

Министерство общего и профессионального образования РФ
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

**Вопросы и задания
по разделу “Электричество”**

Методические указания для самостоятельной работы

Санкт-Петербург
1998

УДК: 53

Вопросы и задания по разделу “Электричество”. Методические указания к самостоятельной работе для студентов всех специальностей / Сост.: Ю. Е. Зайцев, Г. Д. Лапин, С. Г. Федин; СПбГЭТУ. СПб., 1998. 32 с.

Содержат вводные, теоретические и индивидуальные задания по решению задач по темам раздела “Электричество” курса общей физики.

Предназначены для студентов всех специальностей СПбГЭТУ.

Утверждено
редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний

Предисловие

Методические указания предназначены для организации самостоятельной работы студентов в течение семестра и включают ряд тем, соответствующих рабочей программе курса физики технических университетов.

Вопросы и задания по каждой теме разбиты на три группы. Вводные задания очерчивают минимальный круг необходимых физических и математических понятий по теме. Теоретические задания предназначены для приобретения навыков применения лекционного материала к решению практических задач с последующим их использованием при выполнении индивидуальных заданий. Индивидуальные задания построены по принципу варьирования объектов при единстве постановки проблемы. Такая структура, с одной стороны, делает возможным использование фронтальной методики и коллективное обсуждение узловых моментов решения, с другой стороны — не позволяет тривиально трансформировать варианты решений.

Во всех индивидуальных заданиях номер варианта (N) следует брать равным номеру, под которым фамилия студента стоит в списке группы (возможно соответствие номеру по зачетной книжке). Численные значения параметров A и K , встречающиеся в тексте заданий, например номер точки на рисунке, безразмерный коэффициент в формуле и т. д., а также обозначение рисунка M , необходимо брать из нижепредставленной таблицы. Относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости, если не оговорено особо, принимаются равными 1.

N	K	M	N	K	M	N	K	M	A
1	1	а	11	5	д	21	3	в	1
2	2	б	12	6	е	22	4	г	2
3	3	в	13	1	а	23	5	д	3
4	4	г	14	2	б	24	6	е	4
5	5	д	15	3	в	25	1	а	5
6	6	е	16	4	г	26	2	б	1
7	1	а	17	5	д	27	3	в	2
8	2	б	18	6	е	28	4	г	3
9	3	в	19	1	а	29	5	д	4
10	4	г	20	2	б	30	6	е	5

Следует помнить, что определение векторной величины предполагает указание ее модуля и направления, т. е. угла относительно горизонтальной оси X (положительного — против часовой стрелки и отрицательного — в противоположном направлении) или проекций на оси координат.

1. НАПРЯЖЕННОСТЬ И ИНДУКЦИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

1.1. Вводное задание

1.1.1. Объясните понятия и термины: заряд q , элементарный заряд e , точечный и пробный заряды, линейная плотность заряда τ , поверхностная плотность заряда σ , объемная плотность заряда ρ , электростатическое поле, его напряженность $\vec{E}$ и индукция (электрическое смещение) $\vec{D}$; относительная диэлектрическая проницаемость среды ϵ ; потоки векторов напряженности Φ_E и индукции Ψ электрического поля; сторонние и связанные заряды. Укажите единицы перечисленных физических величин.

1.1.2. Дайте пояснения к следующим выражениям:

$$\sum_{k=1}^n q_k = \text{const}; \quad (1.1)$$

$$q = \pm Ne; \quad (1.2)$$

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2} \frac{\vec{r}}{r}; \quad (1.3)$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}; \quad (1.4)$$

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r^2} \frac{\vec{r}}{r}; \quad (1.5)$$

$$\vec{E} = \sum_{k=1}^n \vec{E}_k; \quad (1.6)$$

$$\Phi_E = \int_S \vec{E} d\vec{S} = \int_S E_n dS; \quad (1.7)$$

$$\vec{D} = \epsilon\epsilon_0 \vec{E}; \quad (1.8)$$

$$\Psi = \int_S \vec{D} d\vec{S} = \int_S D_n dS; \quad (1.9)$$

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum_{k=1}^n q_k = \int_V \rho dV; \quad (1.10)$$

$$\oint_s \vec{E} d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \sum_{k=1}^n q_k; \quad (1.11)$$

$$\text{div } \vec{D} = \frac{\partial D_X}{\partial X} + \frac{\partial D_Y}{\partial Y} + \frac{\partial D_Z}{\partial Z} = \rho. \quad (1.12)$$

Сформулируйте определения, законы и принципы, представленные указанными выражениями.

1.1.3. Как с помощью силовых линий изображают картину поля напряженности $\vec{E}$ и индукции $\vec{D}$ электрического поля? Что характеризует густота линий $\vec{E}$ и $\vec{D}$ на карте поля? Как по картине поля определить направление векторов $\vec{E}$ и $\vec{D}$? Каким образом элемент площади dS сопоставляется с векторной величиной $d\vec{S}$? Как действует оператор div ?

1.2. Теоретическое задание

1.2.1. Выведите формулу для напряженности поля точечного заряда (1.5), используя закон Кулона (1.3) и определение напряженности электрического поля (1.4).

1.2.2. Используя принцип суперпозиции, получите выражение для напряженности поля, которое создает в некоторой произвольной точке равномерно заряженный с линейной плотностью заряда τ тонкий прямолинейный стержень длиной ℓ_0 , когда:

а) точка расположена на оси стержня на расстоянии ℓ от ближайшего его конца

$$E = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{\ell} - \frac{1}{\ell + \ell_0} \right); \quad (1.13)$$

б) точка расположена вне оси стержня

$$E = \sqrt{E_{\perp}^2 + E_{\parallel}^2}; \quad (1.14)$$

$$E_{\perp} = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 \epsilon d} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2); \quad (1.15)$$

$$E_{\parallel} = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 \epsilon d} (\sin \beta_2 - \sin \beta_1), \quad (1.16)$$

где $E_{\perp}$ и $E_{\parallel}$ — составляющие напряженности электрического поля в направлениях, перпендикулярном и параллельном оси стержня; β_1 и β_2 — углы между осью стержня и радиус-векторами $\vec{r}_1$ и $\vec{r}_2$, проведенными из концов стержня в данную точку поля; d — расстояние от оси стержня.

1.2.3. Поясните теорему Гаусса: *поток вектора электрического смещения через произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме сторонних зарядов, заключенных внутри этой поверхности*. Для этого рассмотрите поток вектора электрического смещения через поверхность сферы с точечным зарядом в ее центре, а затем, используя свойство непрерывности линий электрического смещения и принцип суперпозиции, обобщите полученные результаты для нескольких зарядов, заключенных внутри произвольной замкнутой поверхности. Покажите, что поток вектора электрического смещения через замкнутую поверхность, создаваемый зарядом, находящимся вне этой поверхности, равен нулю.

1.2.4. Используя теорему Гаусса, получите выражение для напряженности электрического поля, создаваемого на расстоянии r от центра (оси) симметрии равномерно заряженными:

а) бесконечным стержнем с линейной плотностью заряда τ

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon r}; \quad (1.17)$$

б) бесконечной плоскостью с поверхностной плотностью заряда σ

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon}; \quad (1.18)$$

в) шаром радиуса R с объемной плотностью заряда ρ

$$E = \frac{R^3\rho}{3\epsilon_0\epsilon r^2} \text{ (вне шара)} \quad (1.19)$$

и

$$E = \frac{\rho r}{3\epsilon_0\epsilon} \text{ (внутри шара)}. \quad (1.20)$$

Покажите, что выражение (1.19) совпадает с напряженностью электрического поля, создаваемого точечным зарядом, равным заряду шара и расположенным в центре шара.

1.2.5. Выведите уравнение (1.12), согласно которому дивергенция электрического смещения равна объемной плотности заряда ρ в окрестности данной точки.

1.3. Индивидуальное задание

1.3.1. Найдите напряженность $\vec{E}_A$ электростатического поля, создаваемого в точке А системой точечных зарядов, изображенной на рис. 1.1, М. Модули всех зарядов одинаковы: $|q| = 2,0$ нКл, $\ell = 0,5$ м. Номер точки А на рисунке и обозначение М рисунка следует брать из таблицы на с. 3.

1.3.2. На рис. 1.1, М ($\ell = 0,5$ м) приведены сечения равномерно заряженных с линейной плотностью заряда $|\tau| = 1,0$ нКл/м тонких бесконечных прямолинейных стержней. Определите напряженность электростатического поля $\vec{E}_A$ в точке А и силу $\vec{F}_C$, действующую на единицу длины стержня С со стороны других стержней.

