

0168

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Кафедра физики

# ФИЗИКА

## ЧАСТЬ 2

**ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ТОК.  
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ  
КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ**

**ПРОГРАММА, МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ**

Для студентов заочного факультета всех специальностей

Санкт-Петербург  
НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ  
ЦЕНТР  
С-Петербург, ул. Кавказская, 4

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ

УДК 676.012.52

Физика. Часть 2. Электростатика. Постоянный ток. Электромагнетизм. Электромагнитные колебания и волны: Программа, методические указания и контрольные задания для студентов заочного факультета всех специальностей/ Сост. А.Л.Ашкалуни, В.О.Кабанов, В.К.Козырев, С.А.Поржецкий; ГОУВПО СПбГТУ РП. СПб., 2005. 42 с.

Часть 2 содержит материалы по двум разделам курса физики, посвященных электрическим и электромагнитным явлениям. Предназначаются для студентов-заочников высших учебных заведений всех специальностей.

Рецензент: кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики СПбГТУ РП А.А.Абрамович

Подготовлены и рекомендованы к печати кафедрой физики СПбГТУ РП (протокол № 5 от 22.12.2004 г.).

Утверждены к изданию методической комиссией факультета промышленной энергетики СПбГТУ РП (протокол № 5 от 20 января 2005 г.).

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Часть вторая настоящего методического пособия содержит материал по третьему и четвертому разделам курса физики: «Электростатика. Постоянный ток» и «Электромагнетизм. Электромагнитные колебания и волны». Даны две таблицы вариантов контрольных работ: одна - для студентов-технологов, выполняющих две контрольные работы и вторая - для студентов-экономистов, выполняющих одну контрольную работу.

## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Студенты технологических специальностей выполняют две контрольные работы по третьему и четвертому разделам курса (контрольная работа №3 и №4) и представляют их на рецензию в течение III семестра.

Каждая контрольная работа включает в себя семь задач. Определение варианта задания проводится по единой для всех шести контрольных работ таблице вариантов в соответствии с последней цифрой шифра. Если, например, последняя цифра шифра студента-технолога семь, то в каждой контрольной он решает задачи 7, 17, 27, 37, 47, 57, 67.

Таблица вариантов для технологов

Вариант	Номера задач в каждой контрольной работе						
1	1	11	21	31	41	51	61
2	2	12	22	32	42	52	62
3	3	13	23	33	43	53	63
4	4	14	24	34	44	54	64
5	5	15	25	35	45	55	65
6	6	16	26	36	46	56	66
7	7	17	27	37	47	57	67
8	8	18	28	38	48	58	68
9	9	19	29	39	49	59	69
10	10	20	30	40	50	60	70

Студенты-экономисты выполняют одну контрольную работу по третьему и четвертому разделам курса и представляют ее на рецензию в течение второго семестра.

Контрольная работа содержит по три задачи из двух разделов, всего шесть задач. Определение варианта задания в соответствии с последней цифрой шифра проводится по таблице вариантов.

Таблица вариантов для экономистов

№№ вариантов	Номера задач в каждой контрольной работе					
	из контрольной работы №3			из контрольной работы №4		
1	21	41	51	1	11	38
2	22	42	52	2	12	42
3	23	43	53	3	13	43
4	24	44	54	4	14	44
5	25	45	55	5	15	45
6	26	46	56	6	16	47
7	27	47	57	7	17	56
8	28	48	58	8	18	57
9	29	49	59	9	19	58
10	30	50	60	10	20	59

При выполнении контрольных работ необходимо выполнять следующие правила:

1) контрольную работу следует выполнять аккуратно, оставляя поля для замечаний рецензента;

2) задачу своего варианта переписывать полностью, а заданные физические величины выписывать отдельно, при этом все числовые величины должны быть переведены в одну систему единиц;

3) для пояснения решения задачи, где это нужно, аккуратно сделать чертеж;

4) решения задач и используемые формулы должны сопровождаться пояснениями;

5) на титульном листе нужно указать номер контрольной работы, наименование дисциплины, фамилию и инициалы студента, шифр и домашний адрес;

6) в пояснениях к задаче необходимо указывать те основные законы и формулы, на которых базируется решение данной задачи;

7) при получении расчетной формулы, которая нужна для решения конкретной задачи, приводить ее вывод;

8) рекомендуется решение задачи сначала сделать в общем виде, т. е. только в буквенных обозначениях, поясняя применяемые при написании формул буквенные обозначения;

9) вычисления следует проводить путем подстановки заданных числовых величин в расчетную формулу. Все числовые значения величин, необходимые для решения данной задачи, должны быть выражены в СИ (см. справочные данные);

10) проверить единицы полученных величин по расчетной формуле и тем самым подтвердить правильность расчетной формулы;

11) в контрольной работе следует указывать учебники и учебные пособия, которые использовались при решении задач.

*Контрольные работы, представленные без соблюдения указанных правил, а также работы, выполненные не по своему варианту, зачитываться не будут.*

При повторном рецензировании обязательно представлять работу с первой рецензией.

## ЛИТЕРАТУРА

*Савельев И.В.* Курс общей физики. - М.: Наука, 1982, т. 2.

*Зисман Г.А., Тодес О.М.* Курс общей физики. - М.: Наука, 1977, т. 2.

*Шубин А.С.* Курс общей физики: Учебное пособие для инженерно-экономических специальных вузов. - М.: Высшая школа, 1975.

*Волькенштейн В.С.* Сборник задач по общему курсу физики. - М.: Наука, 1978.

*Фирганг Е.В.* Руководство к решению задач по курсу общей физики. - М.: Высшая школа, 1978.

*Чертов А.Г., Воробьев А.А.* Задачник по физике / Под ред. А.Г. Чертова. - М.: Высшая школа, 1981.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

### ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

**Электростатика.** Электростатическое поле. Напряженность. Поле диполя. Работа сил электростатического поля. Напряженность как градиент потенциала.

Поток вектора напряженности. Теорема Остроградского-Гаусса. Применение теоремы Остроградского-Гаусса к расчету поля. Градиент, дивергенция, ротор.

Поле в диэлектрике. Поляризация диэлектриков, виды поляризации. Вектор поляризации. Поле внутри диэлектрика. Вектор электростатического смещения. Теорема Остроградского-Гаусса для электростатического поля в диэлектрике. Сегнетоэлектрики. Пьезоэлектрический эффект.

Поле внутри проводника и у его поверхности. Распределение зарядов в проводнике. Электроемкость уединенного проводника. Конденсаторы. Энергия заряженного уединенного проводника. Энергия электростатического поля.

**Постоянный электрический ток.** Электрический ток. Закон Ома для участка цепи. Закон Ома для участка цепи в дифференциальной форме.

Электродвижущая сила. Классическая теория электрической проводимости металлов. Закон Ома в классической электронной теории. Электрический ток в газах. Понятие о плазме. Дебаевский радиус. Термоэлектронная эмиссия.

**Электромагнетизм.** Магнитное поле. Вектор магнитной индукции. Закон Ампера. Поток вектора магнитной индукции. Контур с током в магнитном поле. Закон Био-Савара-Лапласа. Применение закона Био-Савара-Лапласа к расчету магнитного поля. Релятивистский эффект.

Закон полного тока. Магнитное взаимодействие токов. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле. Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца. Ускоритель заряженных частиц. Эффект Холла.

Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея-Максвелла. Самоиндукция. Индуктивность. Взаимная индукция. Энергия магнитного поля. Токи замыкания и размыкания цепи.

Магнитные моменты атомов. Вектор намагниченности. Типы магнетиков. Элементарная теория диамагнетизма и парамагнетизма. Магнитная восприимчивость вещества. Напряженность магнитного поля. Относительная магнитная проницаемость среды. Ферромагнетики. Домены. Кривая намагничивания. Магнитный гистерезис. Точка Кюри.

Вихревой характер электрического поля. Ток смещения. Уравнения Максвелла для электромагнитного поля в интегральной и дифференциальной формах. Относительный характер электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля. Диелектрическое единство переменных электрического и магнитных полей.

**Колебания и волны.** Гармонические электромагнитные колебания и их характеристики. Электрический колебательный контур. Формула Томсона.

Дифференциальные уравнения затухающих электромагнитных колебаний. Дифференциальное уравнение электромагнитной волны. Основные свойства электромагнитных волн. Энергия электромагнитных волн.

## РАЗДЕЛ II. ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

### Основные законы и формулы

Величина или физический закон	Формула
Закон Кулона	$F = q_1 q_2 / (4\pi\epsilon_0 r^2)$
Напряженность электростатического поля	$E = F/q_0$
Напряженность поля точечного заряда	$E = q / (4\pi\epsilon_0 r^2)$

Величина или физический закон	Формула
Напряженность поля бесконечно длинной заряженной нити	$E = \tau / (2\pi\epsilon_0 r)$
Напряженность поля равномерно заряженной плоскости	$E = \sigma / (2\epsilon_0)$
Напряженность поля между двумя равномерно и разноименно заряженными бесконечными параллельными плоскостями	$E = \sigma / (\epsilon_0)$
Напряженность поля $E$ , создаваемого металлической заряженной сферой радиусом $R$ на расстоянии $r$ от центра сферы:	
на поверхности сферы ( $r = R$ )	$E = q / (4\pi\epsilon_0 R^2)$
вне сферы ( $r > R$ )	$E = q / (4\pi\epsilon_0 r^2)$
Смещение электрического поля	$D = \epsilon_0 E$
Поток вектора напряженности	$N_E = \int_S E_n dS$
Работа перемещения заряда в электрическом поле из точки $A$ в точку $B$	$A = q \int_A^B E_n dl$ $A = q(\varphi_B - \varphi_A)$
Потенциал поля точечного заряда	$\varphi = q / (4\pi\epsilon_0 r)$
Потенциал электрического поля металлической полой сферы радиусом $R$ на расстоянии $r$ от центра сферы:	
на поверхности и внутри сферы	$\varphi = q / (4\pi\epsilon_0 R)$
вне сферы ( $r > R$ )	$\varphi = q / (4\pi\epsilon_0 r)$
Связь между напряженностью поля и потенциалом	$E = -\frac{d\varphi}{dl}; E = -\text{grad}\varphi$
Сила притяжения между двумя разноименными заряженными обкладками конденсатора	$F = \epsilon_0 E^2 S / 2 = q^2 / (2\epsilon_0 S)$
Электрическая емкость уединенного	$C = q / \varphi$

Величина или физический закон	Формула
проводника	
Емкость сферического конденсатора	$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R$
Емкость плоского конденсатора	$C = \epsilon\epsilon_0 S/d$
Емкость слоистого конденсатора	$C = \frac{\epsilon_0 S}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} + \dots + \frac{d_n}{\epsilon_n}}$
Емкость батареи параллельно соединенных конденсаторов	$C_6 = C_1 + C_2 + \dots + C_n$
Формула для определения емкости последовательно соединенных конденсаторов	$\frac{1}{C_6} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$
Энергия заряженного проводника	$W_3 = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{q\varphi}{2}$
Энергия заряженного плоского конденсатора	$W_3 = \epsilon\epsilon_0 E^2 V/2$
Энергия поляризованного диэлектрика	$W_3 = (\epsilon - 1)\epsilon_0 E^2 V/2$
Объемная плотность энергии электрического поля	$w = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2} = \frac{D^2}{2\epsilon\epsilon_0}$
Сила тока	$I = \frac{dq}{dt}; I = \frac{q}{t}$
Вектор плотности тока	$j = \frac{dJ}{dS_n}$
Закон Ома для участка цепи, не содержащей ЭДС	$I = U/R$
Закон Ома для полной цепи	$I = E/(R + r)$
Закон Ома в дифференциальной форме	$j = \gamma E = E/\rho$
Закон Джоуля-Ленца	$A = Q = I^2 R t = U^2 t/R = I U t$
Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме	$w = \gamma E^2$
Термоэлектродвижущая сила	$E = E_0 \Delta T$
Сопротивление однородного	$R = \rho l/S$



Величина или физический закон	Формула
проводника	
Удельная проводимость	$\gamma = 1/\rho$
Зависимость удельного сопротивления от температуры	$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t)$
Полная мощность, выделяющаяся в цепи	$N = IE = E^2/(R + r)$
Коэффициент полезного действия источника тока	$\eta = N_n/N = R/(R + r)$
Плотность тока в газе и электролите	$j = qn_0(u_+ + u_-)E$

### Примеры решения задач

#### Пример 1.

Два равных по величине заряда  $3 \cdot 10^{-9}$  Кл расположены в вершинах при острых углах равнобедренного прямоугольного треугольника на расстоянии  $2\sqrt{2}$  см. Определить, с какой силой эти два заряда действуют на третий заряд  $+1 \cdot 10^{-9}$  Кл, расположенный в вершине при прямом угле треугольника. Рассмотреть случаи, когда первые два заряда одно- и разноименные, и пояснить их рисунками.

Дано:  $q_1 = q_2 = 3 \cdot 10^{-9}$  Кл,  $q_3 = 1 \cdot 10^{-9}$  Кл,  $r = 2\sqrt{2}$  см =  $2\sqrt{2} \cdot 10^{-2}$  м.

