарядов на шарах.

3.48. Два одинаковых плоских воздушных конденсатора емкостью $C=100$ пФ каждый соединены в батарею последовательно. Определить, насколько изменится емкость батареи, если пространство между пластинами одного из конденсаторов заполнить парафином с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=2$.

3.49. К плоскому воздушному конденсатору, площадь пластин которого $S=60$ см², приложено напряжение $U=90$ В, при этом заряд конденсатора оказался равным $q=10^{-9}$ Кл. Определить емкость конденсатора, энергию, запасенную в нем, и расстояние между пластинами.

3.50. Между пластинами плоского конденсатора расстояние $d_1=2$ см, разность потенциалов $U_1=300$ В. Как изменится разность потенциалов, если пластины раздвинуть до расстояния $d_2=6$ см (поле считать однородным)?

3.51. Плоский конденсатор с площадью пластин $S=200$ см² каждая заряжен до разности потенциалов $U=2$ кВ. Расстояние между пластинами $d=2$ см; диэлектрик—стекло имеет диэлектрическую проницаемость $\varepsilon=7$. Определить энергию поля конденсатора и плотность энергии поля.

3.52. Шар радиусом $R_1=6$ см заряжен до потенциала $\varphi_1=300$ В, а шар радиусом $R_2=4$ см — до потенциала $\varphi_2=500$ В. Определить потенциал φ шаров после того, как их соединили металлическим проводником. Емкостью соединительного проводника пренебречь.

3.53. Плоский воздушный конденсатор емкостью $C=1,1 \cdot 10^{-8}$ Ф заряжен до разности потенциалов $\Delta\varphi=300$ В. После отключения от источника напряжения расстояние между пластинами конденсатора было увеличено в пять раз. Определить: 1) разность потенциалов на обкладках конденсатора после их раздвигания; 2) работу внешних сил по раздвиганию пластин.

3.54. Вычислить энергию электростатического поля металлического шара, которому сообщен заряд $q=100$ нКл, если диаметр шара $D=20$ см.

3.55. Пространство между пластинами плоского конденсатора объемом $V=20$ см³ заполнено диэлектриком ($\varepsilon=5$). Пластины конденсатора присоединены к источнику напряжения. При этом поверхностная плотность связанных зарядов на диэлектрике $\sigma=8,35 \cdot 10^{-6}$ Кл/м². Какую работу надо совершить против сил электрического поля, если удаление диэлектрика производится после отключения источника напряжения?

3.56. На пластинах плоского конденсатора равномерно распределен заряд с поверхностной плотностью $\sigma = 0,2 \text{ мкКл/м}^2$. Расстояние d между пластинами равно 1 мм. На сколько изменится разность потенциалов на его обкладках при увеличении расстояния d между пластинами до 3 мм?

3.57. В плоский конденсатор вдвинули плитку парафина толщиной $d = 1 \text{ см}$, которая вплотную прилегает к его пластинам. На сколько нужно увеличить расстояние между пластинами, чтобы получить прежнюю емкость?

3.58. Два конденсатора емкостями $C_1 = 3 \text{ мкФ}$ и $C_2 = 6 \text{ мкФ}$ соединены между собой и присоединены к батарее с ЭДС $\mathcal{E} = 120 \text{ В}$. Определить заряды q_1 и q_2 конденсаторов и разности потенциалов U_1 и U_2 между их обкладками, если конденсаторы соединены: 1) параллельно; 2) последовательно.

3.59. Емкость C плоского конденсатора равна $1,5 \text{ мкФ}$. Расстояние d между пластинами равно 5 мм. Какова будет емкость C конденсатора, если на нижнюю пластину положить лист эбонита толщиной $d_1 = 3 \text{ мм}$?

3.60. Конденсатор емкостью $C_1 = 0,2 \text{ мкФ}$ был заряжен до разности потенциалов $U_1 = 320 \text{ В}$. После того как его соединили параллельно со вторым конденсатором, заряженным до разности потенциалов $U_2 = 450 \text{ В}$, напряжение U на нем изменилось до 400 В. Вычислить емкость C_2 второго конденсатора.

3.61. Определить плотность тока в железном проводе длиной $l = 20 \text{ м}$, если провод находится под напряжением $U = 12 \text{ В}$. Удельное сопротивление железа $\rho = 9,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

3.62. Участок электрической цепи составлен из трех кусков провода одинаковой длины, изготовленных из одного и того же материала, соединенных последовательно. Сечения кусков провода равны $S_1 = 1 \text{ мм}^2$, $S_2 = 2 \text{ мм}^2$, $S_3 = 3 \text{ мм}^2$. Разность потенциалов на концах участка $U = 12 \text{ В}$. Найти разность потенциалов на каждом куске провода.

3.63. Аккумуляторная батарея, замкнутая на реостат сопротивлением $R = 20 \text{ Ом}$, создает в нем ток $I_1 = 1,170 \text{ А}$. Если сопротивление реостата увеличить в три раза, то ток станет равным $I_2 = 0,397 \text{ А}$. Определить ЭДС и внутреннее сопротивление источника, а также силу тока короткого замыкания.

3.64. Две группы из трех последовательно соединенных элементов соединены параллельно. ЭДС каждого элемента $\mathcal{E} = 1,2 \text{ В}$, внутреннее сопротивление $r = 0,2 \text{ Ом}$. Полученная батарея замкнута на внешнее сопротивление $R = 1,5 \text{ Ом}$. Найти силу тока во внешней цепи.

3.65. Какое сопротивление R нужно подключить к $n = 10$ одинаковым последовательно соединенным источникам с внутренним сопротивлением $r = 0,5 \text{ Ом}$, чтобы потребляемая полезная мощность была максимальной?

3.66. Источник постоянного тока с ЭДС $\varepsilon=120$ В и внутренним сопротивлением $r=5$ Ом включен в цепь. Какую наибольшую мощность может развить источник во внешней части цепи? При каком сопротивлении внешней части цепи это происходит? Чему равен КПД источника в этом случае?

3.67. Определить число электронов, проходящих за время $t=1$ с через поперечное сечение площадью $S=1\text{ мм}^2$ железной проволоки с удельным сопротивлением $\rho=9,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, длиной $l=20$ м при напряжении на ее концах $U=16$ В.

3.68. ЭДС батареи $\varepsilon=12$ В. При силе тока $I=4$ А КПД батареи $\eta=0,6$. Определить внутреннее сопротивление батареи.

3.69. Какое наименьшее число N одинаковых источников питания с ЭДС $\varepsilon=1$ В и внутренним сопротивлением $r=1$ Ом необходимо взять, чтобы на внешнем сопротивлении $R=10$ Ом выделялась максимальная мощность? Максимальная сила тока $I_{\text{max}}=2$ А.

3.70. ЭДС батареи $\varepsilon=16$ В, внутреннее сопротивление $r=3$ Ом. Найти сопротивление внешней цепи, если известно, что в ней выделяется мощность $N=16$ Вт. Определить КПД батареи.

3.71. Зашунтированный амперметр измеряет токи силой до $I=10$ А. Какую наибольшую силу тока может измерить этот амперметр без шунта, если сопротивление R_a амперметра равно $0,02$ Ом и сопротивление $R_{\text{ш}}$ шунта равно 5 мОм?

3.72. К источнику тока с ЭДС $\varepsilon=1,5$ В присоединили катушку с сопротивлением $R=0,1$ Ом. Амперметр показал силу тока, равную $I_1=0,5$ А. Когда к источнику тока присоединили последовательно еще один источник тока с такой же ЭДС, то сила тока I в той же катушке оказалась равной $0,4$ А. Определить внутренние сопротивления r_1 и r_2 первого и второго источников тока.

3.73. Лампочка и реостат, соединенные последовательно, присоединены к источнику тока. Напряжение U на зажимах лампочки равно 40 В, сопротивление R реостата равно 10 Ом. Внешняя цепь потребляет мощность $P=120$ Вт. Найти силу тока I в цепи.

3.74. При силе тока $I_1=3$ А во внешней цепи батареи аккумуляторов выделяется мощность $P_1=18$ Вт, при силе тока $I_2=1$ А – соответственно $P_2=10$ Вт. Определить ЭДС ε и внутреннее сопротивление r батареи.

3.75. К батарее аккумуляторов, ЭДС ε которой равна 2 В и внутреннее сопротивление $r=0,5$ Ом, присоединен проводник. Определить: 1) сопротивление R проводника, при котором мощность, выделяемая в нем, максимальна; 2) мощность P , которая при этом выделяется в проводнике.

3.76. Сила тока в проводнике сопротивлением $R=20$ Ом нарастает в течение времени $\Delta t=2$ с по линейному закону от $I_0=0$ до $I=6$ А. Определить количество теплоты Q_1 , выделившееся в этом проводнике за первую секунду, и количество теплоты Q_2 — за вторую секунду.

3.77. За время $t=20$ с, при равномерно возрастающей силе тока от нуля до некоторого максимума в проводнике сопротивлением $R=5$ Ом, выделилось количество теплоты $Q=4$ кДж. Определить скорость нарастания силы тока, если сопротивление проводника $R=5$ Ом.

