

**ФИЗИКА. Электродинамика:** Методические указания к практическим занятиям / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». Сост. *Е.С. Ломакина*. СПб, 2015. 34 с.

Приведены типовые задачи по разделу «Электричество». Содержат теоретическую часть, правила оформления, примеры решения задач, задачи для самостоятельного решения и индивидуальные варианты заданий.

Предназначены для студентов бакалавриата направления 08.03.01 «Строительство».

Научный редактор проф. *А.С. Мустафеев*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Решение физических задач является необходимой составной частью изучения курса физики. Знакомясь с основными физическими законами, нужно учиться применять их к решению конкретных задач.

Нахождение аналитического выражения, определяющего искомую величину через исходные данные, решение задачи в общем виде – это только часть дела. Ни одна задача, с которой в своей практической деятельности встречается инженер, не может считаться полностью решенной, пока не получено численное значение искомой величины. Поэтому умение вычислять результат с требуемой точностью по полученной формуле является совершенно необходимым. При подстановке исходных данных в окончательную формулу необходимо следить за используемыми единицами измерения, уметь оценить порядок получаемого результата.

## 2. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

1. Внимательно проанализируйте условие задачи, установите величины, которые требуется определить в задаче.
2. Сделайте краткую запись условия, переведя численные значения величин, данных в условии в систему СИ, и укажите единицы их измерения.
3. Сформулируйте все упрощающие предположения, которые необходимы для решения задачи.
4. При необходимости, сделайте рисунок, поясняющий условие задачи.
5. Выявите физические явления, которые описываются в задаче и запишите физические законы (уравнения), которые их объясняют.
6. Решите полученную систему уравнений относительно искомых физических величин.
7. Проверьте полученное решение на соответствие размерности.

8. Проведите вычисления и оцените разумность полученного числового ответа. Проводя вычисления, помните, что числовые значения физических величин всегда являются приближенными и точность числового ответа не должна превышать точности величин, заданных в условии задачи.

### 3. УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ К РАЗДЕЛАМ ЭЛЕКТРОСТАТИКА, ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

#### ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ

Закон Кулона: два точечных заряда  $q_1$  и  $q_2$ , находящиеся на расстоянии  $r$ , взаимодействуют с силой

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r},$$

где  $\vec{r}$  - радиус-вектор, направленный вдоль линии, соединяющей заряды,  $\epsilon_0$  - электрическая постоянная.

Напряженность электрического поля

$$\vec{E} = \vec{F} / q,$$

где  $\vec{F}$  - сила, с которой поле действует на помещенный в данную точку пробный точечный заряд  $q$ .

Поток вектора напряженности  $\vec{E}$  сквозь поверхность  $S$

$$N = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS,$$

где  $E_n$  - проекция вектора  $\vec{E}$  на направление положительной нормали к элементу площади  $dS$ .

Теорема Гаусса: поток вектора  $\vec{E}$  через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности зарядов, деленной на  $\epsilon_0$ , т.е.

$$\oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i,$$

если поверхность не охватывает ни одного заряда, то  $\oint_S E_n dS = 0$ .

Модуль напряженности электрического поля, созданного точечным зарядом  $q$  на расстоянии  $r$  от него,

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}.$$

Модуль напряженности поля диполя в точке, находящейся на расстоянии  $r \gg l$  от диполя ( $l$  - плечо диполя),

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi},$$

где  $p = ql$  - электрический момент диполя,  $\varphi$  - угол между осью диполя и радиус-вектором, проведенным из центра диполя в данную точку.

Выражения для модулей напряженности электрических полей симметричных объектов имеют вид:

- Напряженность поля равномерно заряженной сферической поверхности в точках, лежащих вне и внутри сферы на расстоянии  $r$  от ее центра

$$E_{\text{внеш}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}, \quad E_{\text{внутр}} = 0.$$

- Напряженность поля бесконечно длинной равномерно заряженной нити или бесконечно длинной равномерно заряженной цилиндрической поверхности в точках, расположенных вне ее,

$$E = \tau / (2\pi\epsilon_0 a),$$

где  $a$  - расстояние точки от нити (оси цилиндра),  $\tau$  - линейная плотность заряда, численно равная заряду, приходящемуся на единицу длины нити или цилиндра, т.е.

$$\tau = dq / dl.$$

- Напряженность поля бесконечной равномерно заряженной плоскости

$$E = \sigma / (2\varepsilon_0),$$

где  $\sigma$  - поверхностная плотность заряда, численно равная заряду, приходящемуся на единицу площади заряженной поверхности, т.е.

$$\sigma = dq / dS.$$

- Напряженность поля двух бесконечных, параллельных плоскостей, равномерно заряженных с поверхностной плотностью заряда  $+\sigma$  и  $-\sigma$  (поле плоского конденсатора) в точках, расположенных между плоскостями и вне их, соответственно

$$E_{\text{внут}} = \sigma / \varepsilon_0, \quad E_{\text{внеш}} = 0.$$

### РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ. ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов, находящихся на расстоянии  $r$

$$W_p = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}.$$

Потенциал электрического поля

$$\varphi = W_p / q',$$

где  $W_p$  - потенциальная энергия пробного заряда  $q'$ , помещенного в данную точку поля.

Работа, совершенная силами поля по перемещению положительного заряда  $q$  из точки 1 в точку 2:

$$A = -\Delta W_p = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

или

$$A = q \int_1^2 E_l dl,$$

где  $E_l$  - проекция вектора напряженности  $\vec{E}$  на направление  $d\vec{l}$ ; при этом интегрирование производится вдоль любой линии, соединяющей точки 1 и 2.

Разность потенциалов и модуль напряженности электрического поля

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E_l dl, \quad E = -\frac{d\varphi}{dl},$$

где производная  $d\varphi/dl$  берется в направлении быстрейшего изменения потенциала, т.е. вдоль силовой линии.

Для однородного поля ( $\vec{E} = \text{const}$ )

$$E = (\varphi_1 - \varphi_2) / l,$$

где  $l$  - расстояние между двумя точками, измеренное вдоль силовой линии.

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

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r}.$$

Потенциал поля сферической поверхности радиуса  $r_0$ , по которой равномерно распределен заряд  $q$

- $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$  - для точек, лежащих вне сферы на расстоянии  $r$  от ее центра,
- $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_0}$  - для точек, лежащих на поверхности сферы или внутри нее.

### ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ. ЭНЕРГИЯ ПОЛЯ

Вектор поляризации  $\vec{P}$  измеряется суммарным электрическим моментом всех молекулярных диполей в единице объема диэлектрика. Для изотропного диэлектрика вектор  $\vec{P}$  пропорционален напряженности  $\vec{E}$  поля внутри него

$$\vec{P} = \chi\epsilon_0\vec{E},$$

где  $\chi$  - диэлектрическая восприимчивость диэлектрика.

Поверхностная плотность  $\sigma'$  связанных зарядов равна проекции вектора  $\vec{P}$  на внешнюю нормаль к поверхности диэлектрика  $\sigma' = P_n$ .

Для изотропного диэлектрика векторы электрического смещения (электрической индукции)  $\vec{D}$  и напряженности  $\vec{E}$  поля связаны между собой соотношением

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

где  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon = 1 + \chi$ .

Теорема Гаусса: поток вектора  $\vec{D}$  через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме свободных зарядов  $q_i$ , охватываемых этой поверхностью

$$N = \oint_S \vec{D} d\vec{S} = \oint_S D_n dS = \sum_{i=1}^n q_i.$$

Емкость конденсатора определяется отношением его заряда к разности потенциалов (напряжению) на пластинах

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}.$$

Емкость плоского конденсатора

$$C = \epsilon\epsilon_0 S/l,$$

где  $S$  - площадь его пластин,  $l$  - расстояние между пластинами,  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей конденсатор.

Емкость батареи из  $n$  конденсаторов, соединенных параллельно,

$$C = \sum_{i=1}^n C_i.$$

Емкость батареи из  $n$  конденсаторов, соединенных последовательно,

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}.$$

Энергия заряженного конденсатора

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2}.$$

Объемная плотность энергии электрического поля

$$w = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2} = \frac{D^2}{2\epsilon\epsilon_0}.$$

### ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ СРЕД

Сила тока определяется количеством электричества, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени

$$I = dq/dt.$$

Плотность тока определяется силой тока, отнесенной к единице площади поперечного сечения проводника

$$j = dI/dS.$$

Если известны заряд носителя -  $q$ , концентрация носителей -  $n$  и средняя скорость их направленного движения -  $\langle v \rangle$ , то выражение для плотности тока принимает вид

$$j = qn\langle v \rangle.$$

Сопротивление проводника длиной  $l$  с площадью поперечного сечения  $S$ ,  $R = \rho l/S$ , где  $\rho$  - удельное сопротивление материала проводника,  $\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta t)$ ,  $\rho_0$  - удельное сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  - термический коэффициент сопротивления.

Плотность тока и напряженность электрического поля в данной точке проводника связаны между собой законом Ома в дифференциальной форме

$$j = \sigma E,$$

где  $\sigma = 1/\rho$  - удельная электропроводность проводника.

Закон Ома для участка однородной цепи (не содержащей источники э.д.с)

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R},$$

где  $\varphi_1 - \varphi_2$  - разность потенциалов на концах участка,  $R$  - его сопротивление.

Закон Ома для участка неоднородной цепи, содержащей источники э.д.с -  $\varepsilon_i$  и сопротивления -  $R_i$

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \sum_{i=1}^m \varepsilon_i}{\sum_{i=1}^n R_i}.$$

Закон Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\sum_{i=1}^m \varepsilon_i}{R_{\text{внеш}} + R_{\text{внут}}},$$

где  $R_{\text{внеш}}$ ,  $R_{\text{внут}}$  - полные сопротивления внешнего и внутреннего участков цепи.

Правила Кирхгофа для разветвленных цепей:

1. - алгебраическая сумма сил токов -  $I_i$ , сходящихся в любом узле (узел - соединение не менее трех проводников), равна нулю

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0;$$

2. - для любого замкнутого контура алгебраическая сумма произведений сил токов -  $I_i$ , на сопротивления соответствующих участков цепи -  $R_i$ , равна алгебраической сумме источников э.д.с.  $\varepsilon_i$ , действующих в этом контуре

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i.$$

Общее сопротивление  $n$  участков при их параллельном и последовательном соединении соответственно

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}, \quad R = \sum_{i=1}^n R_i.$$

Работа электрических сил на участке цепи, на концах которого имеется разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$ ,

$$A = (\varphi_1 - \varphi_2)It.$$

Количество теплоты, выделенное на участке цепи сопротивлением  $R$ , по которому в течение времени  $t$  идет ток силой  $I$ , определяется законом Джоуля-Ленца

$$Q = I^2 R t.$$

Работа, совершенная источником электрической энергии за время  $t$ ,

$$A = \varepsilon I t = I^2 R_{\text{полн}} t = \frac{\varepsilon^2}{R_{\text{полн}}} t,$$

где  $\varepsilon$  - э.д.с. источника,  $R_{\text{полн}}$  - полное сопротивление цепи.

Плотность тока в металле  $j = en\langle v \rangle$ , где  $e$  - заряд электрона,  $n$  - концентрация свободных электронов,  $\langle v \rangle$  - средняя скорость их направленного движения.

Плотность тока в газе при отсутствии насыщения

$$j = qn(u_+ + u_-)E,$$

где  $q$  - абсолютное значение заряда каждого иона,  $n$  - концентрация пар ионов,  $u_+$ ,  $u_-$  - подвижности положительных и отрицательных ионов (подвижность численно равна средней скорости носителей заряда в поле единичной напряженности -  $u = \langle v \rangle / E$ ),  $E$  - напряженность электрического поля в газе.

Плотность тока насыщения в газе между плоскими электродами, расстояние между которыми  $l$ , равна

$$j_H = q \frac{dn}{dt} l,$$

где  $dn$  - число пар ионов, образуемых ионизатором в единице объема газа.

Число пар ионов, рекомбинирующих в единице объема газа, пропорционально квадрату концентрации ионов

$$dn / dt = -\gamma n^2,$$

где  $\gamma$  - коэффициент рекомбинации.

Удельная электропроводность электролита

$$\sigma = q\alpha n_0(u_+ + u_-),$$

где  $n_0$  - концентрация молекул растворенного вещества,  $\alpha$  - коэффициент диссоциации, равный отношению числа диссоциировавших молекул к их общему числу.

### ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

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

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

где  $\mu$  - магнитная проницаемость изотропной среды;  $\mu_0$  - магнитная постоянная. В вакууме  $\mu = 0$ , и магнитная индукция

$$\vec{B} = \mu_0\vec{H}.$$

Закон Био-Савара-Лапласа

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}, \quad \text{или} \quad dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{dl \cdot I}{r^2} \sin \alpha,$$

где  $d\vec{B}$  - магнитная индукция поля, создаваемого элементом провода  $d\vec{l}$  с током  $I$ ;  $\vec{r}$  - радиус-вектор, направленный от элемента проводника к точке, в которой определяется магнитная индукция;  $\alpha$  - угол между радиус-вектором и направлением тока.

Магнитная индукция в центре кругового тока радиуса  $R$

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

Магнитная индукция на оси кругового тока

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

где  $h$  - расстояние от центра витка до точки, в которой определяется магнитная индукция.

Магнитная индукция поля прямого тока

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

где  $r_0$  - расстояние от оси провода до точки, в которой определяется магнитная индукция.

Магнитная индукция поля, создаваемого отрезком проводника с током

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2),$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - углы, между радиус-векторами, проведенными к концам проводника, и направлением тока.

При симметричном расположении концов проводника относительно точки, в которой определяется магнитная индукция,  $-\cos\alpha_2 = \cos\alpha_1 = \cos\alpha$ , и

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r_0} \cos\alpha.$$

Магнитная индукция поля соленоида

$$B = \mu\mu_0 nI,$$

где  $n$  - отношение числа витков соленоида к его длине.

Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле (закон Ампера)

$$\vec{F} = I[\vec{l}, \vec{B}], \text{ или } F = IBl \sin\alpha,$$

где  $l$  - длина проводника;  $\alpha$  - угол между направлением тока и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ . Это выражение справедливо для однородного магнитного поля и прямого отрезка проводника. Если поле неоднородно и проводник не является прямым, то закон Ампера нужно применять к каждому элементу  $dl$

$$d\vec{F} = I[d\vec{l}, \vec{B}].$$

Магнитный момент плоского контура с током

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

где  $\vec{n}$  - единичный вектор нормали (положительной) к плоскости контура;  $I$  - сила тока, протекающего по контуру;  $S$  - площадь контура.

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

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

где  $\alpha$  - угол между векторами  $\vec{p}_m$  и  $\vec{B}$ .

Потенциальная энергия (механическая) контура с током в магнитном поле

$$E_p = -(\vec{p}_m, \vec{B}), \text{ или } E_p = -p_m B \cos\alpha$$

Отношение магнитного момента  $p_m$  к механическому  $L$  (моменту импульса) заряженной частицы, движущейся по круговой орбите,

$$\frac{p_m}{L} = \frac{1}{2} \frac{Q}{m},$$

где  $Q$  - заряд частицы;  $m$  - масса частицы.

Сила Лоренца

$$\vec{F} = Q[\vec{v}, \vec{B}], \text{ или } F = QvB \sin\alpha$$

где  $v$  - скорость заряженной частицы;  $\alpha$  - угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

Магнитный поток

- для однородного магнитного поля и плоской поверхности

$$\Phi = BS \cos\alpha \text{ или } \Phi = B_n S,$$

где  $S$  - площадь контура;  $\alpha$  - угол между нормалью к плоскости контура и вектором магнитной индукции

- для неоднородного поля и произвольной поверхности

$$\Phi = \int_S B_n dS.$$

Потокосцепление (полный поток)

$$\Psi = N\Phi.$$

Эта формула справедлива для соленоида и тороида с равномерной намоткой плотно прилегающих друг к другу  $N$  витков.

Работа по перемещению замкнутого контура в магнитном поле

$$dA = Id\Phi.$$

ЭДС индукции

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt}.$$

Разность потенциалов на концах проводника, движущегося со скоростью  $\vec{v}$  в магнитном поле,

$$U = Blv \sin \alpha,$$

где  $l$  - длина проводника;  $\alpha$  - угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

Заряд, протекающий по замкнутому контуру при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур,

$$dQ = d\Phi / R, \text{ или } dQ = Nd\Phi / R = d\Psi / R$$

где  $R$  - сопротивление контура.

Индуктивность контура

$$L = \Phi / I$$

ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}$$

Индуктивность соленоида

$$L = \mu\mu_0 n^2 V,$$

где  $n$  - отношение числа витков соленоида к его длине;  $V$  - объем соленоида.

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

- $I = \frac{\varepsilon}{R} (1 - e^{-Rt/L})$  при замыкании цепи, где  $\varepsilon$  - ЭДС источника тока;  $t$  - время, прошедшее после замыкания цепи;
  - $I = I_0 e^{-Rt/L}$  при размыкании цепи, где  $I_0$  - сила тока в цепи при  $t = 0$ ;  $t$  - время, прошедшее с момента размыкания цепи.
- Энергия магнитного поля

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

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

$$w = BH / 2 = B^2 / (2\mu\mu_0) = \mu\mu_0 H^2 / 2,$$

где  $B$  - магнитная индукция;  $H$  - напряженность магнитного поля.

#### 4. РЕКОМЕНДАЦИИ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

##### РАЗДЕЛ I

1. Выясните, чем создается рассматриваемое электрическое поле: точечными или распределенными зарядами.
2. Если в условии включены элементы механики, то сделайте чертеж, укажите на чертеже все силы, действующие на точечный заряд, запишите условие равновесия или основное уравнение динамики материальной точки.

3. Если в условии задачи не указывается среда, в которой взаимодействуют заряды, то подразумевается вакуум ( $\epsilon=1$ ) или воздух.

4. Если электрическое поле образовано шаром (сферой) с равномерно распределенным на его поверхности зарядом, то при нахождении характеристик поля вне шара считают, что весь заряд шара сосредоточен в его геометрическом центре.

5. Запишите уравнения для расчета напряженности, потенциала или работы сил электростатического поля. При необходимости используйте принцип суперпозиции для сил, полей и потенциалов.

## РАЗДЕЛ 2

1. Следует помнить, что - диэлектрическая проницаемость среды показывает, во сколько раз поле внутри диэлектрика слабее поля в вакууме.

2. Следует помнить, что:

- если конденсатор подключить к источнику питания, зарядить его и затем отключить, то при изменении его электроемкости заряд на конденсаторе не меняется;

- если же конденсатор постоянно подключен к источнику питания и не отключен, то при всех изменениях его электроемкости постоянной остается разность потенциалов между пластинами.