Найти:  $F$

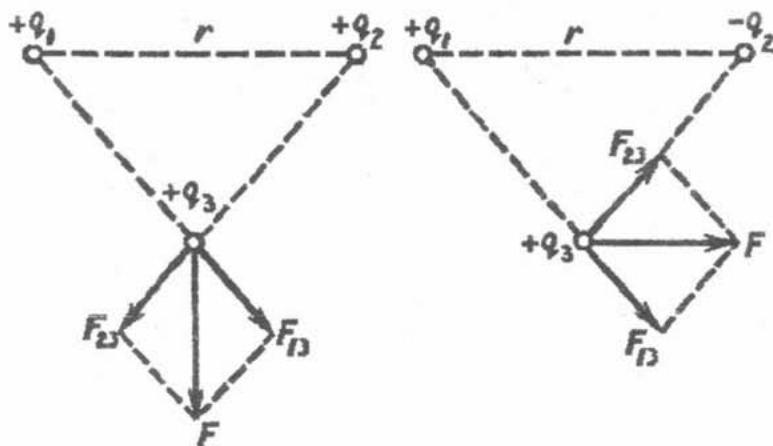


Рис. 1

**Решение.** Сила взаимодействия между двумя точечными зарядами определяется по закону Кулона  $F = q_1q_2/(4\pi\epsilon_0r^2)$ . По принципу суперпозиции поле каждого заряда  $q_1$  и  $q_2$  действует на заряд  $q_3$  независимо. Вследствие этого на заряд  $q_3$  действуют независимо силы  $F_{13}$  и  $F_{23}$  (рис. 1). Векторная сумма этих сил  $F = F_{13} + F_{23}$  будет искомой величиной. Как видно из рисунка, сила  $F$  в обоих случаях будет одинаковой по абсолютной величине. Перейдем от векторного к скалярному выражению сил. Введем обозначение  $F_{13} = F_{23} = F_3$ . Тогда из геометрических соображений

$$F = \sqrt{F_{13}^2 + F_{23}^2} = \sqrt{2}F_3 = \sqrt{2} \frac{q_1q_3}{4\pi\epsilon_0r_{13}^2},$$

где  $r_{13}$  (или  $r_{12}$ ) - расстояние между зарядами  $q_1$  и  $q_3$  и (или)  $q_1$  и  $q_2$ ,  $r_{13} = r/\sqrt{2}$ .

Подставим числовые значения и определим  $F$ :

$$F = \frac{\sqrt{2} \cdot 3 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot 1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{4 \cdot 3.14 \cdot 1 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 2^2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 9.5 \cdot 10^{-5} \text{ Н}.$$

**Ответ.**  $F = 9.5 \cdot 10^{-5} \text{ Н}$ .

### Пример 2.

Два одинаковых положительных заряда  $10^{-12}$  Кл находятся в воздухе на расстоянии 8 см друг от друга. Определить напряженность поля и потенциал в точке, расположенной на расстоянии 5 см от зарядов.

**Дано:**  $q_1 = q_2 = 10^{-12}$  Кл;  $\epsilon = 1$ ,  $r_1 = r_2 = 5$  см = 0.05 м,  $r_3 = 8$  см = 0.08 м.

**Найти:**  $E$ ,  $\phi$ .

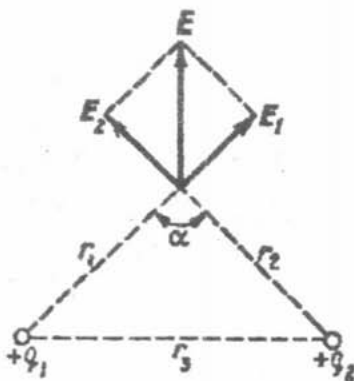


Рис. 2

**Решение.** По принципу суперпозиции напряженность поля, создаваемого зарядами  $q_1$  и  $q_2$ , равна векторной сумме напряженностей, создаваемых каждым зарядом в данной точке поля:  $E = E_1 + E_2$ . Напряженность поля, создаваемого точечным зарядом, вычисляется по формуле

$$E = q/(4\pi\epsilon_0r^2), \quad (1)$$

где  $q$  - заряд;  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость;  $\epsilon_0$  - электрическая постоянная;  $r$  - расстояние от заряда до точки поля, в которой определяется напряженность.

Так как заряды  $q_1$  и  $q_2$  положительны, то векторы  $E_1$  и  $E_2$  имеют направление по силовой линии от зарядов (рис. 2). Вектор суммарной напряженности  $E$  является диагональю

параллелограмма со сторонами  $E_1$  и  $E_2$ . Его абсолютное значение находим, используя теорему косинусов:

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

где  $\alpha$  - угол между векторами  $E_1$  и  $E_2$ , который можно определить из треугольника со сторонами  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$ :  $\cos \alpha = (r_1^2 + r_2^2 - r_3^2) / 2r_1r_2 = -0.28$ .

Подставляя  $E_1$  и  $E_2$  из (1) в (2), после преобразований получаем

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1^2} \sqrt{2(1 + \cos \alpha)}. \quad (3)$$

Подставляя числовые значения в (3), находим

$$E = \frac{1 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}}{4 \cdot 3.14 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} \sqrt{2(1 - 0.28)} = 4.32 \text{ В/м}.$$

Потенциал  $\varphi$ , создаваемый в данной точке поля системой точечных зарядов, равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых каждым из зарядов  $\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i$ . В условиях данной задачи потенциал  $\varphi$  результирующего поля будет равен  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$ . Потенциал, создаваемый точечным зарядом, определяется по формуле

$$\varphi = q / (4\pi\epsilon\epsilon_0 r).$$

Следовательно,

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_2}.$$

Подставляя числовые значения, находим

$$\varphi = \frac{2 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}}{4 \cdot 3.14 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 0.39 \text{ В}.$$

*Ответ:*  $E = 4.32 \text{ Ф/м}$ ,  $\varphi = 0.39 \text{ В}$ .

### Пример 3.

Заряд  $+1 \cdot 10^{-9}$  Кл переносится из бесконечности в точку, находящуюся на расстоянии 1 см от поверхности заряженного шара радиусом 9 см. Поверхностная плотность положительного заряда  $10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>. Определить совершаемую при этом работу. Какая работа совершается на последних 10 см пути?

*Дано:*  $q = +1 \cdot 10^{-9}$  Кл,  $\sigma = 1 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>,  $R = 9 \text{ см} = 0.09 \text{ м}$ ;  $r_1 = 1 \text{ см} = 0.01 \text{ м}$ ;  $r_2 = 10 \text{ см} = 0.1 \text{ м}$ ;  $\epsilon = 1$ .

*Найти:*  $A_1$ ,  $A_2$ .

*Решение.* Работа внешней силы  $A_1$  по перемещению заряда  $q$  из точки поля с потенциалом  $\varphi_1$  в другую точку с потенциалом  $\varphi_2$  равна по абсолютной величине, но противоположна по знаку работе  $A'_1$  сил поля по перемещению заряда между этими точками поля, т. е.  $A_1 = -A'_1$ . Работа сил электрического поля определяется по формуле  $A'_1 = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ . Тогда

$$A_1 = q(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (1)$$

где  $\varphi_1$  - потенциал в начальной точке;  $\varphi_2$  - потенциал в конечной точке.

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

$$\varphi = q_0 / (4\pi\epsilon_0(R+r)), \quad (2)$$

где  $q_0 = \sigma 4\pi R^2$  - заряд шара.

Потенциал  $\varphi_1$  в бесконечно удаленной точке (при  $r = \infty$ ) будет равен нулю. Потенциал  $\varphi_2$  из (2) подставим в (1) и после преобразований получим

$$A_1 = q\sigma R^2 / (4\pi\epsilon_0(R+r_1)). \quad (3)$$

Подставляя числовые значения в (3), получаем

$$A_1 = \frac{1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot 1 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/м}^2 \cdot 81 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2}{1 \cdot 885 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 10^{-1} \text{ м}} = 92 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}.$$

Работу на последних 10 см пути можно определить по формуле

$$A_2 = q(\varphi_2 - \varphi'_1), \quad (4)$$

где  $\varphi'_1 = q_0 / (4\pi\epsilon_0(R+r_1+r_2))$  - потенциал в точке на расстоянии  $(R+r_1+r_2)$  от центра шара.

Подставляя выражение  $\varphi'_1$  и  $\varphi_2$  в (4), после преобразований получаем

$$A_2 = \frac{q\sigma R^2}{\epsilon_0(R+r_1)} - \frac{q\sigma R^2}{\epsilon_0(R+r_1+r_2)}. \quad (5)$$

Первое слагаемое в (5) численно равно  $A_1$ .

Подставим числовые значения и вычислим  $A_2$ :

$$A_2 = 92 \cdot 10^{-4} \text{ Дж} - \frac{1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot 1 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/м}^2 \cdot 81 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2}{1 \cdot 885 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 2 \cdot 10^{-1} \text{ м}} = 46 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}.$$

*Ответ:*  $A_1 = 92 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$ ,  $A_2 = 46 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$ .

#### Пример 4.

Определить поток вектора напряженности электрического поля сквозь замкнутую шаровую поверхность, внутри которой находятся 3 точечных заряда +2, -3, и +5 нКл. Рассмотреть случай, когда система зарядов находится в вакууме и в воде.

Дано:  $q_1 = +2 \cdot 10^{-9}$  Кл;  $q_2 = -3 \cdot 10^{-9}$  Кл;  $q_3 = +5 \cdot 10^{-9}$  Кл;  $\epsilon_1 = 1$ ;  $\epsilon_2 = 81$ .

Найти:  $N_E$ .

Решение. В общем случае поток вектора напряженности  $N_E$  сквозь поверхность  $S$  равен  $N_E = \int_S E_n dS$ , где  $E_n$  - проекция вектора  $E$  на нормаль  $n$  к поверхности,  $E_n = E \cos \alpha$ .

Для шаровой поверхности, в центре которой помещен точечный заряд,  $\alpha = 0$ ,  $\cos \alpha = 1$  и  $E_n = E$ . В каждой точке шаровой поверхности  $E$  - величина постоянная и определяется по формуле

$$E = q / (4\pi\epsilon_0 r^2), \quad (1)$$

где  $q$  - заряд;  $r$  - радиус сферы.

Тогда поток вектора напряженности  $N_E$  сквозь шаровую поверхность будет иметь вид

$$N_E = \int_S E dS = E \int_S dS = ES = E \cdot 4\pi r^2. \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2), после преобразований для одного точечного заряда получаем  $N_E = q / (\epsilon\epsilon_0)$ . На основании теоремы Остроградского-Гаусса для системы зарядов полный поток вектора напряженности сквозь замкнутую поверхность проводника произвольной (в том числе шаровой) формы равен

$$N_E = \frac{1}{(\epsilon\epsilon_0)} \sum_{i=1}^n q_i. \quad (3)$$

Подставим в (3) числовые значения и получим:

а) в случае, когда заряды находятся в вакууме,

$$N_E = \frac{1}{\epsilon_0} (q_1 + q_2 + q_3) = \frac{(+2 - 3 + 5) \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}} = 450 \text{ В} \cdot \text{м};$$

б) в случае, когда заряды находятся в воде,

$$N_E = \frac{(+2 - 3 + 5) \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{81 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}} = 5.6 \text{ В} \cdot \text{м}.$$

Ответ:  $N_E = 5.6 \text{ В} \cdot \text{м}$ ;  $450 \text{ В} \cdot \text{м}$ .

### Пример 5.

Между пластинами плоского конденсатора, находящимися на расстоянии 1 см, приложена разность потенциалов 200 В. К одной из пластин прилежит плоскопараллельная стеклянная пластина ( $\epsilon_1 = 7$ ) толщиной 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:  $d_0 = 1 \text{ см} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ;  $d_1 = 9 \text{ мм} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $U_1 = 200 \text{ В}$ ;  $\epsilon_1 = 7$ ;  
 $\epsilon_2 = 1$ .

Найти:  $U_2$ ;  $W_2/W_1$ .

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 конденсаторов;  $U_1$  и  $U_2$  - разности потенциалов.

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

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{d_1/\epsilon_1 + (d_0 - d_1)/\epsilon_2}, \quad (2)$$

где  $S$  - площадь пластин;  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  - диэлектрические проницаемости стекла и воздуха;  $d_1$  - толщина стеклянной пластины;  $d_0$  - зазор между пластинами.

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

$$C_2 = \epsilon_2 \epsilon_0 S / d_0. \quad (3)$$

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

$$U_2 = \frac{C_1}{C_2} U_1 = \frac{\epsilon_1 d_0}{d_1 \epsilon_2 + (d_0 - d_1) \epsilon_1} U_1. \quad (4)$$

Подставляя числовые значения в (4), получаем

$$U_2 = 7 \cdot 1 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 200 \text{ В} / (9 \cdot 10^{-3} \text{ м} + 1 \cdot 10^{-3} \cdot 7 \text{ м}) = 976 \text{ В}.$$

Энергия конденсатора равна

$$W = CU^2/2.$$

Изменение энергии конденсатора найдем, узнав отношение энергии конденсаторов:

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

Это отношение можно определить двумя способами:

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

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{\epsilon_1 d_0}{d_1 \epsilon_2 + (d_0 - d_1) \epsilon_1} = \frac{7 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{9 \cdot 10^{-3} \text{ м} + 7 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 4.38.$$

2. Отношение (5) можно представить в виде

$$W_2/W_1 = C_2 U_2 \cdot U_2 / (C_1 U_1 \cdot U_1).$$

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

$$W_2/W_1 = U_2/U_1 = 976\text{В}/200\text{В} = 4.38$$

*Ответ:*  $U_2 = 976\text{ В}$ ;  $W_2/W_1 = 4.38$ .