3.78. Сила тока в проводнике сопротивлением $R=10$ Ом за время $t=50$ с равномерно возрастает от $I_1=5$ А до $I_2=10$ А. Определить количество теплоты Q , выделившееся за это время в проводнике.

3.79. В проводнике за время $t=10$ с при равномерном возрастании силы тока от $I_1=1$ А до $I_2=2$ А выделилось количество теплоты $Q=5$ кДж. Найти сопротивление R проводника.

3.80. За время $t=8$ с при равномерно возраставшей силе тока в проводнике сопротивлением $R=8$ Ом выделилось количество теплоты $Q=500$ Дж. Определить заряд q , протекающий в проводнике, если сила тока в момент времени $t=0$ равна нулю.

3.81. Обмотка электрического кипятильника имеет две секции. Если включена только первая секция, то вода закипает через $t_1=15$ мин, если только вторая, то через $t_2=30$ мин. Через какое время закипит вода, если обе секции включить последовательно? Параллельно?

3.82. Сила тока в проводнике сопротивлением $R=12$ Ом равномерно убывает от $I_0=5$ А до $I=0$ в течение времени $t=10$ с. Какое количество теплоты Q выделяется в этом проводнике за указанный промежуток времени?

3.83. Резистор сопротивлением $R=6$ Ом подключен к двум параллельно соединенным источникам тока с ЭДС $\varepsilon_1=2,2$ В и $\varepsilon_2=2,4$ В и внутренними сопротивлениями $r_1=0,8$ Ом и $r_2=0,20$ м. Определить силу тока I в этом резисторе и напряжение U на зажимах второго источника тока.

3.84. Определить силу тока в каждом элементе и напряжение на зажимах реостата (рис. 9), если $\varepsilon_1=12$ В, $r_1=1$ Ом, $\varepsilon_2=6$ В, $r_2=1,5$ Ом и $R=20$ Ом.

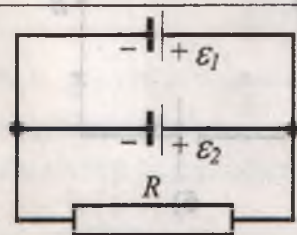


Рис. 9

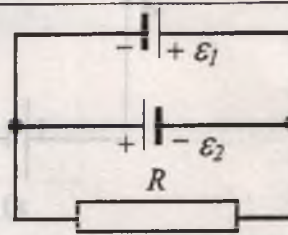
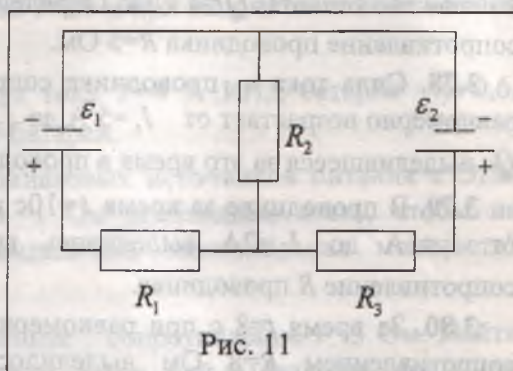


Рис. 10

3.85. Два источника тока, у которых $\varepsilon_1=8$ В, $r_1=2$ Ом, $\varepsilon_2=6$ В, $r_2=1,5$ Ом, и резистор сопротивлением $R=10$ Ом соединены, как показано на рис.10. Вычислить силу тока, текущего через резистор.

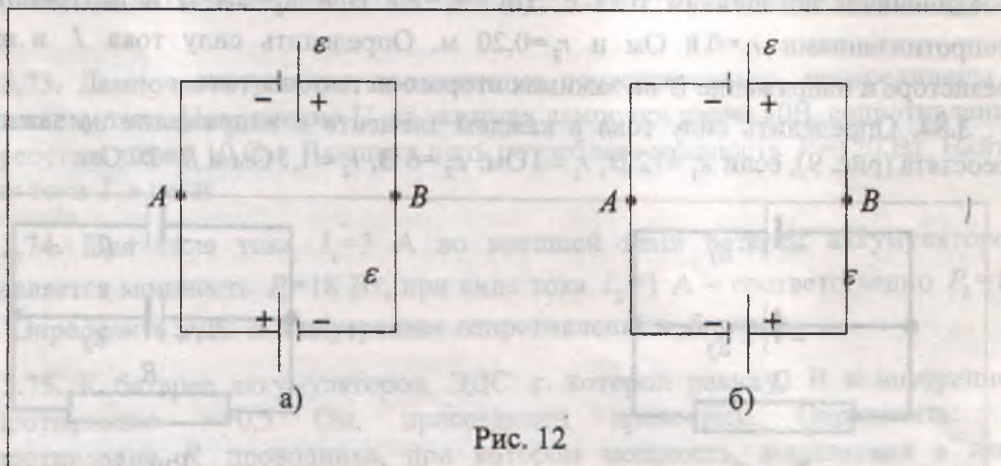
3.86. Определить силу тока в резисторе R_3 (рис. 11) и напряжение на концах этого резистора, если $\varepsilon_1=4$ В, $\varepsilon_2=3$ В, $R_1=2$ Ом, $R_2=6$ Ом, $R_3=1$ Ом. Внутренними сопротивлениями источников тока пренебречь.



3.87. Три батареи с ЭДС $\varepsilon_1=8$ В, $\varepsilon_2=3$ В и $\varepsilon_3=4$ В и внутренними сопротивлениями $r=2$ Ом каждое соединены одноименными полюсами. Пренебрегая сопротивлением соединительных проводов, определить силы токов, идущих через батареи.

3.88. Сила тока в проводнике, сопротивлением $R=20$ Ом, изменяется со временем по закону $I=4+2t$, где I выражено в амперах и t в секундах. Какое количество теплоты выделится за промежуток времени от $t_1=0$ с до $t_2=4$ с?

389. Два одинаковых источника с ЭДС $\varepsilon=1,2$ В и внутренним сопротивлением $r=0,4$ Ом соединены, как показано на рис. 12 а, б. Определить силу тока I в цепи и разность потенциалов U между точками A и B .



3.90. Три сопротивления $R_1=5$ Ом, $R_2=1$ Ом и $R_3=3$ Ом, а также источник тока с ЭДС $\mathcal{E}_1=1,4$ В соединены, как показано на рис. 13. Определить ЭДС \mathcal{E} источника тока, который надо подключить в цепь между точками A и B , чтобы в сопротивлении R_3 шел ток силой $I=1$ А в направлении, указанном стрелкой. Сопротивлением источника тока пренебречь.

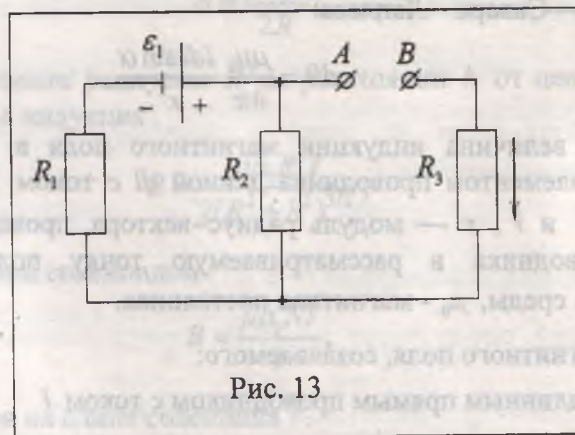


Рис. 13

РАЗДЕЛ IV

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Основные формулы.

- Закон Био—Савара—Лапласа:

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2},$$

где dB — величина индукции магнитного поля в произвольной точке, создаваемого элементом проводника длиной dl с током I ; α — угол между векторами Idl и \vec{r} ; r — модуль радиус-вектора, проведенного от середины элемента проводника в рассматриваемую точку поля; μ — магнитная проницаемость среды, μ_0 — магнитная постоянная.

- Индукция магнитного поля, создаваемого:

а) бесконечно длинным прямым проводником с током I

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r_0},$$

где r_0 — расстояние от оси проводника до точки, в которой определяется магнитная индукция;

б) отрезком проводника с током I на расстоянии r_0 от него (рис. 14 а)

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2)$$

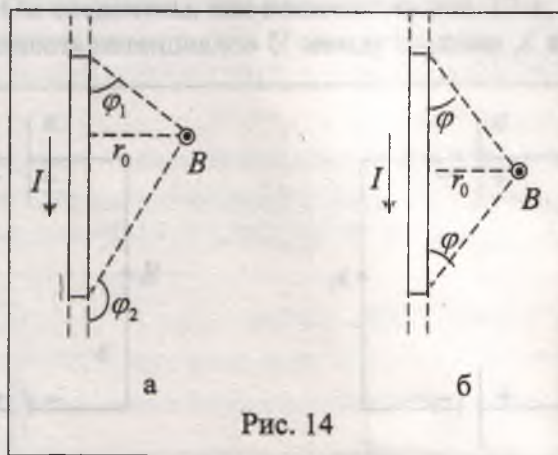


Рис. 14

При симметричном расположении концов проводника относительно точки, в которой определяется магнитная индукция проводника (рис. 14 б)

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r_0} \cos \varphi.$$

в) в центре кругового проводника (витка) радиуса R

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R};$$

г) круговым проводником радиусом R на расстоянии h от центра до точки, в которой определяется индукция

$$B = \frac{\mu\mu_0 R^2 I}{2(R^2 + h^2)^{3/2}};$$

д) бесконечно длинным соленоидом

$$B = \frac{\mu\mu_0 NI}{l},$$

где N — число витков на длине соленоида l .