1.3.3. В электростатической системе, описанной в п. 1.3.2, из точки А в точку В перемещается стержень длиной 1 м, расположенный перпендикулярно плоскости рисунка. Определите потоки напряженности Φ_E и индукции Ψ электростатического поля через плоскую поверхность, прочерчиваемую стержнем при его движении. Как изменятся эти потоки, если систему поместить в среду с $\epsilon = 2$?

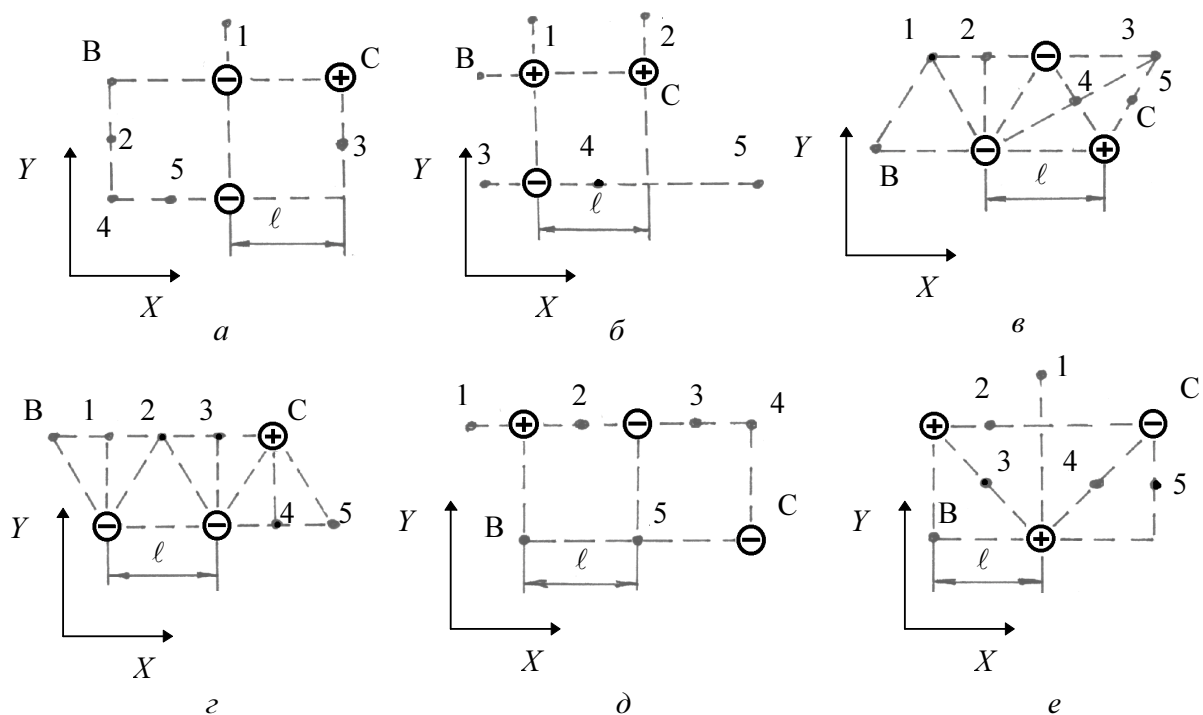


Рис. 1.1

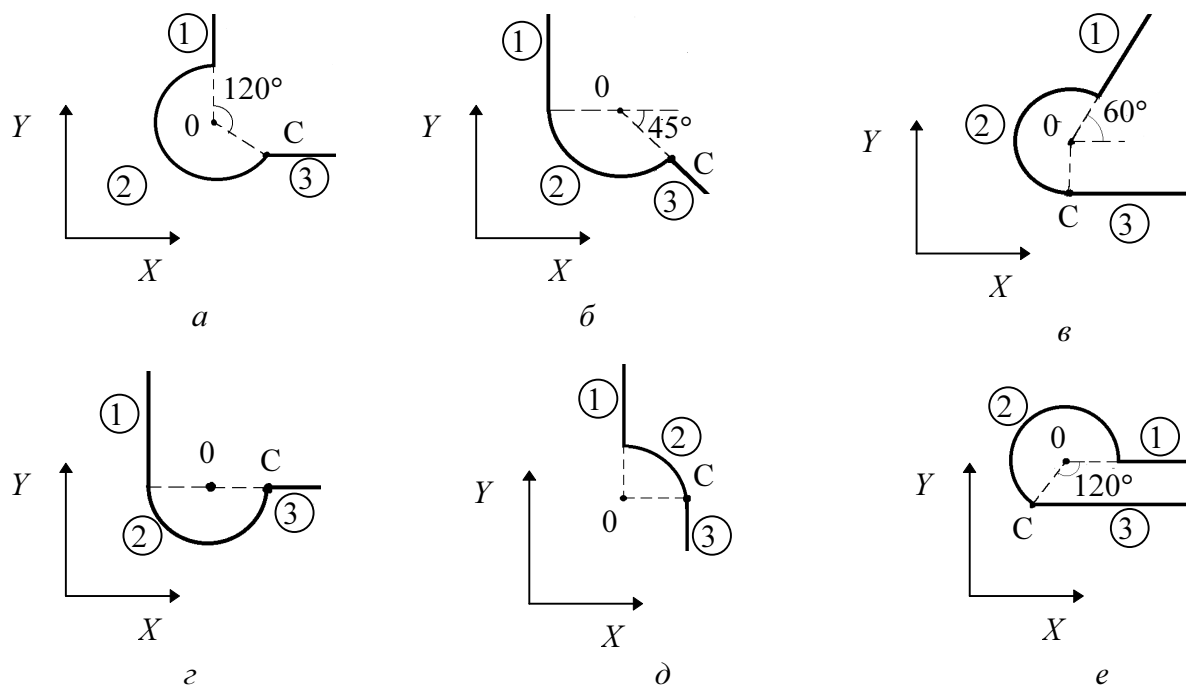


Рис. 1.2

1.3.4. На рис. 1.2, М приведены различные конфигурации, составленные из трех элементов: дуги окружности радиусом R (элемент 2) и двух прямолинейных элементов (1 и 3) конечной или полубесконечной ($0 \rightarrow \infty$) длины (см. таблицу). Считая, что заряд по всем элементам распределен равномерно с линейной плотностью заряда τ , определите напряженность $\vec{E}$ электростатического поля в точке 0.

A	1	2	3	4	5
$R, \text{ м}$	2,0	0,5	1,0	0,4	1,0
$\tau, \text{ нКл/м}$	200	80	100	50	200
ℓ_1	$2R$	$3R$	$0 — \infty$	R	$2R$
ℓ_3	$0 — \infty$	R	R	$2R$	$3R$