### 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 5 А.

*Дано:*  $E = 12\text{ В}$ ;  $I_{\text{мкс}} = 5\text{ А}$ .

*Найти:*  $N_{\text{мкс}}$ .

*Решение.* Используем закон Ома для замкнутой цепи:

$$I = E/(R + r), \quad (1)$$

где  $R$  - сопротивление внешней цепи;  $r$  - внутренне сопротивление источника тока.

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

$$N = E^2 R / (R + r)^2. \quad (2)$$

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

Возьмем первую производную

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

Из (3) видно, что  $\frac{dN}{dR} = 0$  при  $R = r$ . Определим  $r$ . Максимальный ток возникает при коротком замыкании цепи, т. е. когда внешнее сопротивление  $R = 0$ . Исходя из этого,  $I_{\text{мкс}} = E/r$ , откуда  $r = E/I_{\text{мкс}}$ , а значит

$$R = E/I_{\text{мкс}}. \quad (4)$$

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

$$N_{\text{мкс}} = EI_{\text{мкс}}/4. \quad (5)$$

Вычисления:

$$N = 12\text{В} \cdot 5\text{А}/4 = 15\text{Вт}.$$

*Ответ:*  $N = 15\text{ Вт}$ .

### Пример 7.

Плотность тепловой мощности тока в нихромовом проводнике равна  $1.1 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·с). Определить плотность электрического тока.

Дано:  $w = 1.1 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·с).

Найти:  $j$ .

Решение. Для решения задачи используем законы Ома и Джоуля-Ленца в дифференциальной форме:

$$j = \gamma E; \quad (1)$$

$$w = \gamma E^2, \quad (2)$$

где  $j$  - плотность тока;  $E$  - напряженность поля;  $\gamma$  - удельная проводимость;  $w$  - тепловая мощность тока в проводнике.

Удельная проводимость связана с удельным сопротивлением проводника  $\rho$  соотношением

$$\gamma = 1/\rho. \quad (3)$$

Выразим  $E$  из (2) с учетом (3) и, подставляя  $E$  в (1), после преобразований получаем

$$j = \sqrt{w/\rho}. \quad (4)$$

Значение  $\rho$  для нихрома берем из справочника:  $\rho = 1.1 \cdot 10^{-6}$  Ом·м.

Вычисления:

$$j = \sqrt{1.1 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}) / (1.1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м})} = 1 \cdot 10^6 \text{ А}/\text{м}^2.$$

Ответ:  $j = 1 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>.

### Пример 8.

Сопротивление откачанной до некоторого вакуума стеклянной трубки длиной 7.7 см и площадью сечения 4 мм<sup>2</sup> равно  $3 \cdot 10^{14}$  Ом. Воздух в трубке однократно ионизирован до концентрации  $10^7$  см<sup>-3</sup> ионов. Опередить подвижность носителей, считая их одинаковой для обоих видов заряда.

Дано:  $d = 7.7$  см =  $7.7 \cdot 10^{-2}$  м;  $S = 4$  мм<sup>2</sup> =  $4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>;  $R = 3 \cdot 10^{14}$  Ом;  $n_0 = 10^7$  см<sup>-3</sup>;  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $u_+ = u_- = u$ .

Найти:  $u$ .

Решение. Используем формулу плотности тока  $j$  в ионизированном газе:

$$j = qn_0(u_+ + u_-)E, \quad (1)$$

где  $n_0$ ,  $e$ ,  $u_+$  и  $u_-$  - концентрация, заряд и подвижность носителей;  $E$  - напряженность поля. Известно, что плотность тока

$$j = I/S, \quad (2)$$

где  $I$  - сила тока;  $S$  - площадь поперечного сечения проводника.



Для однородного электрического поля

$$E = U/d, \quad (3)$$

где  $U$  - напряжение на электродах трубки;  $d$  - расстояние между электродами. Считая, что  $U = IR$ , из (3) получаем

$$I = Ed/R. \quad (4)$$

Подставим (4) в (2) и, приравнявая (1) и (2), после преобразований с учетом, что  $u_+ = u_- = u$ , получим

$$u = d/(2RSn_0e). \quad (5)$$

Вычисления:

$$u = \frac{7.7 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{2 \cdot 3 \cdot 10^{14} \text{ Ом} \cdot 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$$

Ответ:  $u = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

### Контрольная работа №3

1. Два точечных заряда, находясь в воде на расстоянии  $l$  друг от друга, взаимодействуют с некоторой силой. Во сколько раз необходимо изменить расстояние между ними, чтобы они взаимодействовали с такой же силой в воздухе?

2. Два шарика одинакового объема, обладающие массой  $0.6 \cdot 10^{-3}$  г каждый, подвешены на шелковых нитях длиной 0.4 м так, что их поверхности соприкасаются. Угол, на который разошлись нити при сообщении шарикам одинаковых зарядов, равен  $60^\circ$ . Найти величину зарядов и силу электрического отталкивания. Пояснить рисунком.

3. В вершинах треугольника со сторонами по  $2 \cdot 10^{-2}$  м находятся равные заряды по  $2 \cdot 10^{-9}$  Кл. Найти равнодействующую сил, действующих на четвертый заряд  $1 \cdot 10^{-9}$  Кл, помещенный на середине стороны треугольника. Как изменится равнодействующая, если заряд поместить на середине другой стороны треугольника? Пояснить рисунком.

4. В элементарной теории атома водорода принимают, что электрон обращается вокруг протона по круговой орбите. Какова скорость обращения электрона, если радиус орбиты принять равным  $0.53 \cdot 10^{-10}$  м?

5. Два одинаковых шарика радиусом по 1.7 см подвешены на шелковых нитях длиной по 0.7 м в одной точке. При сообщении шарикам зарядов по  $2.2 \cdot 10^{-6}$  Кл нити разошлись на угол  $90^\circ$ . Какова плотность материала шариков и сила электростатического отталкивания между ними?

6. На двух одинаковых капельках масла находится по 100 лишних электронов. Сила электрического отталкивания уравновешивается силой их взаимного тяготения. Найти объем каждой капельки, если плотность масла  $0.9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

7. Два заряда взаимодействуют в вакууме на расстоянии  $2.2 \cdot 10^{-2}$  м с такой же силой, как в трансформаторном масле на расстоянии 1.48 см. Какова диэлектрическая проницаемость трансформаторного масла?

8. Два шарика массами по 0.5 г подвешены на шелковых нитях длиной по 1 м в одной точке. При сообщении шарикам зарядов они разошлись на 4 см. Определить заряд каждого шарика и силу их электростатического отталкивания.

9. Вычислить ускорение, сообщаемое одним электроном другому, находящемуся от первого на расстоянии 1 мм в вакууме.

10. Шарик массами 1 и 10 г заряжены. Заряд первого равен  $3 \cdot 10^{-14}$  Кл, а заряд второго надо определить, если известно, что сила их кулоновского отталкивания уравновешивается силой взаимного тяготения.

11. Сколько электронов содержит заряд пылинки массой  $10^{-11}$  кг, если она удерживается в равновесии в горизонтально расположенном плоском конденсаторе? Расстояние между обкладками конденсатора 1 см, разность потенциалов на обкладках 100 В.

12. Электрон движется по направлению силовых линий однородного поля напряженностью 2.4 В/м. Какое расстояние он пролетит в вакууме до полной остановки, если его начальная скорость  $2 \cdot 10^6$  м/с? Сколько времени будет длиться полет?

13. В вершинах равностороннего треугольника со сторонами по 4 см находятся равные заряды по  $3 \cdot 10^{-9}$  Кл. Определить напряженность поля в точке, лежащей на середине стороны треугольника.

14. Расстояние между двумя точечными зарядами  $+3.3 \cdot 10^{-7}$  К и  $-3.3 \cdot 10^{-7}$  К равно 1 см. Найти напряженность поля в точке, находящейся на перпендикуляре, восстановленном к середине линии, соединяющей оба заряда на расстоянии 1 см от нее.

15. Две бесконечно длинные равномерно заряженные нити с линейной плотностью зарядов  $6 \cdot 10^{-5}$  Кл/м расположены на расстоянии 0.2 м друг от друга. Найти напряженность электрического поля, созданного в точке, удаленной на 0.2 м от каждой нити.

16. Шар с зарядом  $2 \cdot 10^{-6}$  Кл имеет потенциал 1800 В. Он опущен в керосин ( $\epsilon = 2$ ). Найти напряженность, индукцию и потенциал в точке поля, удаленной от поверхности шара на 10 см.

17. Две параллельные металлические пластины, расположенные в диэлектрике с диэлектрической проницаемостью 2.2, обладают поверхностной плотностью заряда 3 и 2 мкКл/м<sup>2</sup>. Определить напряженность и индукцию электрического поля между пластинами и вне пластин.

18. К двум очень длинным параллельным пластинам приложено напряжение 6 кВ. Поверхностная плотность зарядов на пластинах 3.2 мкКл/м<sup>2</sup>. Определить расстояние между пластинами и напряженность поля между пластинами и вне пластин.

19. Найти значение и направление напряженности электрического поля, созданного точечным зарядом  $18 \cdot 10^{-8}$  Кл и бесконечно длинной заряженной

нитью с линейной плотностью заряда  $0.5 \cdot 10^{-5}$  Кл/м в точке, удаленной от заряда на 4 см, от нити на 3 см. Расстояние между зарядом и нитью 5 см. Решение пояснить рисунком.

20. Чему равна напряженность поля в центре квадрата, в вершинах которого последовательно расположены заряды 1, 2, 3 и 4 Кл? Сторона квадрата равна 10 см.

21. Поверхностная плотность заряда на бесконечной равномерно заряженной плоскости равна  $3 \cdot 10^{-10}$  Кл/м<sup>2</sup>. Вычислить поток вектора напряженности через поверхность сферы диаметром 1 м, рассекаемой этой плоскостью пополам.

22. Электрическое поле создается тонкой бесконечно длинной нитью равномерно заряженной с линейной плотностью заряда  $1 \cdot 10^{-10}$  Кл/м. Определить поток вектора напряженности через цилиндрическую поверхность длиной 2 м, ось которой совпадает с нитью.

23. Бесконечно длинный цилиндр радиусом 0.1 м заряжен с поверхностной плотностью заряда  $1 \cdot 10^{-10}$  Кл/м. Определить поток вектора напряженности через единицу длины цилиндрической коаксиальной поверхности в случаях, когда окружающая среда: 1) воздух, 2) вода.

24. Протон, двигаясь в электрическом поле, приобрел скорость 400 м/с. Какую ускоряющую разность потенциалов он пролетел?

25. Два заряда  $1 \cdot 10^{-7}$  и  $1 \cdot 10^{-8}$  Кл находятся на расстоянии 40 см один от другого. Какую работу надо совершить, чтобы сблизить их до расстояния 15 см?

26. Определить потенциал точки поля, находящейся на расстоянии  $5 \cdot 10^{-2}$  м от центра заряженного шара, если напряженность поля в этой точке  $3 \cdot 10^5$  В/м. Определить величину заряда шара.

27. Два равных точечных заряда по  $10^{-8}$  Кл каждый находятся на расстоянии 1 м друг от друга. Вычислить напряженность  $E$  и потенциал  $\phi$  в точке поля, находящейся на середине расстояния между зарядами. Какую работу надо совершить, чтобы сблизить их до расстояния 0.5 м?

28. Пылинка, несущая заряд  $12.2 \cdot 10^{-9}$  Кл, притянулась к равномерно заряженной плоскости площадью  $2 \text{ м}^2$  с зарядом  $10^{-5}$  Кл/м<sup>2</sup>. Определить, какое расстояние при этом пролетела пылинка, если работа, совершенная полем, равна  $56 \cdot 10^{-5}$  Дж.

29. В поле заряда  $2.2 \cdot 10^{-6}$  Кл перемещается заряд  $-3 \cdot 10^{-8}$  Кл. Вычислить работу, совершаемую полем, если перемещение происходило между точками с напряженностью 400 и  $2 \cdot 10^4$  В/м.

30. Определить потенциал в начальной точке перемещения заряда  $-6 \cdot 10^{-8}$  Кл, движущегося в поле заряда  $+4 \cdot 10^{-8}$  Кл, если энергия, затраченная на перемещение заряда, равна  $6 \cdot 10^{-5}$  Дж, а потенциал конечной точки 1500 В. Установить, на каком расстоянии находились заряды в начале и конце перемещения.

31. Равномерно заряженная бесконечно протяженная плоскость с поверхностной плотностью заряда  $4 \cdot 10^{-5}$  Кл/м<sup>2</sup> и точечный заряд  $10^{-8}$  Кл

находятся на расстоянии 0.5 м. Какую работу надо совершить, чтобы сблизить их до расстояния 0.2 м?