• Связь магнитной индукции \vec{B} с напряженностью \vec{H} магнитного поля:

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H},$$

где μ — магнитная проницаемость среды; μ_0 — магнитная постоянная.

• Принцип суперпозиции магнитных полей (индукция и напряженность результирующего магнитного поля)

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i; \quad \vec{H} = \sum_{i=1}^n \vec{H}_i.$$

• Магнитный момент контура с током

$$\vec{p}_m = IS\vec{n},$$

где S — площадь контура; \vec{n} — единичный вектор нормали к плоскости контура.

• Сила, действующая на элемент тока в магнитном поле (закон Ампера),

$$d\vec{F} = I[d\vec{l} \times \vec{B}], \quad \text{или} \quad dF = IdlB \sin \alpha,$$

где α — угол между векторами $d\vec{l}$ и \vec{B} .

• Механический (вращательный) момент, действующий на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле,

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}], \quad \text{или} \quad M = p_m B \sin \alpha,$$

где α — угол между векторами \vec{p}_m и \vec{B} .

- Закон полного тока для произвольной среды:

$$\oint_L \vec{H}_1 \cdot d\vec{l} = \sum_{i=1}^n I_i,$$

где $\sum_{i=1}^n I_i$ — алгебраическая сумма токов, охватываемых контуром, n — число токов.

- Сила, действующая на заряд q , движущийся в магнитном поле со скоростью \vec{V} (сила Лоренца);

$$\vec{F}_L = q[\vec{V}\vec{B}], \quad \text{или} \quad F_L = qVB \sin \alpha,$$

где α — угол между векторами \vec{V} и \vec{B} .

- Магнитный поток через плоский контур (поток вектора магнитной индукции)

$$d\Phi = (\vec{B}d\vec{S}), \quad \text{или} \quad \Phi = BS \cos \alpha,$$

где α — угол между \vec{B} и нормалью \vec{n} к плоскости контура S .

- Закон электромагнитной индукции:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

где ε_i — ЭДС индукции.

- Потокосцепление (полный магнитный поток, сцепленный со всеми N витками соленоида или тороида)

$$\psi = N\Phi = LI,$$

где L — индуктивность соленоида или тороида.

- Работа при перемещении проводника с током в магнитном поле

$$dA = Id\Phi,$$

где $d\Phi$ — изменение магнитного потока через контур при его перемещении.

- ЭДС самоиндукции:

$$\varepsilon_i = -L \frac{dI}{dt}.$$

- Индуктивность катушки (когда $l \gg d$)

$$L = \mu\mu_0 n^2 l S,$$

где n — количество витков катушки на единицу длины; l — длина катушки; S — площадь сечения катушки.

• Мгновенное значение силы тока в цепи, обладающей сопротивлением R и индуктивностью L :

а) $I = \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$ — при замыкании цепи, где ε — ЭДС

источника тока; t — время, прошедшее после замыкания цепи;

б) $I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}$ — при размыкании цепи, где I_0 — сила тока

в цепи при $t = 0$; t — время, прошедшее с момента размыкания цепи.

• Энергия магнитного поля

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

• Объемная плотность энергии магнитного поля (отношение энергии магнитного поля соленоида к его объему)

$$w = \frac{W}{V} \quad \text{или} \quad w = \frac{BH}{2},$$

где B — магнитная индукция; H — напряженность магнитного поля.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1. Два параллельных бесконечно длинных провода D и C , по которым текут в одном направлении электрические токи силой $I = 60$ А, расположены на расстоянии $d = 10$ см друг от друга. Определить магнитную индукцию B поля, создаваемого проводниками с током в точке A (рис. 15), отстоящей от оси одного проводника на расстоянии $r_1 = 5$ см, от другого на расстоянии $r_2 = 12$ см.

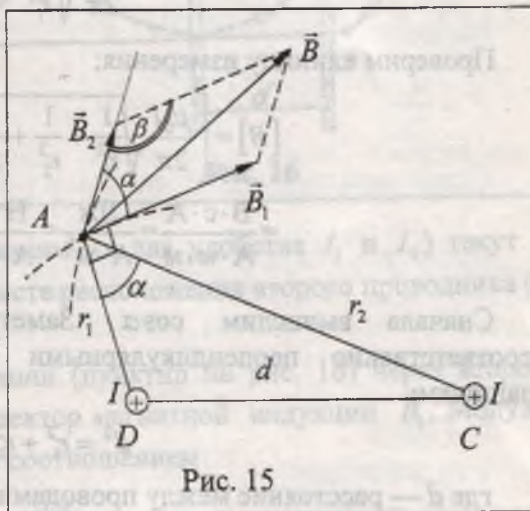


Рис. 15

Дано:

$$I_1 = I_2 = I = 60 \text{ А}$$

$$d = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$r_1 = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м}$$

$$r_2 = 12 \text{ см} = 0,12 \text{ м}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$$

$B = ?$

Решение. Для нахождения магнитной индукции B в точке A воспользуемся принципом суперпозиции магнитных полей. Для этого определим направления магнитных индукций \vec{B}_1 и \vec{B}_2 полей, создаваемых каждым проводником с током в отдельности, и сложим их геометрически:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2.$$

Модуль вектора \vec{B} может быть найден по теореме косинусов:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 - 2B_1B_2 \cos \beta}, \quad (1)$$

где β будет равен $180^\circ - \alpha$, а $\cos(180^\circ - \alpha) = -\cos \alpha$.

Магнитные индукции B_1 и B_2 выражаются соответственно через силу тока I и расстояния r_1 и r_2 от проводов до точки A :

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_1}; \quad B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_2}.$$

Подставляя выражения B_1 и B_2 в формулу (1) и вынося $\frac{\mu_0 I}{2\pi}$ за знак корня, получаем:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} + \frac{2}{r_1 r_2} \cos \alpha}. \quad (2)$$

Проверим единицу измерения:

$$\begin{aligned} [B] &= \left[\frac{\mu_0 I}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} + \frac{2}{r_1 r_2} \cos \alpha} \right] = \frac{\Gamma \cdot \text{н} \cdot \text{А}}{\text{м}} \sqrt{\frac{1}{\text{м}^2}} = \\ &= \frac{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А}}{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \text{Тл}. \end{aligned}$$

Сначала вычислим $\cos \alpha$. Заметив, что $\alpha = \angle DAC$ (как углы с соответственно перпендикулярными сторонами), по теореме косинусов запишем:

$$d^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \alpha,$$

где d — расстояние между проводами.

Отсюда

$$\cos \alpha = \frac{r_1^2 + r_2^2 - d^2}{2r_1 r_2} = \frac{5^2 + 12^2 - 10^2}{2 \cdot 5 \cdot 12} = \frac{23}{40} = 0,575.$$

Подставим в формулу (2) числовые значения физических величин и произведем вычисления:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} + \frac{2}{r_1 r_2} \cos \alpha} =$$

$$= \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 60}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{1}{0,0025} + \frac{1}{0,0144} + \frac{2}{0,05 \cdot 0,12} \cdot \frac{23}{40}} =$$

$$= 3,08 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

Ответ: магнитная индукция, создаваемая проводниками с током в точке А, равна $B = 3,08 \cdot 10^{-4}$ Тл.

Пример 2. По двум параллельным прямым проводам длиной $l=2,5$ м каждый, находящимся на расстоянии $d=20$ см друг от друга, текут одинаковые токи $I=1$ кА. Вычислить силу взаимодействия токов, при $\mu=1$.

Дано:

$$l_1 = l_2 = l = 2,5 \text{ м}$$

$$d = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$$

$$I_1 = I_2 = I = 1 \text{ кА} = 10^3 \text{ А}$$

$$\mu = 1$$

$$F = ?$$

Решение. Взаимодействие двух проводников, по которым текут токи, осуществляется через магнитное поле. Каждый ток создаст магнитное поле, которое действует на другой проводник.

Предположим, что оба тока (обозначим их для удобства I_1 и I_2) текут в одном направлении. Ток I_1 создает в месте расположения второго проводника (с током I_2) магнитное поле.