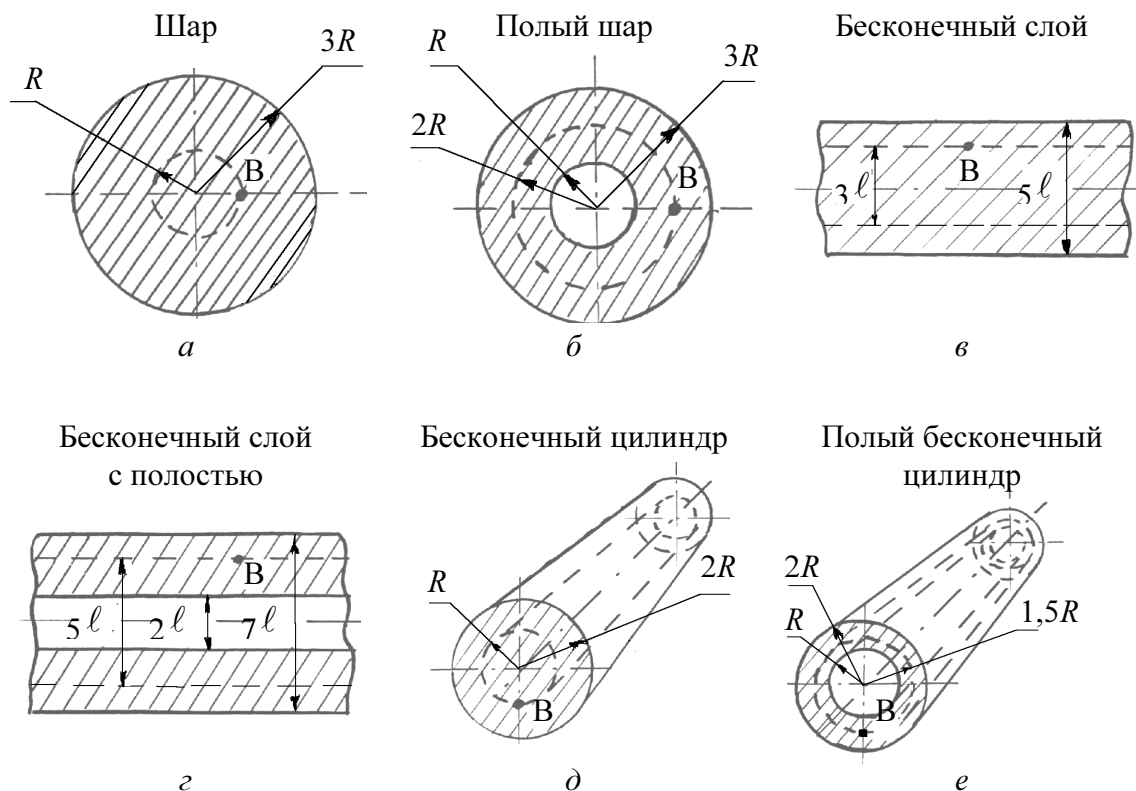


Рис. 1.3

1.3.5. На рис. 1.3, М показано тело, зависимость объемной плотности заряда которого от расстояния r до центра (плоскости, оси) симметрии имеет вид $\rho(r) = (N + 10)r^{4/5}$, где $\rho(r)$ — в мкКл/м³; r — в метрах. Найдите напряженность и индукцию электростатического поля в точке В. Для материала тела $\varepsilon = 3$; $R = \ell = 2,0$ см. Постройте качественные графики зависимостей $E(r)$ и $D(r)$.

2. ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДИПОЛЬ

2.1. Вводное задание

2.1.1. Объясните понятия и термины: потенциал φ ; изменение, приращение, убыль потенциала; разность потенциалов $\Delta\varphi$; эквипотенциальная поверхность; электрический диполь, его плечо $\vec{l}$ и электрический момент $\vec{p}_e$. Укажите единицы названных физических величин.

2.1.2. Дайте пояснения к следующим выражениям:

$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = 0; \quad (2.1)$$

$$\varphi = \frac{W_p}{q}; \quad (2.2)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q} = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l}; \quad (2.3)$$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r}; \quad (2.4)$$

$$\varphi = \sum_{k=1}^n \varphi_k; \quad (2.5)$$

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x} \vec{l}_x + \frac{\partial\varphi}{\partial y} \vec{l}_y + \frac{\partial\varphi}{\partial z} \vec{l}_z \right); \quad (2.6)$$

$$\Delta\varphi \equiv \vec{\nabla}^2 \varphi \equiv \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0}; \quad (2.7)$$

$$\vec{p}_e = q\vec{l}; \quad (2.8)$$

$$\vec{M} = \vec{p}_e \times \vec{E}; \quad (2.9)$$

$$W_p = -\vec{p}_e \vec{E}. \quad (2.10)$$

2.1.3. Какие характеристики поля: скалярное, векторное, стационарное, вихревое, потенциальное, поле консервативных сил и т. д., можно приписать электростатическому полю? Как действуют: оператор градиент (grad), оператор ротор (rot), оператор набла $\vec{\nabla}$ (оператор Гамильтона), оператор Лапласа? Что такое циркуляция вектора? Каковы признаки поля консервативных сил? Как силовые линии электростатического поля ориентированы по отношению к эквипотенциальным поверхностям и почему? За счет чего совершается работа перемещения заряда в электро-статическом поле?

2.2. Теоретическое задание

2.2.1. Используя теорему Стокса:

$$\oint_{\ell} \vec{A} d\vec{\ell} = \int_S \text{rot } \vec{A} \cdot d\vec{S}, \quad (2.11)$$

где $\vec{A}$ — произвольный вектор, и теорему о циркуляции вектора напряженности электростатического поля (2.1), покажите, что электростатическое поле — безвихревое:

$$\text{rot } \vec{E} = 0. \quad (2.12)$$

2.2.2. Покажите, что соотношение (2.3), связывающее разность потенциалов с напряженностью электростатического поля, получается из определений потенциала (2.2) и напряженности (1.4) электрического поля.

2.2.3. Получите выражение для потенциала поля точечного заряда (2.4), считая известными соотношение (2.3) и формулу (1.5) для напряженности поля точечного заряда.

2.2.4. Покажите, что связь потенциала φ и напряженности $\vec{E}$ электростатического поля (см. (2.6)) следует из связи потенциальной энергии тела, находящегося в поле консервативных сил, и действующей на это тело силы.

2.2.5. Докажите справедливость уравнения (2.7), связывающего распределение плотности заряда в пространстве с потенциалом¹). Используйте тот факт, что оператор Лапласа $\Delta\varphi$ (не путайте с разностью потенциалов $\Delta\varphi$!) равен дивергенции градиента, а также соотношения (1.12), (1.8) и (2.6).

2.2.6. Покажите, что потенциал, создаваемый в некоторой точке поля равномерно заряженным с линейной плотностью заряда τ стержнем длиной ℓ_0 , составляет:

а) для точек на оси стержня на расстоянии l от ближайшего его конца

$$\varphi = \frac{\tau}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{\ell + \ell_0}{\ell}; \quad (2.13)$$

б) для точек вне оси стержня

$$\varphi = \frac{\tau}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{\text{tg}(\beta_2/2)}{\text{tg}(\beta_1/2)}, \quad (2.14)$$

где β_1 и β_2 — углы между осью стержня и радиус-векторами, проведенными из концов стержня в данную точку поля.

2.2.7. Получите выражение для разности потенциалов между точками поля, создаваемого бесконечно длинным заряженным с линейной плотностью заряда τ прямолинейным стержнем:

¹ Уравнение (2.7) при $\rho = 0$ называется уравнением Лапласа

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{\ell_2}{\ell_1}, \quad (2.15)$$

где ℓ_1 и ℓ_2 — расстояния от точек поля до оси стержня.

2.2.8. Получите выражение для потенциала поля, создаваемого электрическим диполем в достаточно удаленной точке ($r \gg \ell$):

$$\varphi(r, \theta) = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{p_e \cos\theta}{r^2}, \quad (2.16)$$

где θ — угол между плечом диполя и радиус-вектором, проведенным в эту точку.

2.2.9. Покажите, что момент сил $\vec{M}$, действующий на электрический диполь, и потенциальная энергия диполя в электрическом поле напряженностью $\vec{E}$ определяются выражениями (2.9) и (2.10).

2.2.10. Используя связь напряженности и потенциала, получите выражение для напряженности поля диполя:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{p_e}{r^3} \sqrt{1 + 3\cos^2\theta}. \quad (2.17)$$

2.3. Индивидуальное задание

2.3.1. Определите потенциал точки А и работу сил электрического поля по перемещению точечного заряда $q = 10,0$ нКл из точки А в точку В в электростатической системе, описанной в задании 1.3.1.

2.3.2. Может ли попасть в точку А поля (по условию задания 1.3.2) электрон, имеющий в точке В скорость 2,0 Мм/с? Если это возможно, то какую скорость v_A будет иметь электрон в точке А? Если нет, то при какой скорости v_0 это будет возможно?

2.3.3. В электростатической системе, описанной в задании 1.3.4, определите потенциал, создаваемый в точке О элементами конечной длины.

2.3.4. Определите разность потенциалов между точкой В (см. задание 1.3.5) и:

- а) поверхностью;
- б) центром (плоскостью, осью) симметрии.

Постройте качественный график зависимости $\varphi(r)$, полагая для бесконечных цилиндра и плоского слоя $\varphi = 0$ на оси (плоскости) симметрии, а для шара — в бесконечности.

2.3.5. Найдите потенциал φ и напряженность $\vec{E}$ электрического поля, создаваемого диполем на расстоянии $|\vec{r}| = 2,0$ м от него. Угол между векторами $\vec{r}$ и $\vec{l}$ равен $\theta = 30^\circ$? Электрический момент диполя $p_e = K \cdot 10^{-22}$ Кл·м.

2.3.6. Определите потенциальную энергию диполя и момент сил, действующий на диполь в электрическом поле напряженностью $E = 200 \text{ В/м}$, если угол между направлением $\vec{E}$ и плечом $\vec{l}$ диполя $\alpha_1 = A \cdot 20^\circ$? Электрический момент диполя $p_e = K \cdot 10^{-22} \text{ Кл}\cdot\text{м}$. Какую работу надо совершить, чтобы угол α стал равен $\alpha_2 = A \cdot 30^\circ$?

2.3.7. Зависимость потенциальной энергии W_p точечного заряда $q = 10,0 \text{ нКл}$ от координат точек поля, в котором он находится, имеет вид

$$W_p = a \cdot f(x, y, z),$$

где $a = 1 \text{ мкДж/л}^3$.

Определите потенциал φ , напряженность $\vec{E}$ электрического поля и объемную плотность ρ заряда, создающего поле, в точке с координатами x_1, y_1, z_1 . Вид функции $f(x, y, z)$ и численные значения координат точки возьмите из таблицы согласно номеру Вашего варианта (N).