32. Конденсатор с парафиновым диэлектриком емкостью  $4.42 \cdot 10^{-11}$  Ф заряжен до разности потенциалов 150 В. Напряженность поля внутри конденсатора  $6 \cdot 10^2$  В/м. Определить площадь пластин конденсатора, энергию поля конденсатора и поверхностную плотность заряда на пластине.

33. Расстояние между пластинами слюдяного конденсатора 2.2 мм, а площадь каждой пластины  $6 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>. Пластины притягиваются с силой 0.04 Н. Определить разность потенциалов между пластинами и электрическую емкость конденсатора.

34. В горизонтально расположенном плоском воздушном конденсаторе в равновесии удерживаются пылинки с зарядом  $4.8 \cdot 10^{-19}$  Кл. Какова масса пылинки, если разность потенциалов на пластинах 60 В, расстояние между ними  $12 \cdot 10^{-3}$  м? Какова индукция поля?

35. Между обкладками плоского конденсатора с площадью пластины 22 см<sup>2</sup> находится стекло толщиной 1.4 мм, на которое нанесен парафин слоем 4 мм. Определить емкость конденсатора и падение потенциала в каждом слое, если разность потенциалов на пластинах 1 кВ.

36. Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора 6 кВ. Определить силу взаимодействия между пластинами, энергию и плотность энергии конденсатора, если расстояние между пластинами 0.02 м, а площадь каждой из них 100 см<sup>2</sup>.

37. Электрон, пролетев в поле с разностью потенциалов  $10^4$  В, попадает в плоский конденсатор длиной 10 см и движется в первый момент параллельно пластинам на равном расстоянии от них. Расстояние между пластинами 2 см, разность потенциалов между ними 300 В. Определить вертикальное смещение электрона при вылете из конденсатора.

38. Конденсатор емкостью 3 мкФ зарядили до разности потенциалов 300 В, а конденсатор емкостью 2 мкФ - до 200 В. После зарядки конденсаторы соединили параллельно. Найти разность потенциалов на обкладках конденсаторов после их соединения.

39. Плоский конденсатор заряжен до разности потенциалов 500 В, расстояние между его пластинами 5 мм. Определить объемную плотность энергии поля конденсатора, если между пластинами находится: 1) воздух; 2) стеклу.

40. Расстояние между пластинами плоского конденсатора равно 8 мм, площадь пластин 62.8 см<sup>2</sup>. Какую работу нужно затратить, чтобы вдвинуть между пластинами конденсатора пластинку стекла той же площади и толщиной 6 мм, если пластины конденсатора присоединены к источнику напряжения 600 В?

41. Батарею из двух конденсаторов емкостью по  $3 \cdot 10^{-10}$  и  $4.5 \cdot 10^{-10}$  Ф соединили последовательно, включили в сеть с напряжением 220 В. Потом батарею отключили от сети, а конденсаторы соединили параллельно. Каково напряжение на зажимах полученной батареи конденсаторов?

42. На пластинах плоского воздушного конденсатора с площадью пластин  $150 \text{ см}^2$  находится заряд  $5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ . Какова сила взаимного притяжения между пластинами и объемная плотность энергии поля конденсатора?

43. Батарея из последовательно соединенных конденсаторов емкостью  $10^{-9}$  и  $5 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$  заряжена до напряжения  $2 \text{ кВ}$ . Какое количество электричества запасено в батарее?

44. Плотность энергии заряженного слюдяного конденсатора  $106 \text{ Дж/м}^3$ . Какова напряженность поля конденсатора?

45. Воздушный конденсатор емкостью  $10^{-2} \text{ мкФ}$  заряжен до  $20 \text{ кВ}$ . Предполагая, что при разряде разрядником  $20\%$  энергии рассеивается в виде звуковых и электромагнитных волн, определить количество теплоты, выделяемой в разряднике.

46. Найти энергию поляризованного слюдяного диэлектрика, находящегося в конденсаторе, если площадь пластины конденсатора  $25 \text{ см}^2$ , толщина диэлектрика  $9 \text{ мм}$  и пластины заряжены до напряжения  $2 \text{ кВ}$ .

47. На концах проводника длиной  $3 \text{ м}$  поддерживается разность потенциалов  $1.5 \text{ В}$ . Каково удельное сопротивление проводника, если плотность тока  $5 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$ ?

48. Источник тока, имеющий ЭДС  $150 \text{ В}$  и внутреннее сопротивление  $0.4 \text{ Ом}$ , питает током  $10$  ламп сопротивлением по  $240 \text{ Ом}$  и  $5$  ламп сопротивлением  $145 \text{ Ом}$  каждая. Лампы соединены параллельно, сопротивление подводящих проводов  $2.5 \text{ Ом}$ . Найти напряжение, под которым работают лампы.

49. Три гальванических элемента (рис. 3) с ЭДС  $1.3$ ,  $1.4$  и  $1.5 \text{ В}$  и с внутренним сопротивлением  $0.3 \text{ Ом}$  каждый соединены параллельно и замкнуты внешним сопротивлением  $0.6 \text{ Ом}$ . Определить ток в каждом элементе.

50. Напряжение на шинах электростанции равно  $10 \text{ кВ}$ . Расстояние до потребителя  $500 \text{ км}$  (линия двухпроводная). Станция должна передать потребителю мощность  $100 \text{ кВт}$ . Потери напряжения на проводах не должны превышать  $4\%$ . Вычислить вес медных проводов на участке электростанция-потребитель.

51. В электронной лампе ток идет от металлического цилиндра к нити, расположенной внутри него по оси. Определить плотность тока вблизи нити и вблизи цилиндра при следующих условиях: ток равен  $3 \text{ мА}$ , длина нити в цилиндре  $2.5 \text{ см}$ , диаметр нити  $0.02 \text{ мм}$ , диаметр цилиндра  $1 \text{ см}$ .

52. Имеется моток медной проволоки площадью поперечного сечения  $0.1 \text{ мм}^2$ . Масса всей проволоки  $0.3 \text{ кг}$ . Определить сопротивление проволоки.

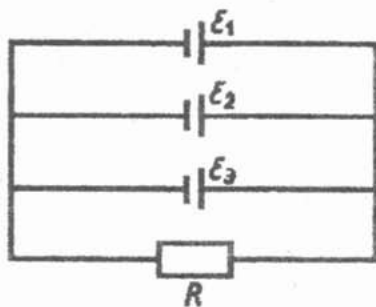


Рис. 3

53. Какое напряжение можно дать на катушку, имеющую 1000 витков медного провода со средним диаметром витков  $d = 6$  см, если допустимая плотность тока  $j = 2$  А/мм<sup>2</sup>.

54. Аккумулятор замыкается один раз таким сопротивлением, что сила тока равна 3 А, второй раз таким сопротивлением, что сила тока равна 2 А. Определить ЭДС аккумулятора, если мощность тока во внешней цепи в обоих случаях одинакова, а внутреннее сопротивление аккумулятора равно 4 Ом.

55. Сколько ламп мощностью по 300 Вт, предназначенных для напряжения 110 В, можно установить параллельно в здании, если проводка от магистрали сделана медным проводом длиной 100 м и сечением 9 мм<sup>2</sup>, а напряжение в магистрали равно 122 В?

56. ЭДС батареи равна 18 В. КПД батареи составляет 0.9 при силе тока 4.5 А. Чему равно внутреннее сопротивление батареи?

57. Трамвайный вагон потребляет ток 100 А при напряжении 600 В и развивает силу тяги 3000 Н. Определить скорость движения трамвая на горизонтальном участке пути, если КПД электродвигателя трамвая 80 %.

58. Обмотка электромагнитов в динамомашине сделана из медного провода и при температуре 10°C имеет сопротивление 14.2 Ом. При работе сопротивление обмотки повысилось до 16.5 Ом. Какой стала температура обмотки?

59. Электропечь должна выпаривать за 5 мин 1 л воды, взятой при 20°C. Какова должна быть длина нихромовой проволоки с сечением 0.5 мм<sup>2</sup>, если печь работает под напряжением 120 В и ее КПД 80 %?

60. В медных шинах площадью сечения 25 см<sup>2</sup> течет ток 250 А. Определить количество теплоты, выделяющейся в единице объема за единицу времени.

61. Электрическая лампочка накаливания потребляет ток 0.2 А. Диаметр вольфрамового волоска равен 0.02 мм, температура волоска при горении лампы 2000°C. Определить напряженность электрического поля в волоске.

62. В железном проводнике длиной 2 м и площадью поперечного сечения 0.4 мм<sup>2</sup> идет ток. При этом за минуту выделяется теплота 48 Дж. Определить напряженность электрического поля в проводнике.

63. Определить плотность электрического тока в железном проводнике, если тепловая энергия, выделяемая в единице объема за секунду, равна  $9.8 \cdot 10^4$  Дж/(м<sup>3</sup>·с).

64. На концах проводника длиной 6 м поддерживается разность потенциалов 120 В. Каково удельное сопротивление проводника, если плотность тока в нем  $5 \cdot 10^{-8}$  А/м<sup>2</sup>.

65. В цепь гальванометра включена термопара, состоящая из медной и константановой проволоки длиной по 1 м и диаметром 0.2 мм. На сколько делений отклонится стрелка гальванометра, если спай термопары нагреть на 50°C. Внутреннее сопротивление гальванометра 50 Ом, чувствительность гальванометра  $10^{-6}$  А/дел, чувствительность термопары 40 мкВ/К.

66. Термоэлемент, состоящий из пары медь-константан, обладает удельной термоэдс  $10^{-5}$  В/град. Определить разность температур спаев

термоэлемента, если сопротивление термоэлемента и подводящих проводов 40 Ом. Гальванометр, включенный в цепь термоэлемента, показывает ток  $7.8 \cdot 10^{-6}$  А, сопротивление гальванометра 320 Ом.

67. Найти число ионов, образующихся при рентгеновском облучении в  $1 \text{ м}^3$  воздуха за 1 с, если плоские электроды находятся на расстоянии 25 см друг от друга, площадь их  $400 \text{ см}^2$ , ток  $8 \cdot 10^{-8}$  А. Ионы считать одновалентными.

68. При ионизации воздуха образовались одновалентные ионы с подвижностями  $u_+ = 1.38 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{сВ})$ ,  $u_- = 1.91 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{сВ})$ . Определить напряженность электрического поля в воздухе, если концентрация ионов  $1.2 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$ , а плотность тока  $1.3 \cdot 10^{-6} \text{ А/м}^2$ .

69. Какова минимальная скорость электронов, вызвавших ионизацию атомов неона и лития если потенциалы их ионизации равны 21.6 и 5.4 эВ соответственно?

70. В ионизационной камере находится аргон, потенциал ионизации которого 15.8 эВ. Какой скоростью должен обладать электрон, чтобы ионизировать атом аргона?

## РАЗДЕЛ IV. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

### Основные законы и формулы

Величина или физический закон	Формула
Закон Ампера	$dF = Bld \sin \alpha$
Индукция магнитного поля	$B = \mu \mu_0 H$
Механический момент, действующий на контур с током	$M = p_m B \sin \alpha$
Магнитный момент контура с током	$p_m = IS$
Закон Био-Савара-Лапласа	$dH = \frac{Id \sin \alpha}{4\pi r^2}$
Напряженность магнитного поля в центре кругового тока	$H = I/(2R)$
Циркуляция вектора напряженности магнитного поля	$\oint H dl \cos(\hat{H}, \hat{dl}) = \sum_{k=1}^{k=n} I_k$
Напряженность магнитного поля, созданного бесконечно длинным прямым проводником с током	$H = I/(2\pi R)$

Величина или физический закон	Формула
Напряженность магнитного поля, создаваемого отрезком проводника	$H = \frac{I}{4\pi r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$
Напряженность магнитного поля внутри тороида и бесконечно длинного соленоида	$H = In$
Сила взаимодействия двух прямолинейных проводников с током	$F = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}$
Напряженность магнитного поля, создаваемого движущимся зарядом	$H = \frac{qv \sin \alpha}{4\pi r^2}$
Сила Лоренца	$F = qvB \sin \alpha$
Магнитный поток однородного магнитного поля	$\Phi = B_n S$
Работа по перемещению проводника с током и контура с током в магнитном поле	$A = I \Delta \Phi$
Основной закон электромагнитной индукции	$\mathcal{E}_n = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}$
Потокоцепление	$\Psi = N\Phi$
Потокоцепление соленоида	$\Psi = LI$
Электродвижущая сила самоиндукции	$\mathcal{E}_c = -L \frac{dI}{dt}$
Индуктивность соленоида	$L = \mu\mu_0 n^2 l S$
Количество электричества, протекающего в контуре при возникновении в нем индукционного тока	$q = -\frac{\Delta\Psi}{R}$
Мгновенное значение силы тока в цепи, обладающей сопротивлением $R$ и индуктивностью $L$ :	$I = I_0 e^{-Rt/L} + \mathcal{E}(1 - e^{-Rt/L})/R$
при замыкании	$I_0 = 0$
при размыкании	$\mathcal{E} = 0$
Энергия магнитного поля	$W_M = LI^2/2$
Объемная плотность энергии магнитного поля	$w = \mu\mu_0 H^2/2$



Величина или физический закон	Формула
Формула Томсона	$T = 2\pi\sqrt{LC}$
Длина волны	$\lambda = cT$
Скорость распространения электромагнитных волн в среде	$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$

### Примеры решения задач

#### Пример 1.

Плоский контур (рамка) площадью  $4 \text{ см}^2$  расположен параллельно однородному магнитному полю напряженностью  $10^4 \text{ А/м}$ . По контуру кратковременно пропустили ток  $2 \text{ А}$ , и контур начал свободно вращаться. Считая условно в начале движения силу тока и вращающий момент неизменными, определить угловое ускорение контура, момент инерции которого  $10^{-6} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

*Дано:*  $S = 4 \text{ см}^2 = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ ;  $H = 10^4 \text{ А/м}$ ;  $I = 2 \text{ А}$ ;  $J = 10^{-6} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ,  
 $\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ .

*Найти:*  $\epsilon$ .

*Решение.* На контур с током в магнитном поле действует вращающий момент:  $M = BIS \cdot \sin\alpha$ , где  $B$  - индукция магнитного поля;  $I$  - сила тока в контуре;  $S$  - площадь контура;  $\alpha$  - угол между направлением нормали к плоскости контура и индукцией поля.

Магнитный момент контура  $p_m = IS$ . По условию задачи плоскость рамки совпадает с направлением индукции поля. На рамку действует максимальный вращающий момент ( $\alpha = 90^\circ$ )

$$M_{вр} = Bp_m. \quad (1)$$

Индукция  $B$  связана с напряженностью  $H$  поля соотношением  $B = \mu_0 H$ , где  $\mu$  - магнитная проницаемость среды (для воздуха  $\mu = 1$ );  $\mu_0$  - магнитная постоянная. Поэтому (1) запишем в виде

$$M_{вр} = \mu_0 H p_m. \quad (2)$$

Второй закон динамики вращательного движения выражается уравнением

$$M = J\epsilon, \quad (3)$$

где  $J$  - момент инерции тела (в данном случае - рамки);  $\epsilon$  - угловое ускорение. Из выражений (2) и (3) находим

$$\epsilon = \mu_0 H p_m / J.$$

Подставляя числовые значения (в единицах СИ), получаем

$$\varepsilon = \frac{126 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м} \cdot 10^4 \text{ А/м} \cdot 2\text{А} \cdot 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2}{10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2} = 10.1 \text{ с}^{-2}.$$

Ответ:  $\varepsilon = 10.1 \text{ с}^{-2}$ .

### Пример 2.

По двум длинным параллельным проводникам (фидерам) текут токи в одном направлении силой 2 кА. В одной плоскости с фидерами параллельно им закреплен отрезок замкнутого прямого проводника длиной 0.5 м. Определить силу тока, протекающего по проводнику, если после снятия закреплений он начинает двигаться с ускорением,  $1 \text{ м/с}^2$ ? Масса проводника 100 г, он расположен на расстоянии 20 см от одного и 40 см от другого фидера. Принять фидеры и проводник за линейные и находящиеся в воздухе.

Дано:  $I_1 = I_2 = 2000 \text{ А}$ ;  $l = 0.5 \text{ м}$ ;  $a = 1 \text{ м/с}^2$ ;  $m = 100 \text{ г} = 0.1 \text{ кг}$ ;  $r_2 = 0.2 \text{ м}$ ;  $r_1 = 0.4 \text{ м}$ .

Найти:  $I_3$ .

Решение. На рис. 4 показано сечение, перпендикулярное проводникам. Ток в фидерах 1 и 2 создает магнитное поле, в котором находится отрезок замкнутого прямого проводника 3. На элемент проводника  $d\vec{l}$  с током  $I$  в магнитном поле действует сила Ампера  $F = BIdl \sin(\hat{d\vec{l}}, \hat{B})$ , где  $B$  - индукция поля.

Угол под знаком синуса составлен направлениями вектора индукции и элемента проводника с током. По условию задачи индукция одинакова для всех точек отрезка проводника и проводник длиной  $l$  прямой, тогда сила Ампера равна

$$F = BI \sin(\hat{d\vec{l}}, \hat{B}). \quad (1)$$

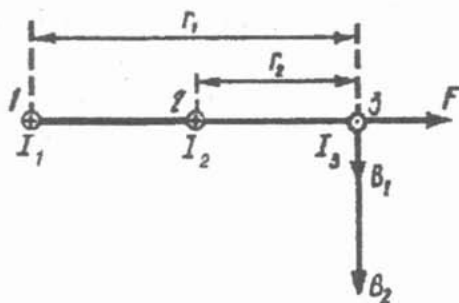


Рис. 4

Найдем индукцию в той области поля, где расположен отрезок проводника. Ее мы определим, используя закон Био-Савара-Лапласа для бесконечно длинных прямолинейных проводников:  $B = \mu_0 H$ ,  $B = \mu_0 I / (2\pi r)$ , где  $\mu = 1$  - магнитная проницаемость среды;  $\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$  - магнитная постоянная;  $I$  - сила тока в проводнике, создающем на рас-

стоянии  $r$  индукцию  $B$  (в рассматриваемом случае - ток в фидерах).

Вектор индукции перпендикулярен плоскости, содержащей  $r$  и элемент тока  $I$ , и его направление определяется правилом винта. По условию задачи

вектор  $B$  лежит в плоскости, перпендикулярной проводникам, и направлен под прямым углом к  $g$ . Поэтому фидеры в области отрезка проводника создают поля, векторы индукции которых имеют одинаковое направление. Следовательно, суммарная индукция  $B = \mu\mu_0 I_1 / (2\pi r_1) + \mu\mu_0 I_2 / (2\pi r_2)$  или

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \left( \frac{I_1}{r_1} + \frac{I_2}{r_2} \right). \quad (2)$$

Подставив выражение (2) в (1), найдем силу, действующую на отрезок проводника с током  $I_3$ :

$$F = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \left( \frac{I_1}{r_1} + \frac{I_2}{r_2} \right) I_3 l \quad (3)$$

(угол между вектором индукции и током прямой).

Направление силы  $F$  определяется правилом левой руки. Если ток  $I_3$  противоположен токам  $I_1$  и  $I_2$  - это будет сила отталкивания, когда ток  $I_3$  совпадает с направлением токов  $I_1$  и  $I_2$ , возникает сила притяжения. По условию задачи  $I_1 = I_2 = I$  и  $r_1 = 2r_2$ , поэтому (3) можно записать в виде

$$F = 3\mu\mu_0 I I_3 l / (2 \cdot 2\pi r_2). \quad (4)$$

Подставляя во второй закон Ньютона  $F = ma$ , силу, найденную по формуле (4), можно определить искомый ток

$$I_3 = ma / (4\pi r_2 / (l \cdot 3\mu\mu_0 I)),$$

$$I_3 = \frac{0.1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м} / \text{с}^2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 14 \cdot 0.2 \text{ м}}{0.5 \text{ м} \cdot 3 \cdot 126 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} / \text{м} \cdot 2 \cdot 10^3 \text{ А}} = 66.5 \text{ А}.$$

*Ответ.*  $I_3 = 66.5 \text{ А}$ .

### Пример 3.

Изолированный прямолинейный проводник изогнут в виде прямого угла со стороной 20 см. В плоскости угла помещен кольцевой проводник радиусом 10 см так, что стороны угла являются касательными к кольцевому (рис. 5, а). Найти напряженность в центре кольца. Силы токов в угловом и кольцевом проводниках равны 2 А. Влияние подводящих проводов не учитывать.

*Дано:*  $l = 0.2 \text{ м}$ ;  $r_0 = 0.1 \text{ м}$ ;  $\beta_1 = \beta_2 = 45^\circ$ ;  $I = 2 \text{ А}$ .

*Найти:*  $H$ .

*Решение.* Напряженность  $dH$  в заданной точке поля от элемента проводника  $dl$  с током  $I$  (проводник имеет произвольную конфигурацию) определяется законом Био-Савара-Лапласа

$$dH = Idl \sin \alpha / (4\pi r^2), \quad (1)$$

где  $r$  - радиус-вектор, проведенный из элемента в точку, где определяется напряженность;  $\alpha$  - угол, составленный направлениями  $dl$  и  $r$ . Направление

напряженности перпендикулярно плоскости, содержащей  $dl$  и  $r$ , и определяется правилом винта. Например, в центре окружности (см. рис. 5, а) напряженности от всех элементов перпендикулярны плоскости окружности и

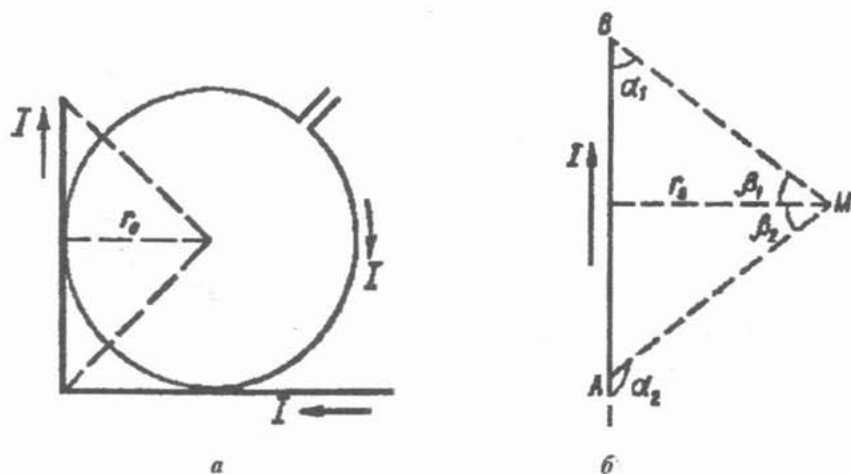


Рис. 5

направлены за плоскость рисунка. Напряженность в центре окружности радиуса  $r_0$  получается интегрированием (1):

$$H_1 = I/(2r_0). \quad (2)$$

В поле бесконечно длинного проводника напряженность на расстоянии  $r_0$  от проводника определяется через циркуляцию вектора напряженности, взятой по окружности радиусом  $r_0$ , совпадающей с линией напряженности. В результате получается

$$H_2 = I/(2\pi r_0). \quad (3)$$

Напряженность, создаваемая в точке М конечным отрезком АВ прямого проводника на расстоянии  $r_0$  от него (рис. 5, б), равна

$$H_3 = \frac{I}{4\pi r_0} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2).$$

Эту же формулу в некоторых случаях удобнее записать в виде

$$H_3 = \frac{I}{4\pi r_0} (\sin\beta_1 + \sin\beta_2).$$

В случае бесконечного проводника ( $\beta_1 = \beta_2 = 90^\circ$ ) получается формула (3). Направление напряженности в точке М перпендикулярно плоскости, в которой лежат проводник АВ и  $r_0$  (напряженность направлена за плоскость рисунка).

По условию задачи для каждой стороны  $\beta_1 = \beta_2 = 45^\circ$  и напряженность от двух сторон угла составляет

$$H'_3 = \frac{I\sqrt{2}}{4\pi_0 \cdot 2} + \frac{I\sqrt{2}}{4\pi_0 \cdot 2} = \frac{I\sqrt{2}}{4\pi_0}. \quad (4)$$

Так как направления напряженностей от углового и кольцевого токов совпадают (они направлены за плоскость рисунка), то результирующая напряженность в центре кольца равна сумме выражений (2) и (4):

$$H' = H_1 + H_3 = \frac{I}{2r_0} \left( 1 + \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \right),$$

$$H' = \frac{2A}{2 \cdot 0.1\text{м}} \left( 1 + \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot 3.14} \right) = 12.2 \text{ А/м}.$$

В случае, когда в местах касания токи в кольцевом и угловом проводниках противоположны, результирующая напряженность равна

$$H'' = H_1 - H_3, \quad H'' = 7.7 \text{ А/м}.$$

*Ответ:*  $H' = 12.2 \text{ А/м}$ ;  $H'' = 7.7 \text{ А/м}$ .

#### Пример 4.

Однослойная обмотка тороида без сердечника выполнена из проволоки диаметром 0.6 мм. Длина тороида 60 см (считая по оси тороида), площадь поперечного сечения  $15 \text{ см}^2$ , по обмотке течет ток силой 2 А. За время  $5 \cdot 10^{-4}$  с в обмотке выделяется количество теплоты, равное энергии магнитного поля внутри тороида. Найти напряжение, поданное на обмотку тороида.

*Дано:*  $d = 0.6 \text{ мм} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ ;  $l = 60 \text{ см} = 0.6 \text{ м}$ ;  $S = 15 \text{ см}^2 = 15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ;  $I = 2 \text{ А}$ ;  $t = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ ;  $Q = W_M$ .

*Найти:*  $U$ .