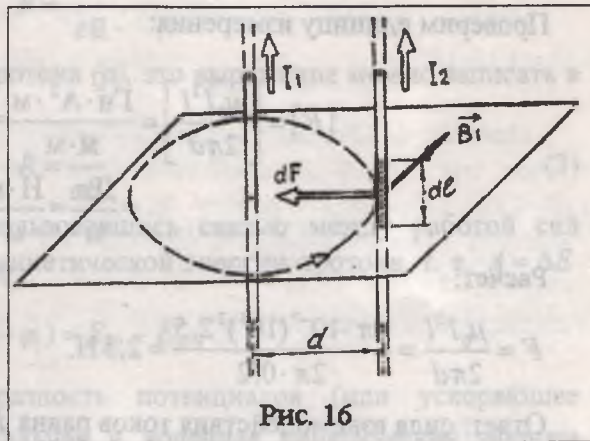
Проведем линию магнитной индукции (пунктир на рис. 16) через второй проводник и по касательной к ней — вектор магнитной индукции \vec{B}_1 . Модуль магнитной индукции B_1 определяется соотношением

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d}. \quad (1)$$

Согласно закону Ампера, на каждый элемент второго проводника с током I_2 длиной dl действует в магнитном поле сила

$$dF = I_2 B_1 dl \sin(\vec{dl} \cdot \vec{B}).$$

Так как вектор \vec{dl} перпендикулярен вектору \vec{B}_1 то $\sin(\vec{dl} \cdot \vec{B}) = 1$ и тогда



$$dF = I_2 B_1 dl.$$

Подставив в это выражение B_1 согласно соотношению (1), получим:

$$dF = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} dl.$$

Направление силы определяется правилом левой руки.

Силу F взаимодействия проводов с током найдем интегрированием:

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \int_0^l dl = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} l.$$

Заметив, что $I_1 = I_2 = I$, получим:

$$F = \frac{\mu_0 I^2 l}{2\pi d}.$$

Проверим единицу измерения:

$$[F] = \left[\frac{\mu_0 I^2 l}{2\pi d} \right] = \frac{\text{Гн} \cdot \text{А}^2 \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Гн} \cdot \text{А}^2}{\text{м}} = \frac{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А}^2}{\text{А} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}} = \text{Н}$$

Расчет:

$$F = \frac{\mu_0 I^2 l}{2\pi d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} (10^3)^2 2,5}{2\pi \cdot 0,2} = 2,5 \text{ Н}.$$

Ответ: сила взаимодействия токов равна $F = 2,5 \text{ Н}$.

Пример 3. Протон, прошедший ускоряющую разность потенциалов $U = 600 \text{ В}$, влетел в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,3 \text{ Тл}$ и начал двигаться по окружности. Вычислить радиус R окружности.

Дано:

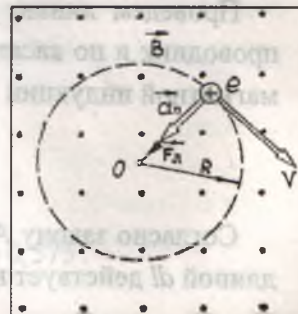
$$U = 600 \text{ В}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$B = 0,3 \text{ Тл}$$

$R = ?$



Решение. Радиус кривизны траектории протона определим, исходя из следующих соображений: на движущиеся в магнитном поле протон действует

Рис. 17

сила Лоренца \vec{F}_n (действием силы тяжести можно пренебречь). Вектор силы Лоренца перпендикулярен вектору скорости и, следовательно, по второму закону Ньютона, сообщает протону нормальное ускорение \vec{a}_n :

$$\vec{F}_n = m\vec{a}_n, \quad (1)$$

В скалярной форме $F_n = eVB \sin \alpha$. В нашем случае $\vec{V} \perp \vec{B}$ и $\sin \alpha = 1$, тогда $F_n = eVB$. Так как нормальное ускорение $a_n = \frac{V^2}{R}$, то соотношение (1) примет вид:

$$eVB = \frac{mV^2}{R} \quad (2)$$

Отсюда находим радиус окружности

$$R = \frac{mV}{eB}.$$

Заметив, что mV есть импульс протона (p), это выражение можно записать в виде

$$R = \frac{p}{eB} \quad (3)$$

Импульс протона найдем, воспользовавшись связью между работой сил электрического поля и изменением кинетической энергии протона, т. е. $A = \Delta E$ или

$$e(\varphi_2 - \varphi_1) = E_{k2} - E_{k1},$$

где $\varphi_2 - \varphi_1$ — ускоряющая разность потенциалов (или ускоряющее напряжение U); E_{k1} и E_{k2} — начальная и конечная кинетические энергии протона.

Пренебрегая начальной кинетической энергией протона ($E_{k1} \approx 0$) и выразив кинетическую энергию E_{k2} через импульс p , получим:

$$eU = \frac{mV^2}{2} \quad eU = \frac{p^2}{2m}$$

Найдем из этого выражения импульс $p = \sqrt{2meU}$ и подставим его в формулу(3):

$$R = \frac{\sqrt{2meU}}{eB}.$$

Или

$$R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{e}}. \quad (4)$$

Сделаем проверку единиц измерения:

$$\begin{aligned}
 [R] &= \left[\frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{e}} \right] = \frac{1}{\text{Тл}} \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{В}}{\text{Кл}}} = \frac{\text{А} \cdot \text{м}}{\text{Н}} \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{В}^2}{\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{В}}} \\
 &= \frac{\text{А} \cdot \text{м}}{\text{Н}} \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{В}^2}{\text{Дж}}} = \frac{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{В}}{\text{Н}} \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}^2}} = \\
 &= \frac{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{В} \cdot \text{с}}{\text{Н} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Н}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Н}} = \text{м}.
 \end{aligned}$$

Расчет:

$$R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{e}} = \frac{1}{0,3} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 600}{1,6 \cdot 10^{-19}}} = 1,18 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Ответ: радиус окружности, по которой движется протон, равен $R = 1,18 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

Пример 4. Плоский квадратный контур со стороной $a = 10 \text{ см}$, по которому течет ток $I = 100 \text{ А}$, свободно установился в однородном магнитном поле ($B = 1 \text{ Тл}$). Определить работу A , совершаемую внешними силами при повороте контура относительно оси, проходящей через середину его противоположных сторон на угол: 1) $\varphi_1 = 90^\circ$; 2) $\varphi_2 = 3^\circ$. При повороте контура сила тока в нем поддерживается неизменной.

Дано:

$$a = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$I = 100 \text{ А} = \text{const}$$

$$B = 1 \text{ Тл}$$

$$\varphi_1 = 90^\circ$$

$$\varphi_2 = 3^\circ = 0,0523$$

$$A_1 - ? \quad A_2 - ?$$

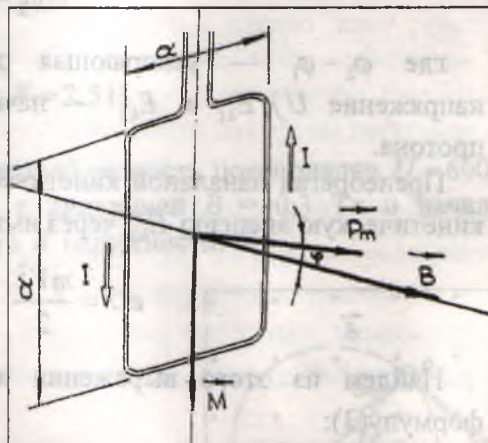


Рис. 18

Решение. Как известно, на контур с током в магнитном поле действует момент силы (рис. 18)

$$M = p_m B \sin \varphi$$

(1),

где $p_m = IS = Ia^2$ — магнитный момент контура; B — магнитная индукция; φ — угол между векторами \vec{p}_m (направлен по нормали к контуру) и \vec{B} .

По условию задачи в начальном положении контур свободно установился в магнитном поле. При этом момент силы равен нулю ($M=0$), а значит, $\varphi=0$, т.е. векторы \vec{p}_m и \vec{B} сонаправлены. Если внешние силы выведут контур из положения равновесия, то возникший момент сил будет стремиться возвратить контур в исходное положение. Против этого момента и будет совершаться работа внешними силами. Так как момент сил переменный (зависит от угла поворота φ), то для малых углов $d\varphi$ работу можно рассчитать по формуле $dA = Md\varphi$. Учитывая формулу (1), получим:

$$dA = IBa^2 \sin \varphi d\varphi.$$

Взяв интеграл от этого выражения, найдем работу при повороте на конечный угол:

$$A = IBa^2 \int_0^{\varphi} \sin \varphi d\varphi. \quad (2)$$

Работа при повороте на угол $\varphi=90^\circ$ определяется по формуле

$$A_1 = IBa^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi d\varphi = IBa^2 |(-\cos \varphi)|_0^{\frac{\pi}{2}} = IBa^2. \quad (3)$$

Работа при повороте на угол $\varphi_2=3^\circ$. В этом случае, учитывая, что угол φ_2 мал, заменим в выражении (2) $\sin \varphi \approx \varphi$:

$$A_2 = IBa^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi d\varphi = \frac{1}{2} IBa^2 \varphi_2^2. \quad (4)$$

Сделаем проверку единиц измерения:

$$[A] = [IBa^2] = A \cdot T \cdot l \cdot m^2 = A \cdot \frac{H}{A \cdot m} m^2 = H \cdot m = Дж$$

Расчет: $A_1 = IBa^2 = 100 \cdot 1 \cdot 0,1^2 = 1 Дж$.

$$A_2 = \frac{1}{2} IBa^2 \varphi_2^2 = \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 1 \cdot 0,1^2 \cdot 0,0523^2 = 1,37 \cdot 10^{-3} Дж.$$

Задачу можно решить и другим способом. Работа внешних сил по перемещению контура с током в магнитном поле равна произведению силы тока в контуре на изменение магнитного потока, пронизывающего контур:

$$A = -I \Delta \Phi = I(\Phi_1 - \Phi_2),$$

где Φ_1 — магнитный поток, пронизывающий контур до перемещения; Φ_2 — то же, после перемещения.