$f(x, y, z)$	N	$x_1, y_1, z_1, \text{ м}$	N	$x_1, y_1, z_1, \text{ м}$	N	$x_1, y_1, z_1, \text{ м}$
$xy^2 + 2z^3$	1	0,1,2	11	2,0,1	21	1,2,3
$xy^2 + x^2z$	2	0,1,1	12	1,2,0	22	2,0,3
$x^2y + y^2z$	3	1,0,1	13	0,1,2	23	2,2,1
$xy^2 + xz^2$	4	2,1,2	14	1,1,1	24	1,2,0
$x^2y + 2xz^2$	5	2,2,1	15	1,0,2	25	1,0,3
$x^2y + 3yz^2$	6	3,1,1	16	1,2,3	26	2,3,2
$x^2z + 3x^2y$	7	2,1,0	17	1,2,1	27	0,3,2
$x^2z + 3yz^2$	8	1,0,1	18	2,2,2	28	3,1,0
$xz^2 + y^2z$	9	2,3,1	19	1,0,1	29	1,2,2
$x^2z + 2y^2z$	10	1,1,1	20	2,0,1	30	1,2,3

3. ПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

3.1. Вводное задание

3.1.1. Объясните понятия и термины: проводник, диэлектрик, полярные и неполярные диэлектрики, поляризуемость молекулы (атома) β , поляризованность (вектор поляризации) диэлектрика $\vec{P}$, поверхностная плотность поляризационных (связанных) зарядов σ , электрическая восприимчивость вещества χ , внешнее поле (поле сторонних зарядов) $\vec{E}_e$, поле связанных зарядов $\vec{E}'$, макроскопическое (резльтирующее) поле в диэлектрике $\vec{E}$. Укажите единицы перечисленных физических величин.

3.1.2. Дайте пояснения к следующим выражениям:

$$\vec{p}_{ei} = \beta \epsilon_0 \vec{E}; \quad (3.1)$$

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^N \vec{p}_{ei} = \chi \epsilon_0 \vec{E}; \quad (3.2)$$

$$\vec{E} = \vec{E}_e + \vec{E}'; E = E_e - E'; \quad (3.3)$$

$$\chi = \frac{E'}{E}; \quad (3.4)$$

$$\epsilon = \frac{E_e}{E}; \quad (3.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}; \quad (3.6)$$

$$D = \sigma; \quad (3.7)$$

$$E = \frac{\sigma - \sigma'}{\epsilon_0}; \quad (3.8)$$

$$\epsilon_1 E_{1n} = \epsilon_2 E_{2n}; E_{1\tau} = E_{2\tau}; \quad (3.9)$$

$$\epsilon_1 D_{2\tau} = \epsilon_2 D_{1\tau}; D_{1n} = D_{2n}. \quad (3.10)$$

3.1.3. В чем заключается электростатическая защита приборов? Как направлены силовые линии $\vec{E}$ вблизи поверхности проводящих тел? Зависит ли напряженность поля вблизи поверхности заряженного проводящего тела от формы этой поверхности? Может ли равномерно заряженное по объему тело быть проводящим? По какому свойству можно экспериментально отличить полярные диэлектрики от неполярных? Какие существуют виды поляризации диэлектриков? Какими особенностями обладают сегнетоэлектрики?

3.2. Теоретическое задание

3.2.1. Покажите:

а) что поверхность проводящего тела эквипотенциальна, а напряженность электрического поля в его объеме равна нулю;

б) напряженность поля на поверхности проводника в каждой его точке направлена по нормали к поверхности и составляет

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}. \quad (3.11)$$

3.2.2. Докажите, что диэлектрическая восприимчивость вещества

$$\chi = n\beta, \quad (3.12)$$

где n — концентрация поляризованных молекул вещества; β — поляризуемость молекулы.

3.2.3. Проанализируйте возникновение электрического поля между обкладками плоского конденсатора с диэлектриком и покажите:

а) что поверхностная плотность связанных зарядов σ' на диэлектрике равна модулю вектора поляризации:

$$\sigma' = |\vec{P}| \quad (3.13)$$

и связана с поверхностной плотностью сторонних зарядов на пластинах конденсатора σ соотношением

$$\sigma' = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \sigma; \quad (3.14)$$

б) значения модулей векторов индукции D и напряженности E электрического поля в диэлектрике выражаются через поверхностные плотности сторонних зарядов на пластинах конденсатора σ и связанных зарядов на поверхности диэлектрика σ' соотношениями (3.7) и (3.8);

в) относительная диэлектрическая проницаемость ε на единицу больше диэлектрической восприимчивости χ вещества :

$$\varepsilon = \chi + 1. \quad (3.15)$$

3.2.4. Докажите, что на границе раздела двух диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями ε_1 и ε_2 нормальные и тангенциальные составляющие векторов напряженности и электрического смещения при отсутствии сторонних зарядов удовлетворяют граничным условиям (3.9) и (3.10).

3.2.5. Нарисуйте силовые линии и эквипотенциальные поверхности для системы, состоящей из заряженного плоского воздушного конденсатора и шара, помещенного между его обкладками, если шар:

а) металлический;

б) диэлектрический ($\varepsilon = 2$).

3.2.6. Почему парафиновый шарик притягивается к заряженному металлическому шарiku в воздухе, но отталкивается от него в воде?

3.3. Индивидуальное задание

3.3.1. Пластина полярного диэлектрика, состоящего из молекул с электрическими дипольными моментами $p_{ei} = (A + 4)10^{-30}$ Кл·м, помещена во внешнее электрическое поле $E_e = 250$ В/м так, что вектор $\vec{E}_e$ перпендикулярен плоскости пластины. При этом концентрация молекул, у которых угол α

между векторами $\vec{p}_{ei}$ и $\vec{E}_e$ составил 60° , оказалась равной $n_1 = (K + 4)10^{20} \text{ м}^{-3}$; у молекул с $\alpha = 30^\circ$ — $n_2 = (K + 2)10^{20} \text{ м}^{-3}$ и с $\alpha = 0$ — $n_2 = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$; векторы $\vec{p}_{ei}$ остальных молекул ориентированы хаотически. Определите диэлектрические восприимчивость χ и проницаемость ϵ диэлектрика, его поляризованность P , электрическое смещение D и напряженность E поля в диэлектрике, поверхностную плотность поляризационных зарядов σ' .

3.3.2. Под каким углом к направлению внешнего электрического поля $\vec{E}_e$ будут направлены в диэлектрике с $\epsilon = 1 + (A/2)$ линии $\vec{D}$ (или $\vec{E}$), если плоскость пластины составит с направлением $\vec{E}_e$ угол $\beta = (K + 1)10^\circ$?