3. В случае сложного соединения конденсаторов, которое нельзя отнести ни к последовательному, ни к параллельному, можно заменить имеющуюся схему другой, эквивалентной данной, разложив ее на элементы с последовательными и параллельными соединениями. Такая эквивалентная замена основана на правомерности соединять и разъединять точки цепи, имеющие одинаковые потенциалы.

## РАЗДЕЛ 3

1. Начертите схему электрической цепи, обозначив на ней полярность источников, а также направление тока в цепи (если оно неизвестно, то укажите предполагаемое направление).

2. Следует помнить, что напряжением  $U_{12}$  (или падением напряжения) на участке цепи 1-2 называется физическая величина,

численно равная работе, совершаемой результирующим полем электрических и сторонних сил при перемещении вдоль цепи из точки 1 в точку 2 единичного положительного заряда. Напряжение на концах участка цепи совпадает с разностью потенциалов только в том случае, если на участке не действуют сторонние силы.

3. При расчете сопротивлений разветвленных цепей используйте метод замены участка цепи эквивалентной (упрощенной) схемой, пользуясь следующим правилом: точки, имеющие одинаковый потенциал, можно соединять и разъединять без влияния на работоспособность схемы.

4. При решении задач с использованием правил Кирхгофа необходимо:

- выбрать и обозначить узлы разветвления токов и контуры обхода;

- контуры выбирать таким образом, чтобы каждый новый контур содержал хотя бы один участок цепи, не входивший в уже рассмотренные ранее контуры;

- произвольно выбрать направления токов на всех участках разветвленной цепи, указав их направление стрелками на чертеже;

а) составляя уравнения по 1-му правилу Кирхгофа:

- для  $m$  узлов в цепи записать  $(m-1)$  независимых уравнений;

- соблюдать правило выбора знаков;

б) составляя уравнения по 2-му правилу Кирхгофа:

- выбрать направление обхода  $n$  контуров цепи и записать  $(n-1)$  независимых уравнений;

- соблюдать правило выбора знаков.

## РЕКОМЕНДАЦИИ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМУ

1. Сделайте схематический чертеж, на котором, в зависимости от условия, укажите проводник (контур) с током или движущуюся частицу (обозначив вектор начальной скорости частицы).

2. Укажите направление вектора индукции (напряженности) магнитного поля в заданной точке.

3. Отметьте углы между направлением вектора магнитной индукции и отдельным элементом проводника (контур) или вектором начальной скорости частицы.

Задачи данного раздела можно разделить на 3 группы:

1) задачи на определение индукции (напряженности) магнитного поля, создаваемого проводником (контуром) с током в выбранной точке;

2) задачи на определение сил, действующих на проводник с током, помещенный в однородное магнитное поле;

3) задачи о движении заряженных частиц в магнитном поле, а также в скрещенных электрическом и магнитном полях.

*При решении задач 1-ой группы:*

1. Если поле в указанной точке создается несколькими проводниками, воспользуйтесь принципом суперпозиции.

2. Если для решения задачи необходимо использовать теорему о циркуляции вектора  $B$ , выберите контур интегрирования.

*При решении задач 2-ой группы:*

1. Используя правило левой руки, определите направление сил, действующих на каждый элемент тока в магнитном поле, и укажите вектора этих сил (сила Ампера) на чертеже.

2. Если задача сводится к определению сил, действующих на отдельные проводники контура (или вращающихся моментов, создаваемых этими силами), то запишите уравнения для сил (или моментов сил) для каждого элемента тока и найдите из них искомые величины.

3. Если в задаче рассматривается равновесие проводника (контура) с током в магнитном поле, то кроме силы Ампера, нужно указать все остальные силы, действующие на проводник (контур) и записать условие его равновесия.

*При решении задач 3-ой группы:*

1. Укажите направление силовых линий магнитного поля, скорость и знак заряда движущейся частицы.

2. Если скорость частицы направлена под углом к линиям индукции магнитного поля, ее следует разложить на две составляющие (нормальную и касательную вектору  $B$ ).

3. Укажите силы, действующие на заряженную частицу. Как правило, действие силы тяжести не учитывается, так как она ничтожно мала по сравнению с силами электромагнитного поля. При

нахождении направления силы Лоренца обратите внимание на знак заряда частицы.

4. Силы, действующие на заряженную частицу, разложите на нормальную и касательную составляющие. Для каждой составляющей сил запишите уравнение динамики материальной точки, затем расшифруйте силы с помощью формул электростатики. При необходимости добавьте кинематические уравнения.

#### ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. Два шарика массой по 1 г каждый подвешены на нитях, верхние концы которых прикреплены в одной точке. Длина каждой нити 10 см. Какие одинаковые заряды надо сообщить шарикам, чтобы нити разошлись на угол  $60^\circ$ ?

2. Согласно модели атома водорода один электрон вращается по окружности вокруг ядра атома, состоящего из одного протона. Определить, с какой частотой должен вращаться электрон вокруг ядра в вакууме, чтобы не упасть на него, если радиус орбиты равен  $5 \cdot 10^{-9}$  см?

3. Два заряда в вакууме взаимодействуют с такой же силой на расстоянии 11 см, как в скипидаре на расстоянии 7,4 см. Определить диэлектрическую проницаемость скипидара.

4. На двух одинаковых капельках воды находится по одному лишнему электрону, причем сила электрического отталкивания капелек уравновешивает силу их взаимного гравитационного притяжения. Каковы радиусы капелек? Плотность воды  $10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

5. Два заряда в вакууме взаимодействуют с такой же силой на расстоянии 27 см, как в воде на расстоянии 3 см. Определить диэлектрическую проницаемость воды.

6. Три отрицательных заряда по 9 нКл каждый расположены в вершинах равностороннего треугольника. Какой заряд надо поместить в центре треугольника, чтобы система находилась в равновесии?

7. Электроны влетают параллельно пластинам плоского конденсатора длиной 5 см с расстоянием между пластинами 3 см. С какой скоростью влетели электроны в конденсатор, если за время движения в конденсаторе они отклонились от первоначального на-

правления движения на 3 мм. Разность потенциалов между пластинами 700 В.

8. Две отрицательно заряженных пылинки находятся в воздухе на расстоянии 1 мм друг от друга и отталкиваются с силой  $4 \cdot 10^{-5}$  Н. Считая заряды пылинок равными, определить число избыточных электронов на каждой пылинке.