Если $\phi_1 = 90^\circ$, то $\Phi_1 = BS$, $\Phi_2 = 0$. Следовательно,

$$A = IBS = IBa^2,$$

что совпадает с уравнением (3).

Ответ: работа, совершаемая внешними силами, по повороту рамки на угол 90° равна $A_1 = 1$ Дж, а на 3° $A_2 = 1,37 \cdot 10^3$ Дж.

Пример 5. В однородном магнитном поле ($B = 0,1$ Тл) равномерно с частотой $n = 10 \text{ с}^{-1}$ вращается рамка, содержащая $N = 1000$ витков, плотно прилегающих друг к другу. Площадь S рамки равна 150 см^2 . Определить мгновенное значение ЭДС индукции, соответствующее углу ϕ поворота рамки, равному 30° .

Дано:

$$B = 0,1 \text{ Тл}$$

$$n = 10 \text{ с}^{-1}$$

$$\phi = 30^\circ$$

$$N = 1000$$

$$S = 150 \text{ см}^2 = 0,015 \text{ м}^2$$

$$\varepsilon_i = ?$$

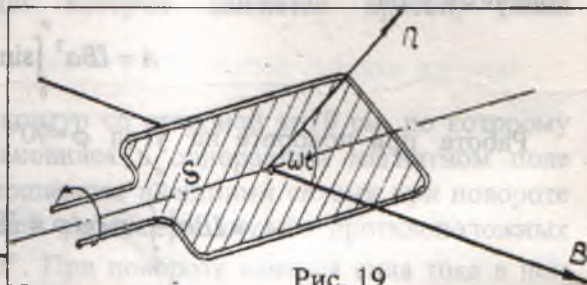


Рис. 19

Решение. Мгновенное значение ЭДС индукции ε_i определяется основным уравнением электромагнитной индукции Фарадея—Максвелла:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\psi}{dt}, \quad (1)$$

где ψ — потокосцепление.

Потокосцепление ψ связано с магнитным потоком Φ и числом N витков, плотно прилегающих друг к другу, соотношением

$$\psi = N\Phi. \quad (2)$$

Подставляя выражения ψ в формулу (1), получаем:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3)$$

При вращении рамки (рис. 19) магнитный поток Φ , пронизывающий рамку в момент времени t , определяется соотношением

$$\Phi = BS \cos \omega t,$$

где B — магнитная индукция; S — площадь рамки; ω — круговая (или циклическая) частота вращения рамки.

Подставив в формулу (2) выражение Φ и продифференцировав полученное выражение по времени, найдем мгновенное значение ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = NBS\omega \sin \omega t. \quad (4)$$

Круговая частота ω связана с частотой вращения n соотношением

$$\omega = 2\pi n.$$

Подставляя выражение ω в формулу (4) и заменив ωt на φ получим:

$$\varepsilon_i = 2\pi n NBS \sin \varphi.$$

Проверим единицу измерения:

$$\begin{aligned} [\varepsilon_i] &= [2\pi n NBS \sin \varphi] = \frac{1}{c} \text{Тл} \cdot \text{м}^2 = \frac{1}{c} \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \cdot \text{м}^2 = \\ &= \frac{\text{Дж}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \frac{\text{А} \cdot \text{В} \cdot \text{с}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \text{В}. \end{aligned}$$

Расчет:

$$\varepsilon_i = 2\pi n NBS \sin \varphi = 2\pi \cdot 10 \cdot 1000 \cdot 0,1 \cdot 0,015 \cdot 0,5 = 47,1 \text{ В}.$$

Ответ: мгновенное значение ЭДС индукции, соответствующее повороту рамки на угол 30° , равно $\varepsilon_i = 47,1 \text{ В}$.

Пример 6. Соленоид, сопротивление которого $R=2 \text{ Ом}$, подключается к аккумулятору с ЭДС $\varepsilon=8 \text{ В}$. Спустя время $t=0,01 \text{ с}$, сила тока в цепи достигает значения $I=1 \text{ А}$. Определить индуктивность соленоида, если сопротивление аккумулятора ничтожно мало.

Дано:

$$R = 2 \text{ Ом}$$

$$\varepsilon = 8 \text{ В}$$

$$t = 0,01 \text{ с}$$

$$I = 1 \text{ А}$$

$$r = 0$$

$L = ?$

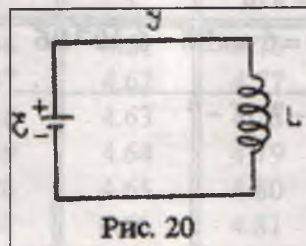


Рис. 20

Решение. Зависимость силы тока от времени, прошедшего с момента замыкания соленоида, определяется соотношением

$$I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right), \quad (1)$$

где I_0 — сила тока, устанавливающаяся после затухания индукционных явлений (определяется по закону Ома для полной цепи):

$$I_0 = \frac{\varepsilon}{R} \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) находим:

$$L = \frac{Rt}{\ln \frac{\varepsilon}{\varepsilon - IR}}$$

Проверим единицу измерения:

$$[L] = \left[\frac{Rt}{\ln \frac{\varepsilon}{\varepsilon - IR}} \right] = \frac{\text{Ом} \cdot \text{с}}{\ln \frac{\text{В}}{\text{В} - \text{А} \cdot \text{Ом}}} = \text{Ом} \cdot \text{с} = \text{Гн}$$

Расчет:

$$L = \frac{Rt}{\ln \frac{\varepsilon}{\varepsilon - IR}} = \frac{2 \cdot 0,01}{\ln \frac{8}{8 - 1 \cdot 2}} = 0,07 \text{ Гн.}$$

Ответ: индуктивность соленоида равна $L = 0,07 \text{ Гн}$.

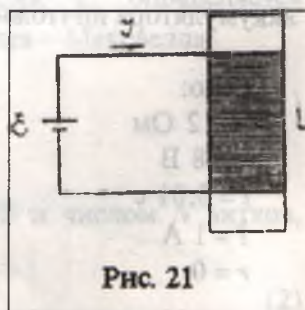
Пример 7. Соленоид с сердечником из немагнитного материала содержит $N = 1200$ витков провода, плотно прилегающих друг к другу. При силе тока $I = 4 \text{ А}$ магнитный поток $\Phi = 6 \text{ мкВб}$. Определить индуктивность L соленоида и энергию W магнитного поля соленоида.

$$N = 1200$$

$$I = 4 \text{ А}$$

$$\Phi = 6 \text{ мкВб} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Вб}$$

$$L - ? \quad W - ?$$



Решение. Индуктивность L связана с потокоцеплением ψ и силой тока I соотношением

$$\psi = LI. \quad (1)$$

Потокоцепление, в свою очередь, может быть определено через поток Φ и число витков N (при условии, что витки плотно прилегают друг к другу):

$$\psi = N\Phi. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) находим индуктивность соленоида

$$L = \frac{N\Phi}{I}. \quad (3)$$

Энергия магнитного поля соленоида $W = \frac{1}{2}LI^2$.

Выразим L согласно (3), получим:

$$W = \frac{1}{2}N\Phi I. \quad (4)$$

Проверим единицы измерения:

$$[L] = \left[\frac{N\Phi}{I} \right] = \frac{\text{Вб}}{\text{А}} = \text{Гн}; \quad [W] = \left[\frac{N\Phi I}{2} \right] = \text{Вб} \cdot \text{А} = \text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А} = \text{Дж}.$$

Подставим в формулы (3) и (4) значения физических величин и произведем вычисления:

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \frac{1,2 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{4} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

$$W = \frac{N\Phi I}{2} = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}.$$

Ответ: индуктивность соленоида равна $L = 1,8 \cdot 10^{-3}$ Гн; энергия магнитного поля в нем равна $W = 1,44 \cdot 10^{-2}$ Дж.