*Решение.* Тороидальная катушка-это система витков, намотанных на каркас в виде тора (рис. 6). При прохождении тока по обмотке внутри тороида возникает магнитное поле от системы кольцевых токов. Если витки намотаны равномерной плотно, то вследствие симметрии напряженность по числовому значению будет одинакова для каждой точки окружности, проведенной вокруг центра тороида. При малом диаметре витков по сравнению с диаметром тора можно принять, что величина напряженности одинакова для каждой точки внутри катушки, где

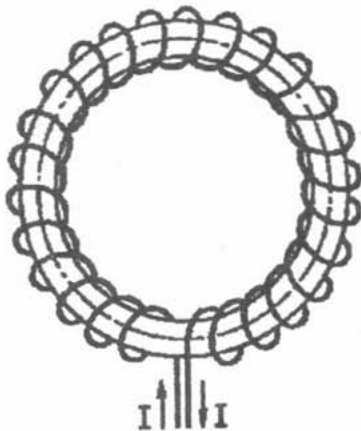


Рис. 6

сосредоточено магнитное поле. Поэтому (считая по модулю вектора напряженности) поле внутри тороида можно в расчетах принимать за однородное. Линии напряженности представляют собой систему окружностей с общим центром - центром тороида, и они проводятся с одинаковой густотой.

Запишем формулу для напряженности внутри тороида:

$$H = In, \quad (1)$$

где  $n = N/l$  - число витков, приходящихся на  $l$  м.

Найдем энергию магнитного поля внутри тороида:

$$W_M = \mu\mu_0 H^2 l S / 2,$$

где  $\mu = 1$  - магнитная проницаемость среды в полости тороида;  $\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м - магнитная постоянная;  $H$  - напряженность поля внутри тороида.

Произведение площади поперечного сечения  $S$  тороида на его длину  $l$  определяет объем поля. Считаем, что витки обмотки плотно прилегают друг к другу. Произведение диаметра  $d$  проволоки на число витков  $n$  дает длину тороида  $l = dN$ , откуда

$$n = N/dN = 1/d. \quad (2)$$

Используя формулы (1) и (2), находим энергию магнитного поля тороида:

$$W_M = \mu\mu_0 l S / d^2 \cdot I^2 / 2. \quad (3)$$

Отметим, что в выражении (3) множитель перед  $I^2/2$  определяет индуктивность тороида.

Ток силой  $I$  в обмотке за время  $t$  выделяет количество теплоты

$$Q = IUt, \quad (4)$$

где  $U$  - напряжение на обмотке.

Приравнивая правые части (3) и (4), находим напряжение, поданное на обмотку тороида:

$$U = \frac{\mu\mu_0 l S I / (2d^2 t)}{I t} = \frac{1.26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м} \cdot 15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot 0.6 \text{ м} \cdot 2 \text{ А}}{2 \cdot (6 \cdot 10^{-4} \text{ м})^2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}} = 6.3 \text{ В}.$$

Ответ:  $U = 6.3 \text{ В}$ .

### Пример 5.

Длинный соленоид с ферромагнитным сердечником имеет 10 витков на каждый сантиметр. Потокосцепление при  $\mu_{\text{серд}} = 1$  Вб. Зависимость индукции от напряженности магнитного поля показана на рис. 7. Определить: 1) максимальную магнитную проницаемость сердечника; 2) объем соленоида; 3) ЭДС самоиндукции, считая что за время  $10^{-4}$  с сила тока в обмотке

изменилась на  $10^{-3}$  А (магнитную проницаемость считать неизменной); 4) энергию поля при наибольшей напряженности его (в точке К, см. рис. 7).

Дано:  $n = 10 \text{ см}^{-1} = 10^3 \text{ м}^{-1}$ ;  
 $\Psi = 1 \text{ Вб}$ ;  $\Delta I = 10^{-3} \text{ А}$ ;  $\Delta t = 10^{-4} \text{ с}$ .

Найти:  $\mu_{\text{макс}}$ ,  $V$ ,  $\xi$ ,  $W$ .

Решение: Магнитная проницаемость сердечника входит в формулу, связывающую магнитную индукцию  $B$  и напряженность  $H$ , т. е.  $B = \mu_0 H$ . Откуда

$$\mu = B/(H\mu_0), \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$  - магнитная постоянная.

Как видно из формулы (1),  $\mu \sim B/H$ . На рис. 7  $B/H$  есть тангенс угла между осью  $H$  и прямой, проведенной из начала координат в данную точку кривой. Этот угол имеет наибольшее значение для точки М. Это соответствует значению  $\mu_{\text{макс}}$ . Для точки М по графику находим  $H = 1250 \text{ А/м}$ ;  $B = 0,93 \text{ Тл}$ . Откуда на основании формулы (1) получим

$$\mu_{\text{макс}} = 1 \cdot 0,93 \text{ Тл} / (1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м} \cdot 1250 \text{ А/м}) = 590.$$

По определению, потокоцепление соленоида  $\Psi = \Phi N$ , где  $\Phi$  - поток через один виток. Потокоцепление связано с индуктивностью соотношением

$$\Psi = LI, \quad (2)$$

где  $I$  - сила тока в обмотке. Индуктивность соленоида

$$L = \mu\mu_0 n^2 V, \quad (3)$$

где  $n$  - число витков, приходящихся на  $l$  м;  $V$  - объем соленоида. На основании (2) и (3) находим

$$V = \Psi / (\mu\mu_0 n^2 I). \quad (4)$$

Силу тока определим из формулы

$$H = In. \quad (5)$$

Решая совместно формулы (4) и (5), находим

$$V = \Psi / (\mu\mu_0 nH), \text{ или } V = \Psi / (nB),$$

$$V = 1 \text{ Вб} / (10^3 \cdot 0,93 \text{ Тл}) = 0,0107 \text{ м}^3.$$

ЭДС самоиндукции находится из общей формулы ЭДС индукции:

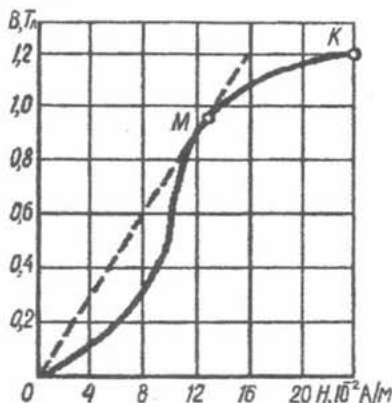


Рис. 7

$$\mathcal{E}_n = - \frac{d\psi}{\Delta t}.$$

Считаем, что сила тока в обмотке изменяется равномерно и, используя общую формулу ЭДС индукции, получаем

$$\mathcal{E}_o = -L \frac{dI}{\Delta t}.$$

Индуктивность соленоида и ЭДС самоиндукции равны [см. (3) и (6)]:

$$L = 590 \cdot 126 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м} \cdot 10^6 \text{ м}^{-2} \cdot 107 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 = 7.95 \text{ Гн};$$

$$\mathcal{E}_c = 7.95 \text{ Гн} \cdot 10^{-3} \text{ А/} 10^{-4} \text{ с} = 79.5 \text{ В}.$$

Энергия магнитного поля, выраженная через параметры контура с током, находится по формуле  $W_M = LI^2/2$ . Используя выражение (3) и (5), эту энергию можно вычислить по параметрам магнитного поля

$$W_M = \mu \mu_0 H^2 V / 2;$$

$$W_M = BHV / 2.$$

По заданию для точки К напряженность равна  $H = 2400 \text{ А/м}$ . Она соответствует индукции  $B = 1.2 \text{ Тл}$ . Тогда

$$W = 1.2 \text{ Тл} \cdot 2400 \text{ А/м} \cdot 107 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 / 2 = 15.4 \text{ Дж}.$$

*Ответ:*  $\mu_{\text{макс}} = 590$ ;  $V = 0.0107 \text{ м}^3$ ;  $\mathcal{E}_c = 79.5 \text{ В}$ ;  $W = 15.4 \text{ Дж}$ .

### Пример 6.

По длинному прямому проводнику М и параллельному ему отрезку проводника К длиной 60 см текут противоположно направленные токи силой 100 А. Проводник К закреплен на расстоянии  $r_1 = 10 \text{ см}$  от проводника М. На рис. 8, а показано сечение проводников. После открепления проводника К он переместился поступательно до расстояния  $r_2 = 100 \text{ см}$  от проводника М. Определить: 1) работу перемещения проводника К током  $I_1$ ; 2) мощность, развиваемую проводником К в точке, удаленной от проводника М на расстояние  $r_0 = 55 \text{ см}$ , принимая, что в этой точке скорость проводника К равна 10 м/с.

*Дано:*  $l = 60 \text{ см} = 0.6 \text{ м}$ ;  $I_1 = I_2 = 100 \text{ А}$ ;  $v = 10 \text{ м/с}$ ;  $r_1 = 10 \text{ см} = 0.1 \text{ м}$ ;  $r_2 = 100 \text{ см} = 1 \text{ м}$ ;  $r_0 = 55 \text{ см} = 0.55 \text{ м}$ .

*Найти:* А, Р.

*Решение.* На элемент проводника  $d\vec{l}$  с током  $I_1$  (проводник К) в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  действует сила, определяемая по закону Ампера:

$$d\vec{F} = BI_1 d\vec{l} \sin(\hat{d\vec{l}, \vec{B}}). \text{ В данном случае линии индукции поля длинного}$$



проводника - окружности с центрами, лежащими на оси проводника М. При этом плоскости окружностей перпендикулярны К, поэтому  $\sin(\hat{dl}, B) = 1$ .

Индукция в поле прямого длинного проводника  $B = \mu_0 I_2 / (2\pi r)$ , где  $\mu = 1$  - магнитная проницаемость вакуума;  $\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-8}$  Гн/м - магнитная постоянная. Индукция В убывает обратно пропорционально расстоянию от данной точки до проводника. Если подвижный проводник К находится на расстоянии  $r$  в поле проводника М, то для любого его элемента  $dl$  индукция будет одинакова. Поэтому сила, действующая на всю длину  $l$  проводника,

$$F = \mu_0 \frac{I_2}{2\pi r} I_1 \int_0^l dl, \text{ или}$$

$$F = \mu_0 I_1 I_2 l / (2\pi r). \quad (1)$$

Сила изменяется обратно пропорционально расстоянию между К и М. Характер изменения силы с расстоянием показан на рис. 8, б. Элементарная работа переменной силы на пути  $dr$  равна

$$dA = Fdr. \quad (2)$$

Графически эта работа изображается площадью заштрихованной полоски, а полная работа - площадью всей фигуры, ограниченной кривой в пределах от  $r_1$  до  $r_2$ . Работа перемещения проводника К от  $r_1$  до  $r_2$

$$A = \int_{r_1}^{r_2} Fdr = \int_{r_1}^{r_2} \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi} l \frac{dr}{r}.$$

Вынесем постоянный множитель за знак интеграла, тогда

$$A = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi} l \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r},$$

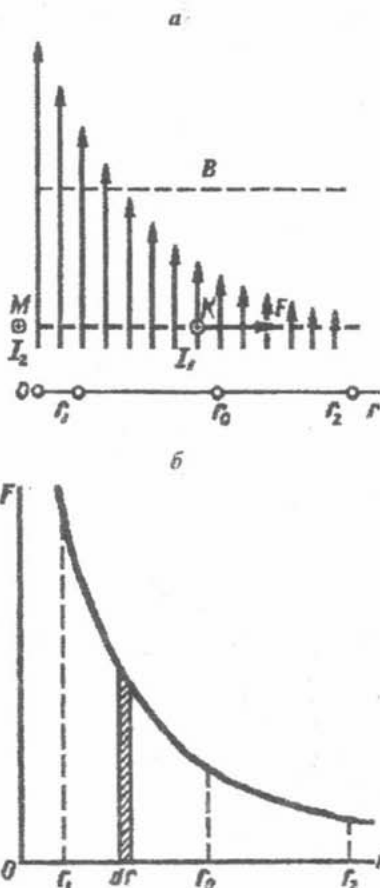


Рис. 8

$$A = \mu \mu_0 / \frac{I_1 I_2}{2\pi} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right),$$

$$A = 126 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м} \cdot 0.6\text{м} \cdot \frac{100\text{А} \cdot 100\text{А}}{2 \cdot 3.14} \cdot 23 = 2.6 \text{ мДж}.$$

Мгновенная мощность  $P_t = \frac{dA}{dt}$  [см (2)],  $P_t = F \frac{dr}{dt}$  или  $P_t = Fv$ , где  $v$  - скорость в заданной точке пути. Используя формулу (1), находим мощность в заданной точке:

$$P = \mu \mu_0 I_1 I_2 kv / (2\pi r_0),$$

$$P = 126 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м} \cdot 100\text{А} \cdot 0.6\text{м} \cdot 10\text{м/с} / (2 \cdot 3.14 \cdot 0.55\text{м}) = 0.24\text{Вт}.$$

Ответ:  $A = 2.6 \text{ мДж}$ ,  $P = 0.24 \text{ Вт}$ .

### Пример 7.

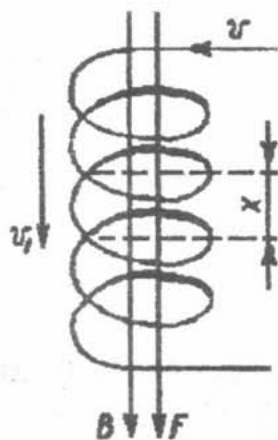


Рис. 9

Заряд влетает с постоянной скоростью в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции. Индукция поля 1 Тл. В течении 0.0001 с параллельно индукции магнитного поля действует электрическое поле напряженностью 100 В/м. Вычислить постоянный шаг спиральной траектории заряда.