9. Два закрепленных тела с зарядами  $3 \cdot 10^{-9}$  Кл и  $1,2 \cdot 10^{-8}$  Кл находятся на расстоянии 12 см друг от друга. Где нужно поместить на линии проходящей через эти два тела третий заряд, чтобы он находился в равновесии?

10. Шар, радиус которого равен 1 см и заряд  $2 \cdot 10^{-5}$  Кл, поместили в масло. Плотность материала шара  $2 \text{ г/см}^3$ , плотность масла  $0,8 \text{ г/см}^3$ . Чтобы шар плавал в масле, его поместили в электрическое поле, направленное вертикально вверх. Какова напряженность электрического поля?

11. Две бесконечные параллельные пластины заряжены с поверхностной плотностью заряда  $1 \text{ нКл/м}^2$  и  $-3 \text{ нКл/м}^2$ . Определить напряженность поля в точках, расположенных между пластинами и вне пластин.

12. Между пластинами плоского конденсатора, расположенными горизонтально удерживается в равновесии пылинка массой  $2 \cdot 10^{-9}$  г. Разность потенциалов между пластинами равна 300 В, расстояние между ними 1 см. Определить количество электронов, образующих заряд пылинки.

13. Десять одинаковых конденсаторов емкостью 100 пФ каждый соединены последовательно в батарею. Чему равна емкость батареи?

14. Как надо соединить в батарею конденсаторы емкостью 2 пФ, 4 пФ и 6 пФ, чтобы получить батарею конденсаторов емкостью 3 пФ?

15. Плоский конденсатор, расстояние между пластинами которого равно 1 см, заряжен до 300 В. Какова будет разность потенциалов, если пластины раздвинуть до 5 см?

16. Плоский конденсатор заряжен до разности потенциалов 200 В. Обкладки конденсатора изолированы друг от друга пластиной из диэлектрика. Какова диэлектрическая проницаемость мате-

риала пластины, если при ее удалении разность потенциалов между обкладками конденсатора возрастет до 1200 В?

17. Металлическим шарикам емкостью 2 и 3 пФ сообщены электрические заряды 2 и 1 мкКл соответственно. Определить заряд на каждом шарике, после того как они будут соединены проводником.

18. Вертикально расположенные пластины плоского воздушного конденсатора до половины погружают в масло с диэлектрической проницаемостью равной 7. Как изменится емкость конденсатора после погружения в масло.

19. Для определения пробивного напряжения в жидкий диэлектрик погружают два параллельных электрода в виде дисков диаметром 25 мм. Расстояние между электродами 2,5 мм. Какой максимальный заряд будет накоплен на электродах, если пробивное напряжение для диэлектрика 60 кВ?

20. Найти разность потенциалов двух точек электрического поля, если для перемещения заряда  $2 \cdot 10^{-6}$  Кл между этими точками выполнена работа  $8 \cdot 10^{-4}$  Дж.

21. Какая плотность тока в проводнике сечением  $1,2 \text{ мм}^2$ , если за 0,4 с через него прошло  $6 \cdot 10^{18}$  электронов?

22. В проводнике течет постоянный ток силой 12 мА. Какой заряд пройдет через поперечное сечение проводника за 15 мин?

23. Проводники сопротивлением 2 Ом и 3 Ом соединены последовательно и подключены к источнику тока с напряжением на зажимах 12 В. Найти напряжение на каждом из проводников.

24. Четыре проводника одинаковой длины из одинакового материала соединены последовательно. Сечения проводников различны и равны  $1 \text{ мм}^2$ ,  $2 \text{ мм}^2$ ,  $3 \text{ мм}^2$ ,  $4 \text{ мм}^2$ . Разность потенциалов на концах цепи 100 В. Определить напряжение на каждом из проводников.

25. Электроплитка со ступенчатой регулировкой температуры имеет две секции нагревательного элемента. Сопротивление секций одинаковое – величиной 110 Ом. Какую мощность имеет прибор при включении секций последовательно, параллельно и при работе только одной секции? Напряжение в сети 220 В. Изменение сопротивления секций при нагревании не учитывать.

26. Лифт массой 90 кг поднимается со средней скоростью 0,44 м/с. Напряжение на зажимах мотора равно 220 В, а его КПД 90 %. Определить мощность, потребляемую мотором, и силу тока.

27. Через обмотки стартер-генератора течет ток силой 500 А, напряжение на зажимах генератора 27 В. Какую мощность и энергию потребляет генератор, если время его работы 1 минута?

28. ЭДС генератора равна 240 В, сопротивление внешнего участка цепи равно 23 Ом и сопротивление генератора 1 Ом. Определить: полную мощность; полезную мощность; КПД генератора.

29. Генератор с ЭДС 120 В и внутренним сопротивлением 0,2 Ом соединен с потребителем, сопротивление которого 14 Ом. Сопротивление подводящих проводов 0,8 Ом. Определить силу тока в цепи и напряжение на зажимах генератора.

30. Два источника тока с ЭДС 1,5 В и 2 В, соединены одноименными полюсами. Вольтметр, подключенный к зажимам батарей, показал напряжение 1,7 В. Найти отношение внутренних сопротивлений источников тока.

31. Определить скорость движения трамвая на горизонтальном участке пути, если КПД электроустановки 70 %. Трамвай потребляет ток 100 А при напряжении 500 В и развивает силу тяги 3 кН.

32. ЭДС генератора равна 240 В, сопротивление внешнего участка цепи равно 23 Ом и сопротивление генератора 1 Ом. Определить: полную мощность; полезную мощность; КПД генератора.

33. Максимальная мощность, выделяющаяся во внешней цепи, равна 12 Вт при силе тока 2 А. Определить ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока.

34. В сеть постоянного тока с напряжением 110 В включен электромотор, сопротивление обмотки которого равно 2 Ом. Мотор потребляет ток силой 8 А. Определить мощность, потребляемую мотором, механическую мощность и КПД мотора.

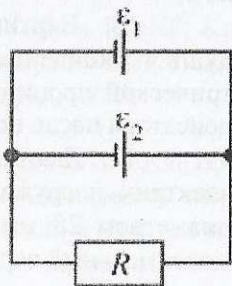


Рис.1

35. Какой шунт нужно присоединить к гальванометру сопротивлением  $10^4$  Ом, чтобы цена его деления по току увеличилась в 50 раз?