Таблица вариантов к контрольной работе №4

Вариант	Номера задач					
	1	2	3	4	5	6
1	4.01	4.16	4.31	4.46	4.61	4.76
2	4.02	4.17	4.32	4.47	4.62	4.77
3	4.03	4.18	4.33	4.48	4.63	4.78
4	4.04	4.19	4.34	4.49	4.64	4.79
5	4.05	4.20	4.35	4.50	4.65	4.80
6	4.06	4.21	4.36	4.51	4.66	4.81
7	4.07	4.22	4.37	4.52	4.67	4.82
8	4.08	4.23	4.38	4.53	4.68	4.83
9	4.09	4.24	4.39	4.54	4.69	4.84
10	4.10	4.25	4.40	4.55	4.70	4.85
11	4.11	4.26	4.41	4.56	4.71	4.86
12	4.12	4.27	4.42	4.57	4.72	4.87
13	4.13	4.28	4.43	4.58	4.73	4.88
14	4.14	4.29	4.44	4.59	4.74	4.89
15	4.15	4.30	4.45	4.60	4.75	4.90

4.01 Два длинных параллельных провода находятся на расстоянии $r=5$ см один от другого. По проводам текут в противоположных направлениях одинаковые токи $I=10$ А каждый. Найти напряженность H магнитного поля в точке, находящейся на расстоянии $r_1=2$ см от одного и $r_2=3$ см от другого провода.

4.02 Два длинных параллельных провода находятся на расстоянии $r=10$ см один от другого. По проводам текут в одном направлении одинаковые токи $I=10$ А каждый. Найти напряженность H магнитного поля в точке, находящейся на расстоянии $r_1=6$ см от одного и $r_2=4$ см от другого провода.

4.03 По двум длинным прямолинейным проводам, находящимся на расстоянии $r=5$ см друг от друга в воздухе текут токи $I=10$ А каждый. Определить магнитную индукцию B поля, создаваемого токами в точке, лежащей посередине между проводами, для случаев: 1) токи текут в одном направлении; 2) токи текут в противоположных направлениях.

4.04 При какой силе тока I , текущего по тонкому проводящему кольцу радиусом $R=0,2$ м, магнитная индукция B в точке, равноудаленной от всех точек кольца на расстояние $r=0,3$ м, станет равной 20 мкТл?

4.05 Два круговых витка радиусом $R=4$ см каждый расположены в параллельных плоскостях на расстоянии $d=0,1$ м друг от друга. По виткам текут токи $I_1=I_2=2$ А. Найти напряженность магнитного поля на оси витков в точке, находящейся на равном расстоянии от них. Задачу решить для случаев: 1) токи в витках текут в одном направлении; 2) токи текут в противоположных направлениях.

4.06 По тонкому проводнику, изогнутому в виде правильного шестиугольника со стороной $a=10$ см, идет ток $I=20$ А. Определить магнитную индукцию B в центре шестиугольника.

4.07 Обмотка соленоида содержит два слоя плотно прилегающих друг к другу витков провода диаметром $d=0,2$ мм. Определить магнитную индукцию B на оси соленоида, если по проводу идет ток $I=0,5$ А.

4.08 Какова индукция магнитного поля в центре квадрата со стороной $a=10$ см, если по его периметру протекает ток силой $I=20$ А?

4.09 Ток силой $I=20$ А идет по очень длинному проводу, согнутому под углом $\alpha=120^\circ$. Какова индукция магнитного поля в точке на биссектрисе угла на расстоянии $r=4$ см от его вершины?

4.10 Проводник согнут в виде правильного треугольника со стороной $a=20$ см. Какой ток протекает по периметру треугольника, если в его центре напряженность поля равна $H=71,64$ А/м?

4.11 Сколько витков приходится на единицу длины соленоида, если при силе тока $I=20$ А внутри соленоида образуется магнитное поле $H=5 \cdot 10^4$ А/м?

4.12 Напряженность H магнитного поля в центре кругового витка радиусом $R=8$ см равна 30 А/м. Определить напряженность H_1 поля витка в точке, расположенной на расстоянии $d=6$ см от центра витка.

4.13 По тонкому проводу, изогнутому в виде прямоугольника, течет ток $I=60$ А. Длины сторон прямоугольника равны $a=30$ см и $b=40$ см. Определить магнитную индукцию B в точке пересечения диагоналей.

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

4.15 По двум одинаковым круговым виткам радиусом $R=5$ см, плоскости которых взаимно перпендикулярны, а центры совпадают, текут одинаковые токи силой $I=2$ А. Найти индукцию магнитного поля в центре витков.

4.16 На прямой провод длиной $l=0,5$ м при силе тока в нем $I=4$ А действует однородное магнитное поле с силой $F=2,8$ Н, когда проводник образует угол $\frac{\pi}{2}$ с линиями индукции. Определить величину индукции поля. С какой силой будет действовать на проводник то же поле при угле $\alpha=30^\circ$?

4.17 Двухпроводная линия состоит из длинных параллельных прямых проводов, находящихся на расстоянии $d=4$ мм друг от друга. По проводам текут одинаковые токи $I=50$ А. Определить силу взаимодействия токов, приходящуюся на единицу длины провода.

4.18 По двум параллельным проводам длиной $l=1$ м каждый текут одинаковые токи. Расстояние d между проводами равно 1 см. Токи взаимодействуют с силой $F=1$ мН. Найти силу тока I в проводах.

4.19 Рамка с током силой $I=5$ А содержит $N=20$ витков тонкого провода. Определить магнитный момент p_m рамки с током, если ее площадь $S=10$ см².

4.20 Магнитный момент p_m витка равен $0,2$ А·м². Определить силу тока I в витке, если его диаметр $d=10$ см.

4.21 По кольцу радиусом R течет ток. На оси кольца на расстоянии $d=1$ м от его плоскости магнитная индукция $B=10$ нТл. Определить магнитный момент p_m кольца с током. Считать R много меньшим d .

4.22 По витку радиусом $R=10$ см течет ток силой $I=50$ А. Виток помещен в однородное магнитное поле ($B=0,2$ Тл). Определить момент силы M , действующей на виток, если плоскость витка составляет угол $\varphi=60^\circ$ с линиями индукции.

4.23 Квадратная проволочная рамка расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом так, что две ее стороны параллельны проводу. По рамке и проводу текут одинаковые токи силой $I=200$ А. Определить силу F , действующую на рамку, если ближайшая к проводу сторона рамки находится на расстоянии, равном ее длине.

4.24 Горизонтальные рельсы находятся в вертикальном однородном магнитном поле на расстоянии $l=0,3$ м друг от друга. На них лежит стержень, перпендикулярный рельсам. Какой должна быть индукция магнитного поля для того, чтобы стержень начал равномерно двигаться вдоль рельсов, если по нему пропускать ток $I=50$ А? Коэффициент трения стержня о рельсы $k=0,2$, масса стержня $m=0,5$ кг.

4.25 Напряженность магнитного поля в центре круглого витка равна $H=500$ А/м. Магнитный момент витка $p_m=6$ А·м². Вычислить силу тока I в витке и радиус R витка.

4.26 Рамка гальванометра длиной $a=4$ см и шириной $b=1,5$ см, содержащая $N=200$ витков тонкой проволоки, находится в магнитном поле с индукцией $B=0,1$ Тл. Плоскость рамки параллельна линиям индукции.

Найти: 1) механический момент M , действующий на рамку, когда по витку течет ток $I=1$ мА; 2) магнитный момент p_m рамки при этом токе.

4.27 Короткая катушка площадью S поперечного сечения, равной 150 см², содержит $N=200$ витков провода, по которому течет ток $I=4$ А. Катушка помещена в однородное магнитное поле напряженностью $H=8$ кА/м. Определить магнитный момент p_m катушки, а также вращающий момент M , действующий на нее со стороны поля, если ось катушки составляет угол $\alpha=60^\circ$ с линиями индукции.

4.28 Из проволоки длиной $l=20$ см сделаны контуры: 1) квадратный и 2) круговой. Найти вращающий момент сил, действующий на каждый контур, помещенный в однородное магнитное поле с индукцией $B=0,1$ Тл. По контурам течет ток силой $I=2$ А. Плоскость каждого контура составляет угол $\alpha=45^\circ$ с направлением магнитного поля.

4.29 Напряженность H магнитного поля в центре кругового витка равна 200 А/м. Магнитный момент p_m витка равен 1 А·м². Вычислить силу тока I в витке и радиус R витка.

4.30 Проволочный виток радиусом $R=5$ см находится в однородном магнитном поле. Плоскость витка образует угол $\alpha=60^\circ$ с направлением поля. По витку течет ток $I=4$ А. Механический момент M , действующий на виток, равен $M=39,5$ мкН·м. Найти индукцию магнитного поля.

4.31 Протон влетел в магнитное поле перпендикулярно линиям индукции и описал дугу радиусом $R=10$ см. Определить скорость V протона, если магнитная индукция $B=1$ Тл.

4.32 Определить частоту n обращения электрона по круговой орбите в магнитном поле ($B=1$ Тл).

4.33 Протон, получивший скорость в результате прохождения разности потенциалов $U=1$ кВ, попадает в однородное магнитное поле с индукцией $B=0,2$ Тл перпендикулярно линиям индукции. Определить период T вращения протона.

4.34 Электрон движется по окружности радиусом $R = 1$ см в магнитном поле с индукцией $B = 0,02$ Тл. Какова кинетическая энергия электрона?

4.35 Заряженная частица с кинетической энергией $E_k = 2$ кэВ движется в однородном магнитном поле по окружности радиусом $R = 4$ мм. Определить силу Лоренца, действующую на частицу со стороны поля.