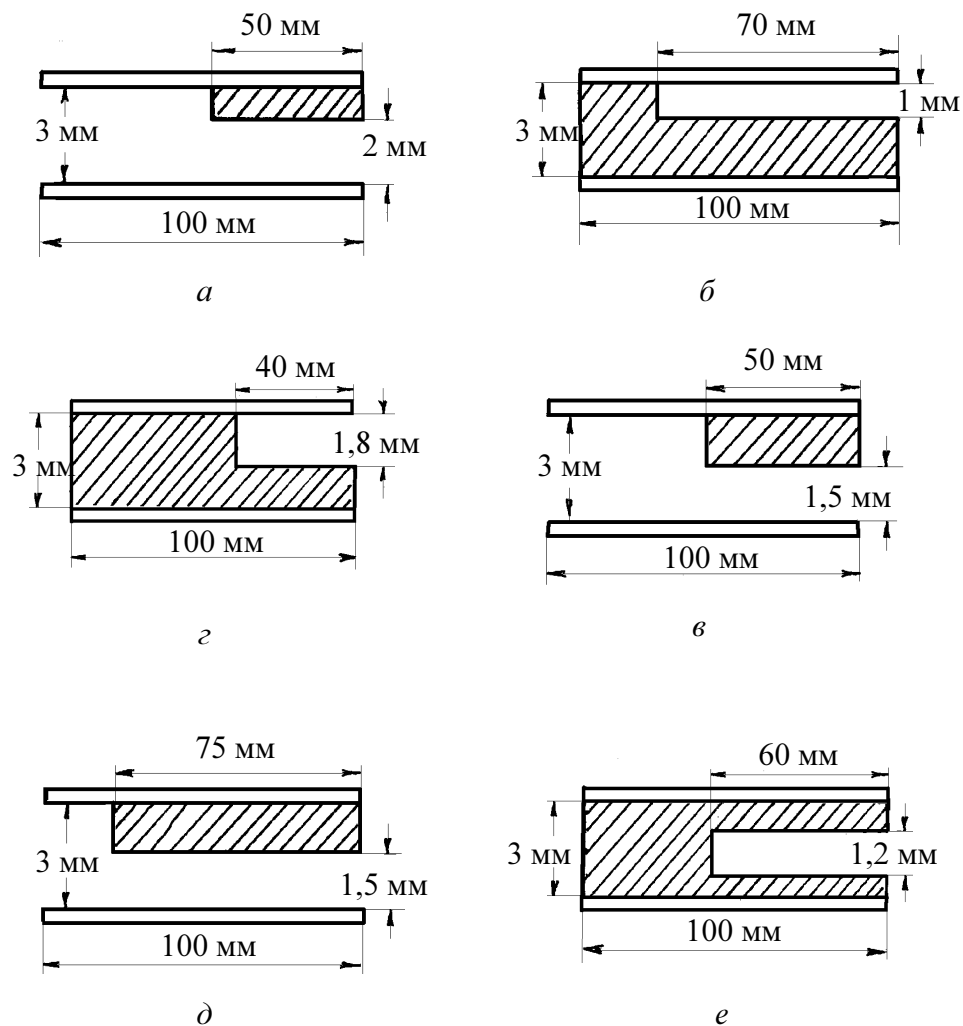


Рис. 3.1

3.3.3. На рис 3.1, М показано сечение плоского конденсатора с квадратными пластинами, пространство между которыми частично заполнено диэлектриком. К пластинам приложена разность потенциалов 300 В. Полагая для диэлектрика $\epsilon = 1 + (A/2)$:

- а) качественно постройте картину силовых линий $\vec{E}$ и $\vec{D}$ в конденсаторе, учитывая, что плотность линий пропорциональна значению E (или D);
- б) вычислите значения E и D в воздушном слое и в диэлектрике;
- в) рассчитайте поверхностные плотности зарядов на пластинах и диэлектрике.

4. ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ. КОНДЕНСАТОРЫ. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

4.1. Вводное задание

4.1.1. Объясните понятия и термины: емкость C уединенного проводника, системы проводящих тел, конденсатора; энергия электрического поля W , объемная плотность этой энергии ω_e ; энергия системы точечных зарядов W_p , конденсатора. Укажите единицы перечисленных физических величин.

4.1.2. Дайте пояснения к следующим выражениям:

$$C = \frac{q}{\varphi}; \quad (4.1)$$

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi}; \quad (4.2)$$

$$C = \sum_{i=1}^n C_i; \quad (4.3)$$

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}; \quad (4.4)$$

$$W_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \varphi_i; \quad (4.5)$$

$$W_p = \frac{1}{2} C (\Delta\varphi)^2 = \frac{Cq}{2} = \frac{q^2}{2C}; \quad (4.6)$$

$$\omega_e = \frac{dW_p}{dV}; \quad (4.7)$$

$$\omega_e = \frac{ED}{2} = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2}; \quad (4.8)$$

$$W = \int_V \omega_e dV. \quad (4.9)$$

4.2. Теоретическое задание

4.2.1. Выведите формулы для емкости:

а) плоского конденсатора с площадью каждой из пластин S и расстоянием между пластинами d :

$$C = \epsilon \epsilon_0 S / d; \quad (4.10)$$

б) уединенного шара радиусом r :

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 r; \quad (4.11)$$

в) сферического конденсатора (две концентрические сферы радиусами r_1 и r_2):

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}; \quad (4.12)$$

г) цилиндрического конденсатора (два коаксиальных цилиндра длиной l и радиусами r_1 и r_2):

$$C = 2\pi\epsilon\epsilon_0 l / \ln(r_2 / r_1), \quad (4.13)$$

если пространство между обкладками конденсатора заполнено диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ϵ .

4.2.2. Покажите:

а) что емкость системы параллельно соединенных конденсаторов выражается формулой (4.3), а последовательно соединенных — формулой (4.4);

б) энергия системы точечных зарядов может быть рассчитана по формуле (4.5), а энергия конденсатора — по формуле (4.6).

4.2.3. Покажите на примере плоского конденсатора, что объемная плотность энергии электрического поля выражается формулой (4.8).

4.3. Индивидуальное задание

4.3.1. Для конденсатора по условию задания 3.3.3 определите:

а) емкость ;

б) объемную плотность энергии и энергию в диэлектрике и в воздушном слое.

4.3.2. Для этого же конденсатора определите работу по извлечению диэлектрика и энергию конденсатора до и после извлечения диэлектрика, когда источник напряжения :

а) постоянно подключен к конденсатору;

б) отключен после зарядки конденсатора.

4.3.3. Определите энергию системы точечных зарядов, описанной в задании 1.3.1, если в точке A находится заряд $q = 2,0$ нКл.

4.3.4. Для электростатической системы, описанной в задании 1.3.5, определите энергию электростатического поля в объеме, обозначенном пунктирной линией (для бесконечного цилиндра определите энергию на единицу его длины; для бесконечной плоскости — энергию на единицу площади поверхности).

5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

5.1. Вводное задание

5.1.1. Объясните понятия и термины: электрический ток, его сила I , вектор плотности тока $\vec{j}$; средняя скорость упорядоченного движения носителей тока $\langle \vec{v} \rangle$, их подвижность μ ; сопротивление R и удельное сопротивление ρ ; проводимость G и удельная проводимость γ ; электродвижущая сила (ЭДС) E , напряжение U ; электрическая цепь, однородный и неоднородный участки цепи, узел и контур (замкнутый участок) электрической цепи; полная P и полезная P_e мощности, коэффициент полезного действия (КПД) электрической цепи η , удельная тепловая мощность $p_{уд}$. Укажите единицы названных физических величин.

5.1.2. Дайте пояснения (для определений, законов и правил — формулировки) к следующим выражениям:

$$I = \frac{dq}{dt}; \quad (5.1)$$

$$q = \int_0^t I dt; \quad (5.2)$$

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS_n} \vec{n}_0; \quad (5.3)$$

$$\vec{j} = en \langle \vec{v} \rangle; \quad (5.4)$$

$$\vec{j} = q_+ n_+ \langle \vec{v}_+ \rangle + q_- n_- \langle \vec{v}_- \rangle; \quad (5.5)$$

$$\mu = \frac{\langle v \rangle}{E}; \quad (5.6)$$

$$\gamma = en\mu; \quad (5.7)$$

$$\gamma = q_+ n_+ \mu_+ + q_- n_- \mu_-; \quad (5.8)$$

$$\gamma = \rho^{-1}; \quad (5.9)$$

$$R = G^{-1}; \quad (5.10)$$

$$R = \rho \frac{l}{S}; \quad (5.11)$$

$$R_{12} = \int_1^2 \rho \frac{dl}{S}; \quad (5.12)$$

$$E_{12} = \frac{A_{\text{стор}}}{q} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{стор}} d\vec{l}; \quad (5.13)$$

$$U_{12} = \frac{A_{\text{стор}} + A_{\text{кул}}}{q} = \int_1^2 (\vec{E}_{\text{стор}} + \vec{E}_{\text{кул}}) d\vec{l}; \quad (5.14)$$

$$I = \frac{U}{R}; \quad (5.15)$$

$$I = \frac{E}{R + r}; \quad (5.16)$$

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + E}{R}; \quad (5.17)$$

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}; \quad (5.18)$$

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0; \quad (5.19)$$

$$\sum_{k=1}^m I_k R_k = \sum_{i=1}^n E_i; \quad (5.20)$$

$$P_e = IU; \quad P = IE; \quad (5.21)$$

$$\eta = P_e / P; \quad (5.22)$$

$$Q = \int_0^t I^2 R dt; \quad (5.23)$$

$$p_{\text{уд}} = \frac{dQ}{dV \cdot dt}; \quad (5.24)$$

$$p_{\text{уд}} = \gamma E^2 = \rho j^2 = \vec{j} \vec{E}. \quad (5.25)$$

5.1.3. Каким образом устанавливается направление вектора плотности тока $\vec{j}$? В чем заключается отличие и в чем общность нескольких видов формул: (5.3) — (5.5), (5.7) — (5.9), (5.10) — (5.12)? В каких случаях следует применять тот или иной вид этих формул? От чего зависят сопротивление проводника R и удельное сопротивление ρ ?

5.2. Теоретическое задание

5.2.1. Получите выражения для проводимостей утечки:

а) сферического конденсатора с радиусами сфер r_1 и r_2 :

$$G = 4\pi\gamma \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}; \quad (5.26)$$

б) цилиндрического конденсатора длиной l и радиусами цилиндров r_1 и r_2 :

$$G = \frac{2\pi\gamma\ell}{\ln(r_2 / r_1)}, \quad (5.27)$$

если пространство между обкладками конденсаторов заполнено веществом с удельной проводимостью γ .