36. Миллиамперметр рассчитан на номинальный ток 30 мА при напряжении на клеммах 75 мВ. Определить сопротивление внешнего шунта к прибору, позволяющего измерять силу тока до 1,5 А. Какое дополнительное сопротивление надо подключить к прибору, чтобы можно было измерять им напряжение до 400 В?

37. Определить напряжение на зажимах резистора сопротивлением  $R = 3$  Ом, см. рис.1, если ЭДС и внутренние сопротивления источников тока равны  $\varepsilon_1 = 5$  В,  $\varepsilon_2 = 1$  Ом,  $r_1 = 3$  В,  $r_2 = 0,5$  Ом.

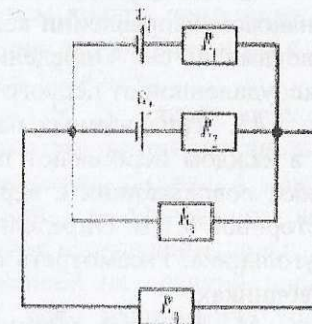


Рис.2

38. Определить напряжение на резисторах сопротивлениями  $R_1 = 2$  Ом,  $R_2 = R_3 = 4$  Ом и  $R_4 = 2$  Ом, включенных в цепь, как показано на рис.2, если  $\varepsilon_1 = 10$  В,  $\varepsilon_2 = 4$  В. Сопротивлениями источников тока пренебречь.

39. Сопротивления участков цепи АВ, ВС и АД соответственно равны 1000, 500 и 200 Ом. Гальванический элемент, полюсы которого подключены к точкам А и С, имеет ЭДС 1,8 В. Гальванометр регистрирует силу тока 0,5 мА в направлении, указанном стрелкой.

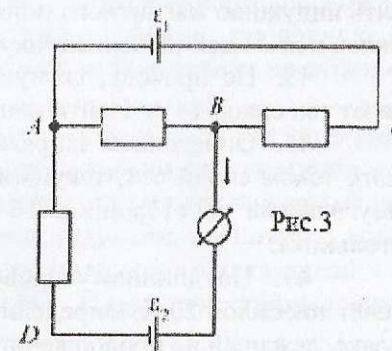


Рис.3

Определить ЭДС второго гальванического элемента, пренебрегая внутренними сопротивлениями элементов и внутренним сопротивлением гальванометра, см. рис. 3.

40. Три одинаковых источника тока с внутренним сопротивлением 6 Ом замкнули, один раз соединив последовательно, другой раз – параллельно на некоторый резистор. При этом сила тока в цепи была в обоих случаях одинакова. Определить сопротивление резистора.

41. По прямому длинному проводнику течет ток силой 50 А. Определить направление и величину магнитной индукции в точке, удаленной от проводника на 10 см.

42. По двум длинным параллельным проводам текут токи в одинаковом направлении величиной 10 А и 15 А. Расстояние между проводами 10 см. Определить напряженность магнитного поля в точке, удаленной от первого провода на 8 см и от второго на 6 см.

43. Три длинных параллельных проводника с током силой 5 А в каждом пересекают перпендикулярную к ним в плоскости в точках, совпадающих с вершинами равностороннего треугольника со стороной 0,1 м. Определить индукцию магнитного поля в центре треугольника. Рассмотреть случаи различного направления токов в проводниках.

44. По двум длинным прямолинейным проводникам, находящимся на расстоянии 5 см в параллельных плоскостях текут токи силой 10 А во взаимно перпендикулярных направлениях. Определить индукцию магнитного поля в точке равноудаленной от проводников и лежащей на перпендикуляре между ними.

45. По проводу, согнутому в виде кольца радиусом 11 см, течет ток силой 14 А. Найти напряженность поля в центре кольца.

46. Определить напряженность магнитного поля, создаваемого током силой 6 А, текущем по проводу, согнутому в виде прямоугольника со сторонами 16 см и 30 см, в центре этого прямоугольника.

47. По длинному проводу, согнутому под прямым углом, течет ток силой 20 А. Определить напряженность магнитного поля в точке, лежащей на продолжении одной из сторон угла на расстоянии 2 см от вершины.

48. В магнитном поле длинного прямолинейного проводника с током силой 50 А находится отрезок прямолинейного проводника длиной 40 см, по которому проходит ток силой 10 А. Провод-

ники параллельны друг другу и расположены на расстоянии 20 см. Какая сила действует на отрезок проводника?

49. Проводник с током силой 12 А помещен в магнитное поле с индукцией 0,4 Тл. С какой силой действует поле на проводник длиной 40 см, расположенный под углом  $90^\circ$  к магнитным силовым линиям? Чему равна сила, когда ток образует с направлением поля угол  $30^\circ$ ? Чему равна сила, когда проводник с током расположен вдоль магнитных линий поля?

50. По кольцу из медной проволоки площадью сечения  $1 \text{ мм}^2$  протекает ток силой 10 А. К концам кольца приложена разность потенциалов 0,15 В. Найти индукцию магнитного поля в центре кольца. Удельное сопротивление меди  $17 \text{ нОм}\cdot\text{м}$ .

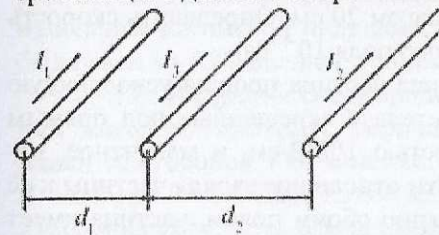


Рис.4

51. В одной плоскости расположены три параллельных проводника, см. рис. 4, каждый длиной 1 м. Определить величину и направление силы, действующей на средний проводник, если направление тока в нем противоположно направлению токов в крайних проводниках. Силы токов в проводниках:

$I_1 = 20 \text{ А}$ ,  $I_2 = 10 \text{ А}$ ,  $I_3 = 5 \text{ А}$ , расстояние между проводниками  $d_1 = 5 \text{ см}$ ,  $d_2 = 10 \text{ см}$ . Как изменится ответ, если в первом проводнике изменить направление тока?