4.36 Частица, несущая один элементарный заряд, влетела в однородное поле с индукцией $B = 0,5$ Тл. Определить момент импульса L , которым обладала частица при движении в магнитном поле, если ее траектория представляла дугу окружности радиусом $R = 0,2$ см.

4.37 Перпендикулярно магнитному полю ($H = 1$ кА/м) возбуждено электрическое поле ($E = 20$ кВ/м). Перпендикулярно полям движется, не отклоняясь от прямолинейной траектории, заряженная частица. Определить скорость V частицы.

4.38 Заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов, влетела в скрещенные под прямым углом электрическое ($E = 400$ В/м) и магнитное ($B = 0,2$ Тл) поля. Определить ускоряющую разность потенциалов, если, двигаясь перпендикулярно полям, частица не испытывает отклонений от прямолинейной траектории. Отношение заряда к массе частицы $e/m = 9,64 \cdot 10^7$ Кл/кг.

4.39 Заряженная частица, прошедшая ускоряющую разность потенциалов $U = 2$ кВ, движется в однородном магнитном поле с индукцией $B = 15,1$ мТл по окружности радиусом $R = 1$ см. Определить отношение $|q|/m$ заряда частицы к ее массе и скорость V частицы.

4.40 Два иона, имеющие одинаковый заряд, но различные массы, влетели в однородное магнитное поле. Первый ион начал двигаться по окружности радиусом $R_1 = 5$ см, второй ион – по окружности радиусом $R_2 = 2,5$ см. Найти отношение m_1/m_2 масс ионов, если они прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов.

4.41 Электрон, имея скорость $V = 2 \cdot 10^6$ м/с, влетел в однородное магнитное поле с индукцией $B = 30$ мТл под углом $\alpha = 30^\circ$ к направлению линий индукции. Определить радиус R и шаг h винтовой линии, по которой будет двигаться электрон.

4.42 В однородном магнитном поле с индукцией $B = 100$ мкТл движется электрон по винтовой линии. Определить скорость V электрона, если шаг h винтовой линии равен 20 см, а радиус $R = 5$ см.

4.43 Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией $B = 9$ мТл по винтовой линии, радиус R которой равен 1 см и шаг $h = 7,8$ см. Определить период T обращения электрона и его скорость V .

4.44 Электрон движется по окружности в однородном магнитном поле со скоростью $V = 0,8c$ (c – скорость света в вакууме). Магнитная индукция B поля равна 0,01 Тл. Определить радиус окружности в двух случаях: 1) не учитывая увеличения массы со скоростью; 2) учитывая это увеличение.

4.45 Протон, пройдя ускоряющую разность потенциалов $U=800$ В, влетает в однородные, скрещенные под прямым углом магнитное ($B=50$ мТл) и электрические поля. Определить напряженность E электрического поля, если протон движется в скрещенных полях прямолинейно.

4.46 В однородном магнитном поле с индукцией $B=0,01$ Тл находится прямой провод длиной $l=8$ см, расположенный перпендикулярно линиям индукции. По проводу течет ток $I=2$ А. Под действием сил поля провод переместился на расстояние $S=5$ см. Найти работу A сил поля.

4.47 Плоский контур, площадь S которого равна 300 см², находится в однородном магнитном поле с индукцией $B=0,01$ Тл. Плоскость контура перпендикулярна линиям индукции. В контуре поддерживается неизменный ток $I=10$ А. Определить работу A внешних сил по перемещению контура с током в область пространства, магнитное поле в которой отсутствует.

4.48 Проводник длиной $l=1$ м движется со скоростью $V=5$ м/с перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля. Определить магнитную индукцию B , если на концах проводника возникает разность потенциалов $U=0,02$ В.

4.49 Плоский контур площадью $S=20$ см² находится в однородном магнитном поле с индукцией $B=0,03$ Тл. Определить магнитный поток Φ , пронизывающий контур, если плоскость его составляет угол $\varphi=60^\circ$ с направлением линий индукции.

4.50 Проводник длиной $l=1$ м движется со скоростью $V=5$ м/с перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля величиной $B=0,01$ Тл. Определить разность потенциалов U , возникающую на концах проводника.

4.51 В средней части соленоида, содержащего $n=8$ витков/см, помещен круговой виток диаметром $d=4$ см. Плоскость витка расположена под углом $\varphi=60^\circ$ к оси соленоида. Определить магнитный поток Φ , пронизывающий виток, если по обмотке соленоида течет ток силой $I=1$ А.

4.52 Квадратный контур со стороной $a=10$ см, в котором течет ток силой $I=6$ А, находится в магнитном поле с индукцией $B=0,8$ Тл под углом $\alpha=50^\circ$ к линиям индукции. Какую работу A нужно совершить, чтобы при неизменной силе тока в контуре изменить его форму на окружность?

4.53 В однородном магнитном поле перпендикулярно линиям индукции расположен плоский контур площадью $S=100$ см². Поддерживая в контуре постоянную силу тока $I=50$ А, его переместили из поля в область пространства, где поле отсутствует. Определить индукцию B магнитного поля, если при перемещении контура была совершена работа $A=0,4$ Дж.

4.54 В однородном магнитном поле ($B=0,1$ Тл) равномерно с частотой $n=5$ с⁻¹ вращается стержень длиной $l=50$ см так, что плоскость его вращения перпендикулярна линиям индукции, а ось вращения проходит через один из его концов. Определить индуцируемую на концах стержня разность потенциалов.

4.55 Проволочная рамка площадью $S=400 \text{ см}^2$ равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией $B=2 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$ вокруг оси, перпендикулярной направлению поля. Период вращения рамки $T=0,05 \text{ с}$. Рамка состоит из $N=300$ витков. Определить максимальное значение ЭДС, возникающей в рамке.

4.56 Рамка площадью $S=200 \text{ см}^2$ равномерно вращается с частотой $n=10 \text{ с}^{-1}$ относительно оси, лежащей в плоскости рамки и перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля ($B=0,2 \text{ Тл}$). Каково среднее значение ЭДС индукции $\langle \varepsilon_i \rangle$ за время, в течение которого магнитный поток, пронизывающий рамку, изменится от нуля до максимального значения?

4.57 Магнитная индукция B поля между полюсами двухполюсного генератора равна $0,8 \text{ Тл}$. Ротор имеет $N=100$ витков площадью $S=400 \text{ см}^2$. Определить частоту n вращения якоря, если максимальное значение ЭДС индукции $\varepsilon_i=200 \text{ В}$.

4.58 Короткая катушка, содержащая $N=1000$ витков, равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией $B=0,04 \text{ Тл}$ с угловой скоростью $\omega=5 \text{ рад/с}$ относительно оси, совпадающей с диаметром катушки и перпендикулярной линиям индукции поля. Определить мгновенное значение ЭДС индукции ε_i для тех моментов времени, когда плоскость катушки составляет угол $\alpha=60^\circ$ с линиями индукции поля. Площадь S катушки равна 100 см^2 .

4.59 Проволочный виток радиусом $r=4 \text{ см}$, имеющий сопротивление $R=0,01 \text{ Ом}$, находится в однородном магнитном поле с индукцией $B=0,04 \text{ Тл}$. Плоскость витка составляет угол $\alpha=30^\circ$ с линиями индукции поля. Какое количество электричества q протечет по витку, если магнитное поле исчезнет?

4.60 Тонкий медный провод массой $m=1 \text{ г}$ согнут в виде квадрата, и концы его замкнуты. Квадрат помещен в однородное магнитное поле ($B=0,1 \text{ Тл}$) так, что плоскость его перпендикулярна линиям индукции поля. Определить количество электричества q , которое протечет по проводнику, если квадрат, протянув за противоположные вершины, вытянуть в линию.

4.61 Определить силу тока в цепи через $t=0,01 \text{ с}$ после ее размыкания. Сопротивление цепи $R=20 \text{ Ом}$ и индуктивность $L=0,1 \text{ Гн}$. Сила тока до размыкания цепи $I_0=50 \text{ А}$.

4.62 Источник тока замкнули на катушку сопротивлением $R=20 \text{ Ом}$. Через время $t=0,1 \text{ с}$ сила тока I замыкания достигла $0,95$ предельного значения. Определить индуктивность L катушки.

4.63 Цепь состоит из катушки индуктивностью $L=0,1 \text{ Гн}$ и источника тока. Источник тока отключили, не разрывая цепи. Время, через которое сила тока уменьшится до $0,001$ первоначального значения, равно $t=0,07 \text{ с}$. Определить сопротивление катушки.

4.64 Источник тока замкнули на катушку сопротивлением $R=10$ Ом и индуктивностью $L=0,2$ Гн. Через какое время сила тока в цепи достигнет 50% максимального значения?

4.65 Определить скорость изменения тока в катушке индуктивностью $L=100$ мГн, если в ней возникла ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_c=80$ В.