Дано:  $B = 1 \text{ Тл}$ ,  $t = 0,0001 \text{ с} = 10^{-4} \text{ с}$ ;  
 $E = 100 \text{ В/м}$ .

Найти:  $x$ .

Решение. Магнитная составляющая силы Лоренца действует нормально направлению скорости  $v$  (рис. 9). Направление силы может быть определено правилом левой руки. При отсутствии электрического поля эта сила заставляет заряд двигаться по окружности. Магнитная составляющая силы Лоренца равна центростремительной силе:

$$Bqv \sin(\hat{v}, B) = mv^2/r, \tag{1}$$

где  $B$  - индукция поля;  $q$  - заряд;  $v$  - скорость заряда;  $m$  - масса заряда;  $r$  - радиус окружности, по которой движется заряд;  $\sin(\hat{v}, B) = 1$ . Радиус окружности находим из формулы (1):  $r = mv/(Bq)$ . Это выражение позволяет определить период вращения заряда:

$$T = 2\pi r/v = 2\pi m/(Bq). \quad (2)$$

При кратковременном действии электрического поля возникает электрическая составляющая силы Лоренца, направленная параллельно полю  $F_3 = qE$ , где  $E$  - напряженность электрического поля. При этом составляющая скорости, направленная параллельно полю, возрастает за время действия поля  $t$  от  $v = 0$  до  $v_1$ . Из формулы импульса силы  $F_3 t = mv_1$  находим

$$v_1 = qEt/m. \quad (3)$$

Если до действия электрического поля заряд двигался по окружности со скоростью  $v$ , то вследствие появления скорости  $v_1$ , направленной перпендикулярно  $v$ , возникает движение заряда по спирали. При установившемся движении шаг спирали  $x$  будет постоянным. Он определяется из условия, что за один оборот заряда (за период  $T$ ) происходит его смещение со скоростью  $v_1$  на величину шага  $x = v_1 T$ . Используя выражения (2) и (3), получаем

$$x = qEt \cdot 2\pi m / (mBq) = Et \cdot 2\pi / B,$$

$$x = 100 \text{ В/м} \cdot 10^{-4} \text{ с} \cdot 2 \cdot 3.14 / 1 \text{ Тл} = 0.0628 \text{ м} = 6.28 \text{ см}.$$

*Ответ:*  $x = 6.28 \text{ см}.$

#### Контрольная работа №4

1. Рамка диаметром 6 см содержит 100 витков. Плоскость витков совпадает с направлением напряженности однородного магнитного поля, равной 15 А/м. Какой вращающий момент действует на рамку при токе в ней 10 А?

2. Нормаль к плоскости рамки составляет угол  $30^\circ$  с направлением однородного магнитного поля. Под каким углом установилась рамка по отношению к полю, если вращающий момент, действующий на рамку, уменьшился в 10 раз. Решение пояснить рисунком.

3. Напряженность магнитного поля 50 А/м. В этом поле находится свободно вращающаяся плоская рамка площадью  $10 \text{ см}^2$ . Плоскость рамки вначале совпадала с направлением индукции поля. Затем по рамке кратковременно пропустили ток силой 1 А и рамка получила угловое ускорение  $100 \text{ с}^{-2}$ . Считая условно вращающий момент постоянным, найти момент инерции рамки.

4. Плоская круглая рамка диаметром 10 см находится в однородном магнитном поле. По рамке протекает ток силой 20 А. На сколько изменится вращающий момент, действующий на рамку, при повороте плоскости рамки на угол  $60^\circ$ ? До поворота плоскость рамки совпадала с направлением поля. Напряженность поля 20 А/м, среда - воздух.

5. Плоская круглая рамка состоит из 20 витков радиусом 2 см и по ней течет ток в 1 А. Нормаль к рамке составляет угол  $90^\circ$  с направлением

магнитного поля напряженностью  $30 \text{ А/м}$  (воздух). Найти изменение вращающего момента, действующего на рамку, если из  $20$  витков рамки сделать один круглый виток.

6. Под влиянием однородного магнитного поля в нем движется с ускорением  $0.2 \text{ м/с}^2$  прямолинейный алюминиевый проводник с площадью поперечного сечения  $1 \text{ мм}^2$ . По проводнику течет ток силой  $5 \text{ А}$ , его направление перпендикулярно индукции поля. Вычислить индукцию поля.

7. В однородном горизонтальном магнитном поле находится в равновесии горизонтальный прямолинейный алюминиевый проводник с током силой  $10 \text{ А}$ , расположенный перпендикулярно полю. Определить индукцию поля, считая радиус проводника равным  $2 \text{ мм}$ .

8. По двум параллельным проводникам текут токи силой  $70$  и  $80 \text{ А}$ . Расстояние между проводниками  $1.4 \text{ см}$ . С какой силой действуют провода на каждый метр длины?

9. Проводник длиной  $20 \text{ см}$  с током силой  $10 \text{ А}$  находится в магнитном поле, индукция которого  $0,03 \text{ Тл}$ . Направление тока составляет с направлением индукции поля угол  $60^\circ$ . Определить силу, действующую на проводник.

10. В магнитном поле длинного прямолинейного проводника 1 с током силой  $50 \text{ А}$  находится отрезок прямолинейного проводника 2 длиной  $40 \text{ см}$ , по которому проходит ток силой  $10 \text{ А}$ . Проводники 1 и 2 параллельны друг к другу и расстояние между ними  $20 \text{ см}$ . Какая сила действует на проводник 2? (среда-воздух).

11. По двум параллельным проводникам текут токи силой  $8$  и  $12 \text{ А}$ . Расстояние между проводниками  $32 \text{ см}$ . Определить напряженность магнитного поля токов в точках, лежащих посередине между проводниками, если: 1) токи текут в одном направлении; 2) в противоположных направлениях. Сделать рисунок.

12. Расстояние между длинными параллельными проводниками с токами силой  $5$  и  $10 \text{ А}$  равно  $0.16 \text{ м}$ . Токи текут в противоположных направлениях. Как расположена линия, в каждой точке которой напряженность равна нулю? На каком расстоянии находится эта линия от проводника с током силой  $5 \text{ А}$ ?

13. По двум длинным проводникам, расположенным параллельно друг к другу на расстоянии  $10 \text{ см}$ , текут в одном направления токи силой  $3.14$  и  $6.28 \text{ А}$ . Определить напряженность поля в точке, расположенной на расстоянии  $0.1 \text{ м}$  от первого проводника и  $0,1 \text{ м}$  от второго. Сделать рисунок.

14. Два длинных прямолинейных проводника с токами силой  $6$  и  $8 \text{ А}$  лежат в двух параллельных плоскостях. Токи текут во взаимно перпендикулярных направлениях. Найти напряженность поля в точке, равноудаленной от проводников и лежащей на перпендикуляре между ними. Длина перпендикуляра  $0.1 \text{ м}$ .

15. Прямолинейный проводник расположен перпендикулярно плоскости кругового проводника радиусом  $20 \text{ см}$  и проходит на расстоянии половины радиуса от центра. Прямолинейный ток имеет силу  $9.42 \text{ А}$ , а круговой -  $2 \text{ А}$ . Определить напряженность магнитного поля тока в центре круга.

16. Прямой длинный проводник изогнут в виде угла, равного  $60^\circ$ . По проводнику течет ток силой 10 А. Определить индукцию магнитного поля при  $\mu = 1$  на биссектрисе внутри угла на расстоянии 20 см от вершины.

17. Перпендикулярно плоскости кольцевого проводника радиусом 20 см проходит изолированный длинный проводник так, что он касается кольца. Сила тока в проводниках 10 А. Найти суммарную напряженность магнитного поля в центре кольца.

18. Кольцевые проводники с током силой 5 и 10 А имеют общий центр и радиусы 12 и 16 см. Их плоскости составляют угол  $45^\circ$ . Найти индукцию магнитного поля в общем центре колец.

19. Вывести формулу и определить напряженность магнитного поля проводника в форме дуги окружности радиусом 20 см в центре этой окружности. Длина дуги равна половине окружности, сила тока в проводнике 4 А.

20. Два проводника в виде полуколец лежат в одной плоскости и имеют общий центр. Определить напряженность магнитного поля в центре полуколец при следующих данных: радиусы их соответственно равны 10 и 20 см, токи текут в обоих проводниках по часовой стрелке и равны соответственно 1 и 4 А.

21. При конструировании прибора потребовалось рассчитать соленоид, напряженность магнитного поля внутри которого вблизи середины была бы равна  $4 \cdot 10^4$  А/м. Обмотка изготавливается из проволоки диаметром 0.225 мм, которая выдерживает силу тока не более 1.5 А. Из какого минимального числа слоев будет состоять обмотка соленоида, если витки наматывать плотно друг к другу?

22. По обмотке двухслойного соленоида большой длины протекают токи силой 2 А. В одном случае направление токов противоположное, в другом случае - одинаковое. При этом напряженности соответственно равны 2 кА/м и 6 кА/м. Каковы диаметры проволок в обмотках?

23. Внутри длинного соленоида перпендикулярно его оси расположен прямой проводник с током силой 10 А длиной 5 см. Какая сила действует на проводник, если соленоид имеет 100 витков на 1 см и по обмотке течет ток силой 0.5 А?

24. Первый слой двухслойного соленоида намотан из проволоки диаметром 0.4 мм и по нему течет ток силой 1 А, второй слой - из проволоки диаметром 0.8 мм и по нему течет ток силой 4 А. Найти напряженность поля внутри соленоида в случаях, когда токи текут в одном направлении и в противоположном.

25. На 1 см длины соленоида приходится 20 витков. Перпендикулярно оси соленоида, по обмотке которого течет ток силой 0.01 А, по диаметру проходит изолированный прямолинейный проводник большой длины с током силой 2 А. Определить напряженность магнитного поля на оси соленоида на расстоянии 10 см от прямого проводника. Поле внутри соленоида считать однородным. Решение иллюстрировать рисунком.

26. Найти силу тока, которую необходимо поддерживать в соленоиде, чтобы он создавал магнитный поток  $2 \cdot 10^{-4}$  Вб. Индуктивность соленоида  $0.3$  Гн, число витков  $750$ .

27. Зависимость индукции от напряженности магнитного поля для одного из сортов мягкой стали показана на рис. 10. Из этого материала выполнен сердечник тороида. Индукция поля  $B = 1.6$  Тл (по модулю считаем ее одинаковой во всех точках внутри тороида). Диаметр проволоки, из которой сделана плотная однослойная обмотка,  $1$  мм, объем тороида  $1000$  см<sup>3</sup>. Чему равна сила тока, текущего по обмотке тороида, индуктивность тороида и энергия его магнитного поля?

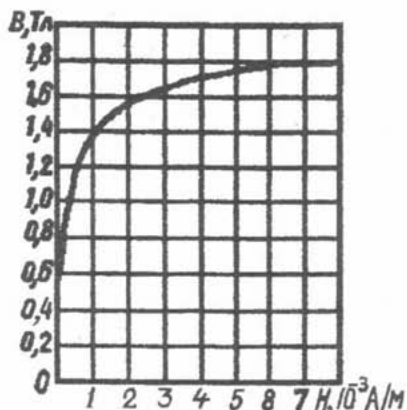


Рис. 10

диаметром  $1$  мм. Магнитные свойства сердечника отображены на рис. 10. При пропускании тока внутри соленоида создается напряженность  $1200$  А/м. Вычислить индуктивность соленоида при его объеме  $1000$  см<sup>3</sup>.

31. Проводник длиной  $50$  см, по которому течет ток силой  $1$  А, движется со скоростью  $1.4$  м/с перпендикулярно индукции магнитного поля напряженностью  $20$  А/м. Определить работу перемещения проводника за  $1$  ч движения.

32. Проводник длиной  $0.6$  м движется поступательно в плоскости, перпендикулярной магнитному полю с индукцией  $0.5$  мТл. По проводнику течет ток силой  $4$  А. Скорость движения проводника  $0.8$  м/с. Во сколько раз мощность, затраченная на нагревание проводника, больше мощности, затраченной на перемещение проводника в магнитном поле?

33. В горизонтальной плоскости вращается прямолинейный проводник длиной  $0.5$  м вокруг оси, проходящей через конец проводника. При этом он пересекает вертикальное однородное поле напряженностью  $50$  А/м ( $\mu = 1$ ). По проводнику течет ток силой  $4$  А, угловая скорость его вращения  $20$  с<sup>-1</sup>. Вычислить работу вращения проводника за  $2$  мин.

28. По обмотке тороида, состоящей из  $1000$  плотно намотанных витков, протекает ток силой  $2.4$  А. Длина тороида  $1$  м (по оси), диаметр витков  $2$  см. Зависимость индукции от напряженности сердечника дана на рис. 10. Определить энергию поля тороида.

29. По обмотке соленоида длиной  $1$  м протекает ток силой  $2.4$  А. Диаметр витков равен  $2$  см, число витков  $1000$ . Зависимость индукции от напряженности сердечника дана на рис. 10. Определить поток магнитной индукции внутри соленоида и потокоцепление.