Покажите, что при одинаковых форме и размерах конденсаторов между проводимостью утечки G и емкостью электростатического аналога C (см. (4.12), (4.13)) существует связь

$$C\gamma = \epsilon\epsilon_0 G. \quad (5.28)$$

5.2.2. Считая известным закон Ома для однородного участка цепи (5.15), выведите формулу (5.18), представляющую закон Ома в дифференциальной форме.

5.2.3. Покажите, что первое правило Кирхгофа (5.19) для токов, втекающих в некоторый узел и вытекающих из него, является следствием закона сохранения заряда.

5.2.4. Покажите, что второе правило Кирхгофа (5.20), связывающее все падения напряжения $I_k R_k$ и ЭДС E_i в некотором замкнутом контуре электрической схемы, может быть получено из закона Ома для неоднородного участка цепи (5.17).

5.2.5. Сформулируйте правила учета знаков ЭДС, токов и падений напряжений для выражений (5.17), (5.19), (5.20).

5.2.6. Дайте характеристики режимов согласования, холостого хода и короткого замыкания при работе источника питания. Покажите, что полезная мощность имеет максимальное значение в режиме согласования. Чему равно это значение?

5.2.7. Считая известными формулы (5.23) и (5.24), получите выражение закона Джоуля-Ленца в дифференциальной форме (5.25).

5.3. Индивидуальное задание

5.3.1. Конденсатор емкостью $C = 200$ мкФ входит в состав некоторой электрической цепи. Зависимость тока от времени в цепи конденсатора показана на рис. 5.1 (для $N = 1-15$) и рис. 5.2 (для $N = 16-30$). Постройте качественный график зависимости изменения напряжения на конденсаторе от времени $\Delta U(t)$ за время $\Delta t = t_k - t_n$ (см. таблицу). Чему будет равно это изменение за время Δt ?

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Рис. 5.1
t_H, c	0	0	0	5	5	10	10	15	15	20	20	25	25	30	30	
t_K, c	5	10	15	15	20	20	25	25	30	25	30	35	40	35	40	
N	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Рис. 5.2
t_H, c	0	0	5	5	10	10	10	15	15	15	20	25	30	30	35	
t_K, c	5	10	10	15	20	25	30	20	25	30	35	35	35	40	40	

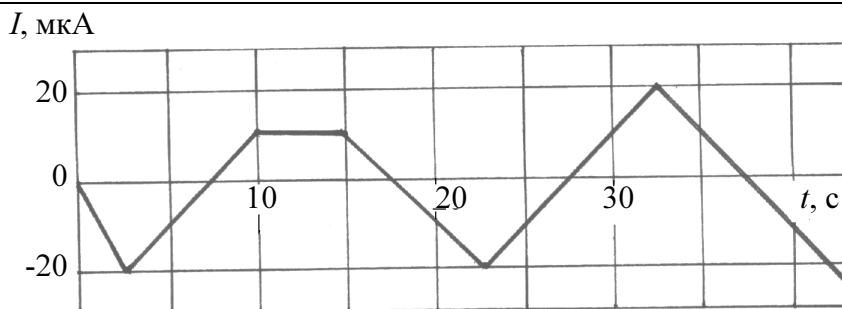


Рис. 5.1

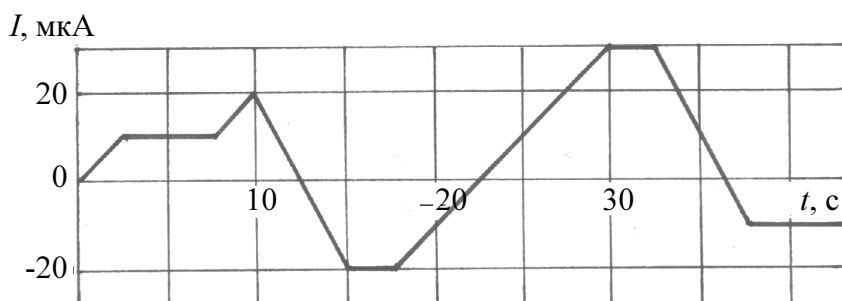


Рис. 5.2

5.3.2. На рис. 3.1, М изображено сечение плоского конденсатора с квадратными пластинами. Пространство между обкладками частично заполнено веществом, с удельной проводимостью $\gamma = (A + 2)10^{-10}$ См/м. В воздушном слое конденсатора имеются положительно и отрицательно заряженные ионы с зарядами $|q_+| = |q_-| = e$, подвижностями $\mu_+ = (K + 4)0,2$ см²/(В·с); $\mu_- = 1,3\mu_+$ и концентрацией $n_+ = n_- = 10^{13}$ м⁻³. Определите ток утечки конденсатора, если разность потенциалов между его пластинами 300 В.

5.3.3. На рис. 5.3, М приведена электрическая схема, состоящая из источников питания $G1$ и $G2$ с ЭДС $E_1 = (A + 10)0,1$ В и $E_2 = (A - 2,5)1,2$ В; конденсатора $C1$ емкостью 10 пФ и резисторов $R1 = R2 = 2$ Ом, $R3 = 3$ Ом. Внутренние сопротивления источников $r_1 = r_2 = 1$ Ом. Определите токи в ветвях цепи и заряд на конденсаторе.

5.3.4. Из электрической схемы, описанной в п. 5.3.3, удален резистор $R2$. Считая оставшиеся резисторы (резистор) нагрузочными, определите полезную P_e , полную P мощности и КПД η цепи. Какая максимальная полезная мощность может быть получена от данных источников (источника)?

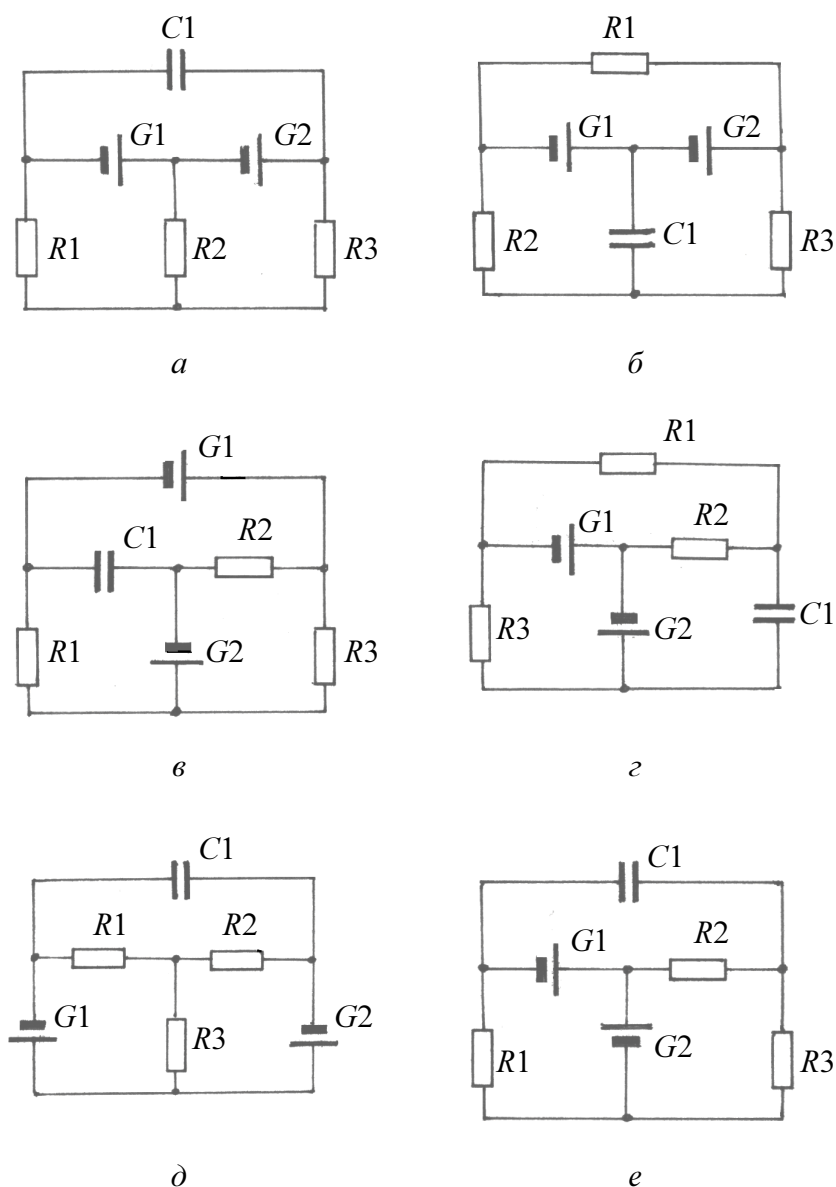


Рис. 5.3

5.3.5. В линию электропередачи сопротивлением $R = 2$ Ом поступает мощность $P = (A+3)20$ кВт при напряжении $U = (K+4)300$ В. Рассчитайте мощность, получаемую потребителем. Чему равно напряжение на нагрузке?