52. Металлический проводник сечением  $2 \text{ мм}^2$  согнут в виде трех сторон квадрата и подвешен в вертикально направленном однородном магнитном поле за концы так, что может вращаться вокруг горизонтальной оси. Определить индукцию магнитного поля, если при прохождении по проводнику постоянного тока силой 3 А он отклоняется от вертикали на угол  $60^\circ$ . Плотность материала проводника равна  $8,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

53. По витку радиусом 10 см течет ток силой 50 А. Виток помещен в однородное магнитное поле напряженностью  $100 \text{ А/м}$ . Определить вращающий момент, действующий на виток, если плос-

кость витка составляет угол  $60^\circ$  с линиями индукции магнитного поля.

54. По контуру в виде равностороннего треугольника течёт ток силой 40 А. Сторона треугольника имеет длину 30 см. Определить магнитную индукцию в точке пересечения высот.

55. Заряженная частица влетает перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля, созданного в некоторой среде. В результате взаимодействия с веществом среды частица во время движения потеряла половину своей первоначальной энергии. Во сколько раз отличается радиус кривизны траектории частицы в начале и конце движения?

56. Электрон в однородном магнитном поле движется по винтовой линии радиусом 5 см и шагом 20 см. Определить скорость электрона, если индукция магнитного поля  $10^{-4}$  Тл.

57. Отрицательно заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов 100 В и влетела в скрещенные под прямым углом электрическое, напряженностью 100 В/см, и магнитное, напряженностью  $8 \cdot 10^4$  А/м, поля. Найти отношение заряда частицы к её массе, если двигаясь перпендикулярно обоим полям, частица имеет прямолинейную траекторию.

58. Найти кинетическую энергию протона, движущегося по дуге окружности радиусом 30 см в магнитном поле с индукцией 2 Тл.

59. В однородном магнитном поле, индукция которого 1 Тл, движется равномерно прямой проводник длиной 20 см. По проводнику течет ток силой 2 А. Скорость проводника равна 15 см/с и направлена перпендикулярно вектору индукции. Найти работу перемещения проводника за время равное 5 с.

60. Прямой провод длиной 20 см с током силой 5 А находящийся в однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл, расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции. Определить работу сил, под действием которых проводник переместился на 2 см.

61. В постоянном магнитном поле напряженностью 40 А/м движется проводник длиной 10 м перпендикулярно полю. С какой скоростью перемещается проводник, если на его концах индуцируется ЭДС 4 мВ?

62. Рамка площадью  $50 \text{ см}^2$ , содержащая 100 витков, равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией 0,04 Тл. Определить максимальную ЭДС индукции, если ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции магнитного поля, а рамка делает 960 оборотов в минуту.

63. Квадратная рамка площадью  $20 \text{ см}^2$ , состоящая из 1000 витков провода, расположена перпендикулярно силовым линиям однородного поля с индукцией 10 мТл. За время равное 0,02 с рамку удалили за пределы поля. Какая ЭДС индукции наводится в рамке?

64. Силовые линии однородного магнитного поля перпендикулярны плоскости круглого медного проволочного кольца диаметром 20 см. Диаметр проволоки 2 мм. Какая должна быть скорость изменения магнитной индукции, чтобы индукционный ток в кольце был равен 10 А? Удельное сопротивление меди 17 нОм·м.

65. Индукция В однородного магнитного поля, силовые линии которого проходят перпендикулярно плоскости квадратной рамки со стороной 1 м, изменяется с течением времени  $t$  по закону:  $B = k \cdot t$ , где  $k = 10$  Тл/с. Какое количество теплоты выделится за 2 с изменения поля, если рамка сделана из алюминиевого провода сечением  $1 \text{ мм}^2$ . Удельное сопротивление алюминия 29 нОм·м.

66. Соленоид, диаметр которого 4 см, поворачивается в магнитном поле на  $180^\circ$  за 0,004 с. Напряженность магнитного поля  $4,77 \cdot 10^5$  А/м. Определить среднее значение ЭДС индукции, если соленоид имеет 50 витков.

67. В однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл проводник длиной 20 см движется перпендикулярно линиям индукции со скоростью 10 м/с. Определить силу тока в проводнике, если он присоединен к источнику тока с ЭДС 10 В. Полное сопротивление электрической цепи равно 10 Ом.

68. Проводник длиной 1 м и сопротивлением 2 Ом лежит на двух горизонтальных шинах, замкнутых на источник тока, ЭДС которого 1 В. Шины находятся в вертикально направленном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл. Определить силу тока в проводнике, если: проводник неподвижен; проводник движется со скоростью 4 м/с (в обе стороны по шинам). В каком направлении и с какой скоростью надо перемещать проводник, чтобы ток через него не протекал?

69. Индуктивность обмотки якоря электродвигателя троллейбуса 0,5 Гн. Определить ЭДС самоиндукции при размыкании цепи якоря, если за 0,5 с ток уменьшился с 20 А до нуля.

70. При равномерном изменении силы тока в катушке от 2 А до 10 А в течении 0,5 с магнитный поток сквозь контур катушки изменился от 0,1 Вб до 0,16 Вб. Определить ЭДС самоиндукции и индуктивность катушки. Найти энергию магнитного поля в катушке при силе тока 12 А. Обмотка катушки содержит 100 витков.

### ПРИМЕРНЫЕ ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

#### Вариант № 1

1. Тонкое кольцо радиусом 8 см несет равномерно распределенный заряд с линейной плотностью 10 нКл/м. Какова напряженность электрического поля в точке, равноудаленной от всех точек кольца на расстояние 10 см? [2,71 кВ/м]

2. Металлический шар радиусом 1 м, имеющий потенциал 1 В, окружает сферической оболочкой радиусом 2 м. Чему будет равен потенциал шара, если заземлить оболочку? [0,5 В]

3. Плоский воздушный конденсатор с площадью пластин, равной 500 см<sup>2</sup>, подключен к источнику тока с ЭДС, равной 300 В. Определите работу внешних сил по раздвижению пластин от расстояния 1 см до 3 см. Конденсатор перед раздвижением пластин отключен от источника тока. [133 мкДж]

4. Плоский конденсатор заполнен диэлектриком, диэлектрическая проницаемость которого зависит от напряжения на конденсаторе по закону  $\epsilon = aU$ , где  $a = 1В^{-1}$ . Параллельно этому «нелинейному» конденсатору, который не заряжен, подключают такой же конденсатор, но без диэлектрика, который заряжен до напряжения  $U_0 = 156 В$ . Определите напряжение  $U$ , которое установится на конденсаторах.