30. Обмотка длинного соленоида выполнена в один слой из проволоки

34. Однородное магнитное поле в воздухе действует с силой  $0.01 \text{ Н}$  на  $1 \text{ см}$  длины прямого провода с током силой  $1000 \text{ А}$ , расположенного перпендикулярно полю. Найти объемную плотность энергии поля.

35. В однородном магнитном поле с индукцией  $4 \text{ Тл}$  движется прямолинейный проводник длиной  $1 \text{ м}$  со скоростью  $25 \text{ м/с}$ . Направление поля перпендикулярно длине и скорости проводника. Концы проводника соединены гибким проводом вне поля. Общее сопротивление цепи  $5 \text{ Ом}$ . Определить мощность, требуемую для движения проводника.

36. По обмотке тороида без сердечника протекает ток силой  $1 \text{ А}$ . Длина тороида по оси  $1 \text{ м}$ , число витков  $2000$ . Вычислить объемную плотность энергии магнитного поля тороида.

37. Обмотка электромагнита, индуктивность которого  $0.04 \text{ Гн}$ , находится под постоянным напряжением. В течение  $0.02 \text{ с}$  в обмотке его выделяется столько же теплоты, сколько энергии содержит магнитное поле. Найти сопротивление обмотки.

38. Круглая рамка с током силой  $1 \text{ А}$  и радиусом  $4 \text{ см}$  находится в воздухе в однородном магнитном поле, напряженность которого  $80 \text{ А/м}$ . Плоскость рамки составляет угол  $14^\circ$  с направлением индукции поля. Какую работу надо затратить, чтобы повернуть рамку перпендикулярно полю?

39. По обмотке соленоида без сердечника длиной  $0.6 \text{ м}$  протекает ток силой  $0.8 \text{ А}$  при напряжении  $8 \text{ В}$ . При этом внутри соленоида создается магнитное поле напряженностью  $1600 \text{ А/м}$ . Определить диаметр соленоида при условии, что за  $0.001 \text{ с}$  в обмотке соленоида выделяется количество теплоты, равное энергии магнитного поля соленоида. Магнитное поле считать однородным.

40. Прямолинейный проводник с током силой  $100 \text{ А}$  массой  $20 \text{ г}$  начинает перемещаться под действием однородного магнитного поля и пересекает магнитный поток  $10^{-4} \text{ Вб}$ . Считая, что проводник перемещается свободно и перпендикулярно полю, определить скорость, приобретенную проводником.

41. Какова скорость движения автомобиля, если в его вертикальной антенне длиной  $1.5 \text{ м}$  индуцируется ЭДС  $6 \cdot 10^{-4} \text{ В}$ ? Горизонтальную составляющую магнитного поля Земли считать равной  $14 \text{ А/м}$ . Автомобиль движется перпендикулярно магнитному меридиану.

42. Квадратная рамка площадью  $20 \text{ см}^2$ , состоящая из  $1000$  витков, расположена в однородном поле с индукцией  $10^{-3} \text{ Тл}$  перпендикулярно полю. В течение  $0.02 \text{ с}$  рамку удалили за пределы поля. Какова ЭДС в рамке?

43. В однородном магнитном поле напряженностью  $1000 \text{ А/м}$  (в воздухе) равномерно вращается круглая рамка, имеющая  $100$  витков средним радиусом  $6 \text{ см}$ . Ось вращения совпадает с диаметром рамки и перпендикулярна полю. Сопротивление рамки  $1 \text{ Ом}$  и угловая скорость ее вращения  $10 \text{ с}^{-1}$ . Найти максимальную силу тока в рамке.

44. Круглая рамка, имеющая  $200$  витков и площадь  $100 \text{ см}^2$ , равномерно вращается в однородном магнитном поле вокруг оси, перпендикулярной полю и совпадающей с ее диаметром. Вычислить частоту вращения при индукции



поля  $0.03 \text{ Тл}$ , если максимальный ток, индуцируемый в рамке при ее сопротивлении  $20 \text{ Ом}$ , составляет  $0.02 \text{ А}$ ?

45. Круглую рамку диаметром  $8 \text{ см}$ , нормаль к которой расположена под углом  $10^\circ$  к направлению вектора индукции поля, деформировали так, что она стала квадратной. Затем ее повернули так, что нормаль стала вдоль вектора индукции поля, напряженность которого  $5 \text{ кА/м}$ . Какое количество электричества индуцировалось в рамке, если ее сопротивление  $0.001 \text{ Ом}$ .

46. В соленоиде без сердечника сила тока равномерно возрастает на  $0.3 \text{ А/с}$ . Число витков соленоида  $1100$ , площадь его поперечного сечения  $100 \text{ см}^2$ , длина  $60 \text{ см}$ . На соленоиде надето изолированное кольцо того же диаметра. Вычислить ЭДС индукции в кольце.

47. В соленоиде сила тока равномерно возрастает от  $0$  до  $50 \text{ А}$  в течение  $0.5 \text{ с}$ , при этом соленоид накапливает энергию  $50 \text{ Дж}$ . Какая ЭДС индуцируется в соленоиде?

48. Число витков соленоида без сердечника  $400$ , его длина  $20 \text{ см}$ , поперечное сечение  $4 \text{ см}^2$ , сопротивление обмотки  $16 \text{ Ом}$ . В соленоиде сила тока возросла от  $0$  до  $10 \text{ А}$ . Какое количество электричества индуцировалось в нем?

49. Однослойный соленоид без сердечника выполнен из проволоки диаметром  $0.2 \text{ мм}$ . Длина соленоида  $16 \text{ см}$ , диаметр его  $3 \text{ см}$ . При какой скорости изменения силы тока в соленоиде возникает ЭДС самоиндукции  $1 \text{ В}$ ?

50. На  $1 \text{ см}$  однослойного соленоида без сердечника приходится  $40$  витков. Объем соленоида  $800 \text{ см}^3$ . При какой скорости изменения силы тока в соленоиде индуцируется ЭДС самоиндукции  $0.4 \text{ В}$ ?

51. Два электрона движутся в одном направлении вдоль одной прямой с одинаковой по модулю скоростью  $10^4 \text{ м/с}$ . Найти напряженность магнитного поля зарядов при расстоянии между ними  $4 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ . Точка, для которой определяется напряженность магнитного поля, лежит на серединном перпендикуляре к траектории на высоте  $3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ .

52. Протоны в магнитном поле с индукцией  $5 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$  движутся в вакууме по дуге окружности радиусом  $50 \text{ см}$ . Какую ускоряющую разность потенциалов они должны были пройти?

53. Два протона движутся в одной плоскости по прямолинейным взаимно-перпендикулярным направлениям к общей точке сближения. Чему равна напряженность магнитного поля на середине отрезка, соединяющего заряды? Напряженность определяется в момент времени, когда оба заряда подошли к точке сближения на расстояние  $10^{-7} \text{ см}$  и скорости их в этот момент были равны  $10^4$  и  $5 \cdot 10^4 \text{ м/с}$ .

54. В электронном пучке два электрона движутся по параллельным прямолинейным траекториям со скоростью  $10^5 \text{ м/с}$ . Расстояние между электронами, считая по перпендикуляру, равно  $5 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ . Принимая электроны за точечные заряды, найти силу их магнитного взаимодействия.

55. В электронном пучке два электрона движутся по параллельным прямолинейным траекториям со скоростью  $10^5 \text{ м/с}$ . Найти отношение силы электрического взаимодействия к силе их магнитного взаимодействия. Как направлены составляющие силы Лоренца?



56. Протон с энергией 10 МэВ пролетает через однородное магнитное поле в вакууме перпендикулярно полю. Считая напряженность поля равной 2 кА/м, найти силу Лоренца и радиус траектории протона.

57. В соленоид перпендикулярно вектору индукции его поля влетает  $\alpha$ -частица со скоростью  $5 \cdot 10^3$  м/с. Определить силу, действующую на нее при следующих данных: сила тока в обмотке 1 А, соленоид имеет 100 витков на 1 см длины и находится в вакууме.

58. Параллельно пластинам плоского конденсатора подано однородное магнитное поле напряженностью 3200 А/м. Между пластинами перпендикулярно направлению вектора индукции и параллельно пластинам движется электрон со скоростью  $5 \cdot 10^6$  м/с. Определить напряженность электрического поля между пластинами.

59. Заряд движется в вакууме прямолинейно со скоростью  $10^5$  м/с во взаимно перпендикулярных магнитном и электрическом полях. Каково должно быть отношение напряженностей этих полей, чтобы имело место такое движение? Как направлена скорость заряда?

60. Заряженная частица, пройдя ускоряющую разность потенциалов 200 В, влетела в скрещенные под прямым углом электрическое и магнитное поля, двигаясь перпендикулярно обоим полям. Напряженность электрического поля 12 кВ/м, индукция магнитного поля 0.6 Тл. Найти удельный заряд частицы.

61. Колебательный контур состоит из конденсатора и катушки индуктивности. Вычислить энергию контура, если максимальная сила тока в катушке 1.2 А. Максимальная разность потенциалов на обкладках конденсатора составляет 1200 В, частота колебаний контура  $10^5$  с<sup>-1</sup>. Потерями энергии пренебречь.

62. Источник тока подключили к катушке сопротивлением 40 Ом и индуктивностью 0.4 Гн. Через сколько времени сила тока в цепи достигнет 90 % максимального значения?

63. Максимальная энергия магнитного поля колебательного контура 1 мДж при силе тока 0.8 А. Чему равна частота колебаний контура, если максимальная разность потенциалов на обкладках конденсатора 1200 В?

64. Источник тока, подключенный к катушке индуктивностью 1 Гн, отключили, не разрывая цепь. За 0.69 с сила тока в цепи уменьшилась в 1000 раз. Определить сопротивление катушки.

65. Период колебаний контура, состоящего из индуктивности и емкости, составляет  $10^{-5}$  с. Чему равна максимальная сила тока в катушке, если максимальная разность потенциалов на обкладках конденсатора 900 В. Максимальная энергия электрического поля  $9 \cdot 10^{-4}$  Дж.

66. Через 5 мс после размыкания цепи сила тока в ней уменьшилась в 5 раз. Найти индуктивность цепи, если сопротивление ее составляет 46 Ом.

67. В колебательном контуре с периодом  $10^{-5}$  с напряжение на конденсаторе в момент времени  $2.5 \cdot 10^{-6}$  с (считая от напряжения, равного нулю) составляет 500 В. Найти емкость конденсатора при общей энергии контура 1 мДж.

68. Замкнутая электрическая цепь имеет сопротивление 23 Ом. За 10 мс после размыкания цепи сила тока в ней уменьшилась в 10 раз. Определить индуктивность цепи.

69. Сила тока в катушке колебательного контура изменяется по закону  $I = I_0 \cos 2\pi vt$ . Частота колебательного контура 1 МГц. В какой ближайший момент времени энергия магнитного поля катушки станет равной энергии электрического поля конденсатора?

70. По цепи сопротивлением 10 Ом, индуктивностью 0.03 Гн течет ток 40 А. Найти силу тока в цепи через 0.5 мс после отключения источника.

## СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 1. Основные физические постоянные (округленные значения)

Физические постоянные	Обозначение	Числовые значения
Заряд электрона	$e$	$1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса электрона	$m_e$	$9.1 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса протона	$m_p$	$1.67 \cdot 10^{-27}$ кг
Постоянная Фарадея	$F$	$9.65 \cdot 10^7$ Кл/(кг·эquiv)
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$1.26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м

2. Удельное сопротивление  $\rho \cdot 10^8$ , Ом·м  
 вольфрама - 5.5; железа - 9.8; никрома - 110.0;  
 меди - 1.7; серебра - 1.6; никелина - 40.0

3. Диэлектрическая проницаемость (относительная)  
 парафина - 2.0; слюды - 6.0; воды - 81.0;  
 трансформаторного масла - 2.2

4. Температурный коэффициент сопротивления проводников  $\alpha \cdot 10^{-3}$ ,  $K^{-1}$   
 меди - 4.2; вольфрама - 5.2

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ .....	-
ЛИТЕРАТУРА .....	5
РАБОЧАЯ ПРОГРАММА .....	-
РАЗДЕЛ II. ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ТОК .....	6
Примеры решения задач .....	9
Контрольная работа №3 .....	17
РАЗДЕЛ IV. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ .....	23
Примеры решения задач .....	25
Контрольная работа №4 .....	35
СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	42

# ФИЗИКА

## ЧАСТЬ 2. ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ТОК. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Программа, методические указания  
и контрольные задания для студентов заочного факультета всех  
специальностей

Александр Леонидович Ашкалунин

Владимир Олегович Кабанов

Владимир Константинович Козырев

Сергей Александрович Поржецкий

Редактор и корректор Т.А.Смирнова

Техн. редактор Л.Я.Титова

---

Подп. к печати 08.02.05. Бумага тип № 1. Печать офсетная. Объем 2,75 печ.л.  
Уч.-изд.л. 2,75. Тираж 500 экз. Изд № 13. Цена «С» 13. Заказ 664

---

Ризограф ГОУВПО Санкт-Петербургского государственного  
технологического университета растительных полимеров,  
198095, СПб., ул.Ивана Черных, 4.