5.3.6. Какое количество теплоты выделится за время Δt на сопротивлении $R = 500$ Ом, включенном последовательно с конденсатором в электрическую цепь, описанную в задании 5.3.1?

5.3.7. Какое количество теплоты выделится за время $t = 1$ мин в диэлектрике и в воздушном слое конденсатора, описанного в задании 5.3.2? Чему равны удельные тепловые мощности в диэлектрике и в воздушном слое этого конденсатора?

6. ИНДУКЦИЯ И НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

6.1. Вводное задание

6.1.1. Объясните понятия и термины: индукция магнитного поля $\vec{B}$; магнитный диполь и его магнитный момент $\vec{p}_m$; магнитная постоянная μ_0 , относительная магнитная проницаемость вещества μ ; напряженность магнитного поля $\vec{H}$, циркуляция вектора $\vec{H}$; тороид, соленоид; сила Ампера, элемент тока $I d\vec{\ell}$, сила Лоренца, магнитная сила. Укажите единицы перечисленных физических величин.

6.1.2. Сформулируйте определения, законы и принципы (или дайте пояснения) для следующих выражений:

$$|\vec{B}| = \frac{M_{\max}}{IS}; \quad (6.1)$$

$$\vec{p}_m = I\vec{S} = IS\vec{n}_0; \quad (6.2)$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{\ell} \times \vec{r}}{r^3}; \quad (6.3)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \vec{r}}{r^3}; \quad (6.4)$$

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i; \quad (6.5)$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}; \quad (6.6)$$

$$\oint_{\ell} \vec{H} d\vec{\ell} = \sum_{k=1}^n I_k; \quad (6.7)$$

$$\oint_{\ell} \vec{H} d\vec{\ell} = \int_S (\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) d\vec{S}; \quad (6.8)$$

$$d\vec{F} = Id\vec{\ell} \times \vec{B}; \quad (6.9)$$

$$\vec{F}_{\text{Л}} = q\vec{v} \times \vec{B} + q\vec{E}. \quad (6.10)$$

6.1.3. Как экспериментально определить индукцию магнитного поля $\vec{B}$ (направление и модуль)? Как графически изображаются магнитные поля? Какие поля называются вихревыми? В чем заключается их отличие от потенциальных полей? Как применяется закон Био-Савара-Лапласа (6.3) на практике? Почему сила Ампера может совершать работу, а сила Лоренца — нет, хотя природа этих сил одинакова? В чем заключается эффект Холла?

6.2. Теоретическое задание

6.2.1. Покажите, что напряженность магнитного поля на оси кругового тока I , протекающего по окружности радиуса R , равна

$$H = \frac{IR^2}{2(R^2 + h^2)^{3/2}}, \quad (6.11)$$

где h — расстояние от плоскости окружности.

6.2.2. Получите выражение для напряженности магнитного поля, создаваемого прямолинейным проводником с током I на расстоянии d от него:

$$H = \frac{I}{4\pi d}(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \quad (6.12)$$

где α_1 и α_2 — углы между осью проводника и радиус-векторами $\vec{r}_1$ и $\vec{r}_2$, проведенными из концов стержня в данную точку поля.

Покажите, что для бесконечного проводника

$$H = \frac{I}{2\pi d}. \quad (6.13)$$

6.2.3. Получите выражение для напряженности магнитного поля на оси соленоида:

$$H = j_{\text{пов}\Pi}(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)/2, \quad (6.14)$$

где $j_{\text{пов}} = IN/\ell$ — ток на единицу длины соленоида (линейная плотность тока); N и ℓ — число витков и длина соленоида; I — ток в одном витке.

Покажите, что в случае тонкого соленоида $H = j_{\text{пов}}$, что совпадает с напряженностью поля в тороиде.

6.2.4. Покажите, что два параллельных прямолинейных бесконечно длинных проводника с токами I_1 и I_2 взаимодействуют между собой с силой на единицу длины проводников

$$F_\ell = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}, \quad (6.15)$$

причем однонаправленные токи притягиваются, а разнонаправленные отталкиваются.

Дайте определение единицы силы тока — *ампера* и покажите, что магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

6.2.5. Покажите, что контур с током (магнитный диполь) в магнитном поле:

а) испытывает действие момента сил

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}; \quad (6.16)$$

б) обладает потенциальной энергией

$$W = -\vec{p}_m \vec{B}. \quad (6.17)$$

6.3. Индивидуальное задание

6.3.1. На рис. 1.1, М ($\ell = 2,0$ см) приведены поперечные сечения бесконечных прямолинейных проводников с токами силой 10 А (знак “—” означает,

что ток течет “к нам”, знак “+” — “от нас”). Определите индукцию $\vec{B}$ и напряженность $\vec{H}$ магнитного поля в точке А.

Какая сила $\vec{F}_c$ действует на единицу длины проводника С со стороны других проводников?

6.3.2. На рис. 1.1, М ($\ell = 2,0$ см) показаны равные по модулю заряды $|q| = 10$ нКл (знаки зарядов указаны на рисунке), движущиеся перпендикулярно плоскости рисунка “от нас” со скоростью 100 м/с. Определите индукцию $\vec{B}$ и напряженность $\vec{H}$ магнитного поля в точке А.

6.3.3. На рис.1.2, М (см. задание 1.3.4 и таблицу на с. 9) изображен проводник с током 10 А. Вычислите напряженность и индукцию магнитного поля в точке О. Какая сила будет действовать на точечный заряд $q = 10,0$ нКл в точке О, если заряд:

а) неподвижен;

б) движется перпендикулярно плоскости рисунка со скоростью $2,5 \cdot 10^6$ м/с;

в) движется со скоростью $2,5 \cdot 10^6$ м/с вдоль оси Х?

6.3.4. Контур с током (магнитный диполь), имеющий магнитный момент $p_m = K \cdot 1,0$ мА·м², свободно установился в магнитном поле с индукцией $B = 200$ мТл. Какую работу необходимо совершить, чтобы повернуть диполь на угол $\alpha = A \cdot 30^\circ$?

6.3.5. Протон влетает в магнитное поле с индукцией $B = 200$ мТл под углом $A \cdot 30^\circ$ к направлению индукции со скоростью $v = K \cdot 10^6$ м/с. Определите параметры траектории его движения.

7. МАГНИТНЫЙ ПОТОК. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

7.1. Вводное задание

7.1.1. Объясните понятия и термины: магнитный поток Φ , потокосцепление Ψ ; электромагнитная индукция, индукционный ток; электродвижущая сила индукции E_i и самоиндукции E_s ; индуктивность статическая L и динамическая $L_{\text{дин}}$, вихревое электрическое поле. Укажите единицы названных физических величин.

7.1.2. Дайте пояснения к следующим выражениям:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S}; \quad (7.1)$$

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \Phi_i; \quad (7.2)$$

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0; \quad (7.3)$$

$$E_i = -\frac{d\Psi}{dt}; \quad (7.4)$$

$$\oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} d\vec{S}; \quad (7.5)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad (7.6)$$

$$\Psi = LI; \quad (7.7)$$

$$L_{\text{дин}} = \frac{d\Psi}{dI} = L + I \frac{dL}{dI}; \quad (7.8)$$

$$E_s = -L_{\text{дин}} \frac{dI}{dt}; \quad (7.9)$$

$$dA = Id\Psi. \quad (7.10)$$

7.1.3. В чем заключается правило Ленца? Чем отличаются: магнитная индукция и электромагнитная индукция, самоиндукция и взаимоиנדукция? Зависит ли индуктивность соленоида: от частоты протекающего по нему тока ; от силы тока ? Для какой цели служит сердечник в соленоиде? Почему ток в цепи с индуктивностью устанавливается не мгновенно? Что такое скин-эффект?

7.2. Теоретическое задание

7.2.1. Покажите, что электрическое поле, сцепленное с переменным магнитным полем, является вихревым (см. (7.6)).

7.2.2. Докажите, что работа перемещения проводника с током I в магнитном поле определяется по выражению (7.10), в котором $d\Psi$ — магнитный поток через поверхность, очерчиваемую проводником при его движении.