4.66 С помощью реостата равномерно увеличивают силу тока в катушке на $\Delta I=0,1$ А в 1 с. Какова индуктивность катушки L , если среднее значение ЭДС самоиндукции, возникающей при этом $\mathcal{E}_c=1$ мВ.

4.67 Силу тока в катушке равномерно увеличивают с помощью реостата на $\Delta I=0,6$ А в секунду. Найти среднее значение ЭДС \mathcal{E}_c самоиндукции, если индуктивность катушки $L=5$ мГн.

4.68 Соленоид содержит $N=800$ витков. Сечение сердечника (из немагнитного материала) $S=10$ см². По обмотке течет ток, создающий поле с индукцией $B=8$ мТл. Определить среднее значение ЭДС \mathcal{E}_c , которая возникает на зажимах соленоида, если сила тока уменьшается практически до нуля за время $t=0,8$ мс.

4.69 По катушке индуктивностью $L=8$ мкГн течет ток силой $I=6$ А. При выключении тока его сила изменяется практически до нуля за время $t=5$ мс. Определить среднее значение ЭДС \mathcal{E}_c самоиндукции, возникающей в контуре.

4.70 В электрической цепи, содержащей сопротивление $R=20$ Ом и индуктивность $L=0,06$ Гн, течет ток силой $I=20$ А. Определить силу тока в цепи через $t=0,2$ мс после ее размыкания.

4.71 По замкнутой цепи с сопротивлением $R=20$ Ом течет ток. Через время $t=8$ мс после размыкания цепи сила тока в ней уменьшилась в 20 раз. Определить индуктивность L цепи.

4.72 Индуктивность L катушки равна 2 мГн. Ток частотой $\nu=50$ Гц, протекающий по катушке, изменяется по синусоидальному закону. Определить среднюю ЭДС самоиндукции $\langle \mathcal{E}_c \rangle$, возникающую за интервал времени Δt , в течение которого ток в катушке изменяется от минимального до максимального значения. Амплитудное значение силы тока $I_0=10$ А.

4.73 Цепь состоит из катушки индуктивностью $L=1$ Гн и сопротивлением $R=10$ Ом. Источник тока можно отключать, не разрывая цепи. Определить время t , по истечении которого сила тока уменьшится до 0,001 первоначального значения.

4.74 Катушка, намотанная на немагнитный цилиндрический каркас, имеет $N_1=750$ витков и индуктивность $L_1=2,5 \cdot 10^{-2}$ Гн. Чтобы увеличить индуктивность катушки до $L_2=3,6 \cdot 10^{-2}$ Гн, обмотку с катушки сняли и заменили обмоткой из более тонкой проволоки с таким расчетом, чтобы длина катушки осталась прежней. Определить число N_2 витков катушки после перемотки.

4.75 Соленоид содержит $N=1000$ витков. Площадь S сечения сердечника равна 10 см^2 . По обмотке течет ток, создающий поле с индукцией $B=1,5 \text{ Тл}$. Найти среднюю ЭДС индукции $\langle \mathcal{E} \rangle$, возникающей в соленоиде, если ток уменьшится до нуля за время $t=500 \text{ мкс}$.

4.76 Соленоид с сердечником из никеля на длине $l=0,5 \text{ м}$ имеет $N=1000$ витков с площадью поперечного сечения $S=50 \text{ см}^2$. Определить магнитный поток внутри соленоида и энергию магнитного поля, если сила тока в соленоиде $I=10 \text{ А}$ и магнитная проницаемость никеля $\mu=200$.

4.77 В соленоиде сечением $S=5 \text{ см}^2$ создан магнитный поток $\Phi=20 \text{ мВб}$. Определить объемную плотность w энергии магнитного поля соленоида. Сердечник отсутствует. Магнитное поле во всем объеме соленоида считать однородным.

4.78 Магнитный поток Φ в соленоиде, содержащем $N=1000$ витков, равен $0,2 \text{ мВб}$. Определить энергию W магнитного поля соленоида, если сила тока, протекающего по виткам соленоида, $I=1 \text{ А}$. Сердечник отсутствует. Магнитное поле во всем объеме соленоида считать однородным.

4.79 Диаметр тороида (по средней линии) $D=50 \text{ см}$. Тороид содержит $N=2000$ витков и имеет площадь $S=20 \text{ см}^2$. Вычислить энергию W магнитного поля тороида при силе тока $I=5 \text{ А}$. Считать магнитное поле тороида однородным. Сердечник выполнен из немагнитного материала.

4.80 По проводнику, изогнутому в виде кольца радиусом $R=20 \text{ см}$, содержащему $N=500$ витков, течет ток силой $I=1 \text{ А}$. Определить объемную плотность w энергии магнитного поля в центре кольца.

4.81 Обмотка тороида имеет $n=10$ витков на каждый сантиметр длины (по средней линии тороида). Вычислить объемную плотность энергии w магнитного поля при силе тока $I=10 \text{ А}$. Сердечник выполнен из немагнитного материала, и магнитное поле во всем объеме однородно.

4.82 Обмотка соленоида содержит $n=20$ витков на каждый сантиметр длины. При какой силе тока I объемная плотность энергии магнитного поля будет $w=0,1 \text{ Дж/м}^3$? Сердечник выполнен из немагнитного материала, и магнитное поле во всем объеме однородно.

4.83 Соленоид имеет длину $l=0,6 \text{ м}$ и сечение $S=10 \text{ см}^2$. При некоторой силе тока, протекающего по обмотке, в соленоиде создается магнитный поток $\Phi=0,1 \text{ мВб}$. Чему равна энергия W магнитного поля соленоида? Сердечник выполнен из немагнитного материала, и магнитное поле во всем объеме однородно.

4.84 По обмотке соленоида индуктивностью $L=0,2 \text{ Гн}$ течет ток силой $I=10 \text{ А}$. Определить энергию W магнитного поля соленоида.

4.85 Индуктивность L катушки (без сердечника) равна $0,1 \text{ мГн}$. При какой силе тока I энергия W магнитного поля равна 10^{-4} Дж ?

4.86 При некоторой силе тока I плотность энергии w магнитного поля соленоида (без сердечника) равна $0,2 \text{ Дж/м}^3$. Во сколько раз увеличивается плотность энергии поля при той же силе тока, если соленоид будет иметь железный сердечник? Принять магнитную проницаемость железа μ равной 700.

4.87 Найти плотность энергии w магнитного поля в железном сердечнике соленоида, если напряженность H намагничивающего поля равна $1,6 \cdot 10^3 \text{ А/м}$. Принять магнитную проницаемость железа μ равной 700.

4.88 Соленоид имеет длину $l=0,6$ и сечение $S=10 \text{ см}^2$. Чему равен магнитный поток Φ созданный в соленоиде, если при некоторой силе тока, протекающей по обмотке, энергия магнитного поля соленоида $W=10 \text{ Дж}$. Сердечник выполнен из немагнитного материала и магнитное поле во всем объеме однородно.

4.89 Диаметр тороида (по средней линии) $D=50 \text{ см}$. Тороид содержит $N=2000$ витков и имеет площадь сечения $S=20 \text{ см}^2$. Какой силы ток I протекает по виткам, если энергия магнитного поля тороида равна $W=100 \text{ мДж}$. Считать магнитное поле тороида однородным. Сердечник выполнен из немагнитного материала.

4.90 Объемная плотность энергии магнитного поля соленоида $w=0,1 \text{ Дж/м}^3$. Определить сечение соленоида S , если магнитный поток, созданный внутри соленоида $\Phi=20 \text{ мкВб}$. Сердечник отсутствует. Магнитное поле во всем объеме соленоида считать однородным.

1. Основные физические постоянные

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Ускорение свободного падения	g	$9,81 \text{ м/с}^2$
Гравитационная постоянная	γ	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Число Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Атомная единица массы	а.е.м.	$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Универсальная (молярная) газовая постоянная	R	$8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Элементарный заряд	e	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	m_e	$9,31 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.}$
Масса покоя протона	m_p	$1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00728 \text{ а.е.м.}$
Масса покоя нейтрона	m_n	$1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,0087 \text{ а.е.м.}$
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Постоянная Стефана-Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постоянная Вина	b	$2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Постоянная Планка	h	$6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Ридберга	R	$3,29 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$

2. Множители и приставки для обозначения десятичных кратных и дольных единиц и их наименование

Приставка	Обозначение		Множитель
	Международное	русское	
экса	E	Э	10^{18}
пета	P	П	10^{15}
тера	T	Т	10^{12}
гига	G	Г	10^9
мега	M	М	10^6
кило	K	К	10^3
гекто	H	Г	10^2
дека	da	да	10^1
деци	d	д	10^{-1}
санти	c	с	10^{-2}
милли	m	м	10^{-3}
микро	μ	мк	10^{-6}
нано	n	н	10^{-9}
пико	p	п	10^{-12}
фемто	f	ф	10^{-15}
атто	a	а	10^{-18}

3. Диэлектрическая проницаемость ϵ

Вода	81
Масло (трансформаторное)	2,2
Парафин	2,0
Слюда	7,0
Стекло	7,0
Фасфор	5,0
Эбонит	3,0