$$U = (\sqrt{4aU + 1} - 1)/(2a) = 12В$$

#### Вариант № 2

1. Очень длинная прямая проволока несет заряд, равномерно распределенный по всей ее длине. Вычислите линейную плотность заряда, если напряженность поля на расстоянии 0,5 м от проволоки против ее середины равна 200 В/м. [5,5 нКл/м]

2. Проводящий шар радиусом 1 м равномерно заряжен по поверхности зарядом 1 нКл. Каково минимальное расстояние между точками А и В, такими, что разность потенциалов между ними равна -1 В? [12,5 см]

3. Батарея из двух последовательно соединенных конденсаторов с емкостями 300 пФ и 500 пФ заряжена до разности потенциалов 1200 В. Чему равен заряд на обкладках каждого конденсатора? [225 нКл]

4. Найдите электрический момент  $p$  тонкого стержня длиной  $l$ , линейная плотность заряда которого зависит от расстояния  $x$  до одного из его концов как  $\lambda = a(2x - l)$ , где  $a$  - положительная постоянная. [ $p = al^3/6$ ]

#### Вариант № 3

1. Прямой металлический стержень диаметром 5 см и длиной 4 м несет равномерно распределенный по его поверхности заряд, равный 500 нКл. Определите напряженность поля в точке, находящейся против середины стержня на расстоянии 1 см от его поверхности. [643 кВ/м]

2. Заряженный до потенциала 300 В шар радиусом 15 см соединили с незаряженным шаром длиной тонкой проволокой. После соединения потенциал шара оказался равным 100 В. Каков радиус второго шара? [0,3 м]

3. Эбонитовая плоскопараллельная пластина помещена в однородное электрическое поле напряженностью 2 МВ/м. Грани пластины перпендикулярны линиям напряженности. Определите поверхностную плотность связанных зарядов на гранях пластины. [ $\pm 11.8$  мкКл/м<sup>2</sup>]

4. Точечный заряд  $q$  находится на расстоянии  $d$  от проводящей плоскости. Какую энергию нужно затратить, чтобы удалить его на бесконечное расстояние от плоскости? [ $W = q^2/(16\pi\epsilon_0 d)$ ]

#### Вариант 4

1. Сколько одинаковых элементов с внутренним сопротивлением 0,5 Ом и ЭДС 1,5 В каждый надо соединить последовательно, чтобы напряжение на зажимах батареи было равно 80 В при силе тока 0,5 А? [64]

2. По проводнику сопротивлением 3 Ом течет ток, сила которого равномерно возрастает. Количество теплоты, выделившееся в проводнике за время 8 с, равно 200 Дж. Определите количество электричества, протекшее за это время по проводнику. В момент времени, принятый за начальный, сила тока в проводнике равна нулю. [20 Кл]

3. Между пластинами плоского конденсатора площадью 250 см<sup>2</sup> каждая находится 500 см водорода. Концентрация ионов водорода в газе  $n = 5,3 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$ . Подвижность ионов:  $b_+ = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}/(\text{В} \cdot \text{с})$ ,  $b_- = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Между пластинами течет ток 2 мкА. Какое напряжение приложено к пластинам? [150 В]

4. Металлический шар радиусом  $a$  окружен концентрической тонкой металлической оболочкой радиусом  $b$ . Пространство между этими электродами заполнено однородной изотропной слабо проводящей средой с удельным сопротивлением  $\rho$ . Найдите сопротивление  $R$  межэлектродного промежутка. Рассмотреть случай  $b \rightarrow \infty$ . [ $R = \rho(b - a)/(4\pi ab)$ . При  $b \rightarrow \infty$  сопротивление  $R = \rho/(4\pi a)$ ]

#### Вариант 5

1. В ускорителе пучок заряженных частиц движется по круговой орбите радиусом 0,25 м со скоростью  $1,5 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ . Величина среднего тока, создаваемого пучком, равна 15 мкА. Определите заряд пучка. [1,57 пКл]

2. Найдите силу тока короткого замыкания аккумуляторной батареи, если при силе тока 5 А батарея отдает во внешнюю цепь мощность 9,5 Вт, а при силе тока 8 А - 14,4 Вт. [62 А]

3. Найдите плотность тока насыщения в газоразрядной трубке, расстояние между электродами которой 10 см, если под действием космического излучения в 1 см<sup>3</sup> трубки за 1 с возникает 10 пар одновалентных ионов. [ $2 \cdot 10^{-17} \text{ А/см}^2$ ]

4. Резистор с сопротивлением  $R$  и нелинейное сопротивление, вольтамперная характеристика которого имеет вид  $U = a\sqrt{I}$ , где  $a$  – постоянная, соединены последовательно и подключены к источнику напряжения  $U_0$ . Найдите ток в цепи.

$$I = \left( \frac{a}{2R} \right)^2 \left( \sqrt{1 + \frac{4RU_0}{a^2}} - 1 \right)^2$$

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Волькенштейн В.С.* Сборник задач по общему курсу физики. СПб.: Издательство Лань, 2009.
2. *Иродов И.Е.* Задачи по общей физике. СПб.: Издательство Лань, 2009.
3. *Иродов И.Е.* Сборник задач. СПб.: Издательство Лань, 2010.
4. *Рогачев Н.М.* Решение задач по курсу общей физики. СПб., М.: Издательство «Лань», 2008.
5. *Савельев И.В.* Сборник вопросов и задач по общей физике. СПб.: Издательство Лань, 2007.
6. *Фирганг Е.В.* Руководство к решению задач по курсу общей физики. СПб.: Издательство Лань, 2009.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	3
2. Общие рекомендации к решению задач.....	3
3. Учебные материалы к разделам электростатика, электродинамика.....	4
4. Рекомендации к решению задач.....	17
Задачи для самостоятельного решения.....	21
Примерные варианты контрольных работ.....	30
Библиографический список .....	33

## ФИЗИКА

### ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

*Методические указания к практическим занятиям  
для студентов бакалавриата направления 08.03.01*

Составитель *Е.С. Ломакина*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
общей и технической физики

Ответственный за выпуск *Е.С. Ломакина*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 02.11.2015. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 2,0. Усл.кр.-отт. 2,0. Уч.-изд.л. 1,6. Тираж 100 экз. Заказ 877. С 236.

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»  
РИЦ Национального минерально-сырьевого университета «Горный»  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2