7.2.3. Покажите, что на концах проводника, ориентированного перпендикулярно индукции магнитного поля $\vec{B}$ и движущегося перпендикулярно своей длине со скоростью $\vec{v}$, возникает разность потенциалов

$$\Delta\varphi = B\ell v \sin \alpha, \quad (7.11)$$

где ℓ — длина проводника, α — угол между векторами $\vec{v}$ и $\vec{B}$.

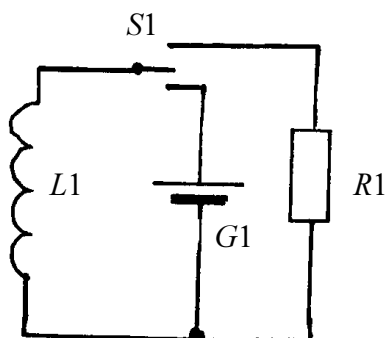
Покажите, что эта разность потенциалов может быть также рассчитана по формуле $\Delta\varphi = d\Phi/dt = \dot{\Phi}$, где $\dot{\Phi}$ — поток магнитной индукции через поверхность, очерчиваемую проводником в единицу времени.

7.2.4. Докажите, что индуктивность соленоида равна

$$L = \mu\mu_0 n^2 V, \quad (7.12)$$

где $V = \ell S$ — объем соленоида; ℓ и S — длина и площадь сечения соленоида; $n = N/\ell$ — число витков на единицу длины соленоида.

7.2.5. В схеме, показанной на рисунке, ключ $S1$ переводят вначале в нижнее положение (состояние 1 электроцепи), а затем — в верхнее положение (состояние 2).



Составьте дифференциальные уравнения для токов, протекающих в цепи в этих состояниях, и получите выражения для силы тока:

а) в состоянии 1:

$$I_1 = I_0(1 - \exp(-\frac{R}{L}t)), \quad (7.13)$$

где I_0 — сила тока в установившемся режиме ($t \rightarrow \infty$); $R = (R_L + R_i)$; R_L — сопротивление индуктивного элемента; R_i — внутреннее сопротивление источника питания; L — индуктивность; t — время;

б) в состоянии 2:

$$I_2 = I_0 \exp(-\frac{R}{L}t), \quad (7.14)$$

где $R = R_1 + R_L$ — суммарное сопротивление нагрузки и индуктивности.

7.3. Индивидуальное задание

7.3.1. Какую работу необходимо совершить, чтобы переместить прямолинейный проводник с током 2,0 А (ток направлен “от нас”) из точки А в точку В в системе бесконечных проводников с токами, описанной в задании 6.3.1. Проводник расположен перпендикулярно плоскости рисунка, имеет длину 0,10 м и прочерчивает при движении плоскую поверхность.

7.3.2. Представленный на рис.1.2,М проводник вращается в плоскости рисунка вокруг точки С с частотой $f = (N + 10) \cdot 0,1$ Гц. Перпендикулярно плоскости рисунка возбуждено магнитное поле с индукцией 100 мТл. Проводник состоит из дуги окружности радиусом R (элемент 2) и двух стержней (элементы 1 и 3). Размеры элементов указаны в таблице.

A	1	2	3	4	5
$R, \text{ м}$	2,0	0,5	1,0	0,4	1,0
l_1	$2R$	$3R$	$0,4 R$	R	$2R$
l_3	$0,5R$	R	R	$2R$	$3R$

Определите разности потенциалов между точкой С и концами проводника. Каковы будут эти разности потенциалов, если направление индукции магнитного поля составит с плоскостью чертежа угол 60° ?

7.3.3. Определите по условию задания 7.2.5 заряд, перенесенный током I_2 через сопротивление R_1 , и количество теплоты, выделившейся:

- а) в индуктивном элементе;
- б) в сопротивлении R_1 .

Источник G_1 имеет ЭДС $E = 1,5 \text{ В}$ и внутреннее сопротивление $R_i = 0,5 \text{ Ом}$. Сопротивление индуктивного элемента $R_L = K \cdot 0,1 \text{ Ом}$, индуктивность $L = A \cdot 200 \text{ мГн}$, $R_1 = 1,2 \text{ Ом}$.

8. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

8.1. Вводное задание

8.1.1. Объясните понятия и термины: намагничение, намагниченность (вектор намагниченности) $\vec{J}$, магнитная восприимчивость χ ; диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики; динамическая петля магнитного гистерезиса, основная кривая намагничения, остаточная индукция B_0 , коэрцитивная сила H_0 , магнитожесткие и магнитомягкие материалы; энергия W_m и объемная плотность энергии w_m магнитного поля. Укажите единицы перечисленных физических величин.

8.1.2. Дайте пояснения к следующим выражениям:

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{p}_{mi}; \quad (8.1)$$

$$\vec{J} = \chi \vec{H}; \quad (8.2)$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}); \quad (8.3)$$

$$\mu = 1 + \chi; \quad (8.4)$$

$$\oint_{\ell} \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \oint_{\ell} \vec{H} d\vec{l} + \mu_0 \oint_{\ell} \vec{J} d\vec{l}; \quad (8.5)$$

$$B_{1n} = B_{2n}; \quad B_{1\tau} \mu_2 = B_{2\tau} \mu_1; \quad (8.6)$$

$$H_{1n} \mu_1 = H_{2n} \mu_2; \quad H_{1\tau} = H_{2\tau}; \quad (8.7)$$

$$W_m = \frac{LI^2}{2}; \quad (8.8)$$

$$w_m = \frac{dW_m}{dV} = \frac{BH}{2}; \quad (8.9)$$

$$W_m = \int_V w_m dV; \quad (8.10)$$

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n I_k \Psi_k. \quad (8.11)$$

8.1.3. Как проявляется и чем обусловлено существование магнитных моментов атомов? Все ли вещества можно назвать магнетиками? Какие магнетики сохраняют намагниченность в отсутствие внешнего магнитного поля? Как определить, намагничен магнетик или нет? Чем отличаются диамагнетики и парамагнетики? Парамагнетики и ферромагнетики? Почему у диамагнетиков магнитная восприимчивость отрицательна, а у парамагнетиков - положительна? Все ли магнетики обладают парамагнетизмом? Диамагнетизмом? Чем вызван гистерезис в ферромагнетиках? Что такое точка Кюри?

8.2. Теоретическое задание

8.2.1. Покажите, что модуль намагниченности J магнетика равен линейной плотности его поверхностных молекулярных токов: $J = J_{\text{пов}}$.

8.2.2. Докажите, что на границе раздела двух магнетиков для нормальных и тангенциальных составляющих индукции и напряженности магнитного поля выполняются соотношения (8.6) и (8.7). Для каких магнетиков имеет смысл использование этих соотношений?

8.2.3. На примере длинного соленоида покажите, что энергия магнитного поля может быть представлена выражением (8.8), а объемная плотность энергии — выражением (8.9).

8.2.4. Докажите, что энергия магнитного поля системы из n токов удовлетворяет соотношению (8.11), где Ψ_k — поток вектора индукции, сцепленный с k -м контуром. Он представляет собой сумму потоков самоиндукции и взаимоиנדукции магнитных полей, созданных всеми остальными контурами.

8.3. Индивидуальное задание

8.3.1. Из конденсатора (см. задание 3.3.3) выдвигают диэлектрик так, что скорость его движения составляет 15 мм/с и направлена вправо. Определите ток в цепи источника питания для момента времени $t = 3,0$ с.

8.3.2. Ток силой 1,0 А протекает по проводнику, отрезок которого изображен на рис. 1.3, д (для нечетных N) и на рис. 1.3, е (для четных N);

$R = (K + 4)100$ мкм. Плотность тока одинакова во всех точках сечения проводника. Определите напряженность и индукцию магнитного поля в точке В. Относительная магнитная проницаемость материала проводника принимается постоянной и равной $\mu = 4 \cdot 10^3$.

8.3.3. Используя условие задания 8.3.2, определите энергию магнитного поля на единицу длины проводника в объеме, обозначенном пунктирной линией.

Список литературы

1. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1982.
2. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. М.: Наука, 1985.
3. Калашиников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
1. Напряженность и индукция электростатического поля.....	4
2. Потенциал электростатического поля. Электрический диполь	9
3. Проводники и диэлектрики в электрических полях.....	13
4. Емкость. Конденсаторы. Энергия электрического поля	16
5. Электрический ток	18
6. Индукция и напряженность магнитного поля.....	23
7. Магнитный поток. Электромагнитная индукция.....	25
8. Магнитное поле в веществе. Энергия магнитного поля	28
Список литературы	30

Редактор *Э. К. Долгатов*

Лицензия № 020617 от 10.08.92

Подписано в печать 00.00.98. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$. Бумага тип № 2.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 2,0

Тираж 1000 экз. Заказ .

Издательско-полиграфический центр СПбГЭТУ

197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5