МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

А.А. Куколева, С.Н. Спасибкина

ФИЗИКА

ЭЛЕКТРОСТАТИКА И ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Часть III

ПОСОБИЕ
по выполнению контрольных работ

для студентов I курса всех специальностей и направлений зочной формы обучения

Москва-2016

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

Кафедра физики
А.А. Куколева, С.Н. Спасибкина

ФИЗИКА

ЭЛЕКТРОСТАТИКА
И ПОСТОЯННЫЙ ТОК
Часть III

ПОСОБИЕ
по выполнению контрольных работ

для студентов I курса
всех специальностей и направлений
зочной формы обучения

Москва-2016

ББК 53
К 89

Рецензент канд. техн. наук, профессор С.М. Новиков

Куколева А.А., Спасибкина С.Н.

К 89 Физика. Электростатика и постоянный ток. Часть III: пособие по выполнению контрольных работ. – М.: МГТУ ГА, 2016. – 56 с.

Данное пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Физика» по учебному плану для студентов I курса всех специальностей и направлений заочной формы обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 27.09.2016 г. и методического совета 01.03.2016г.

Подписано в печать 14.11.2016 г.

Печать офсетная	Формат 60х84/16	2,96 уч.-изд. л.
3,25 усл.печ.л.	Заказ № 121	Тираж 50 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20
Редакционно-издательские услуги ООО «Имидж-студия Арина»
127051 Москва, М. Сухаревская пл., д. 2/4 стр.1

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение домашних контрольных заданий является необходимой практической основой при изучении курса физики. Оно способствует приобщению студентов к самостоятельной творческой работе, учит анализировать физические явления, отвлекаясь от случайных и несущественных деталей.

Предлагаемое издание является вторым в серии аналогичных изданий по всем разделам курса физики и содержит методические указания и типовые задания к решению задач по третьей части курса «Электростатика и постоянный ток». При составлении вариантов заданий не преследовалась цель наиболее полного охвата всех типов задач по той или иной теме. Распределение задач по вариантам обеспечивает студентам индивидуальные наборы наиболее типичных для каждой темы задач. Для удобства выполнения индивидуальных заданий пособие содержит краткие теоретические сведения и основные расчетные формулы. Формулы даются, как правило, без подробных пояснений: предполагается, что смысл входящих в них величин студенту, приступающему к решению задач, уже известен по учебным пособиям, ссылки на которые приведены ниже.

При оформлении контрольных работ студенту-заочнику необходимо руководствоваться следующим:

1. Контрольные работы выполняются черной или синей шариковой ручкой в обычной школьной тетради (12 страниц, в клетку), на обложке которой приводятся сведения по следующему образцу:

Контрольная работа по физике №2 Вариант №15 Студент заочного факультета МГТУ ГА **Никитин В.А.** **Шифр М – 037315** Адрес: г. Тюмень, ул. Молодежная, дом 12, кв. 64

2. Выбор варианта задания осуществляется в соответствии с присвоением студенту на период обучения номером шифра. Студент-заочник должен решить **задачи** того варианта, номер которого совпадает с последними **двумя** цифрами его **шифра**.

3. В связи с постоянным изменением учебных планов, вызванным реформой высшей школы, таблицы с номерами задач по вариантам для каждой специальности и направления подготовки выложены на сайте университета на

странице заочного факультета - активная вкладка «учебно-методическая литература по физике»:

http://www.mstuca.ru/about/structure/faculties/correspondence_department_pd/. Просим студентов быть внимательными! При возникновении вопросов следует обращаться по адресу электронной почты кафедры физики: *KF@mstuca.aero.*

4. Условия задач переписываются в тетрадь полностью, без сокращений. Для замечаний преподавателя на страницах тетради обязательно оставляются поля шириной 4-5 см.

5. Решение задач и используемые формулы должны сопровождаться пояснениями.

6. Решения задач рекомендуется сначала сделать в общем виде, а затем произвести численные расчеты. Для полученной расчетной формулы выполнить проверку размерности и записать ответ.

Задания, оформленные с нарушением этих требований или содержащие ошибки, возвращаются на доработку, которая производится в той же тетради.

Для самостоятельного изучения курса ниже приводится список литературы.

Желаем вам успехов!

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М: Высшая школа, 2014.

Дополнительная

1. Дмитриева В.Д., Прокофьев В.Л.. Основы физики: Учеб. Пособие для студентов вузов. – М. Высшая школа, 2008.

2. И.В.Савельев. Курс общей физики, том II. Электричество. Учебник. – М.: Наука, 2010.

3. http://fn.bmstu.ru/phys/bib/physbook/tom2/

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Тема 1. Электростатика

1.1. Электрические заряды. Закон Кулона

В природе существует *два типа электрических зарядов: положительные и отрицательные.* Электрический заряд **дискретен,** т. е. заряд любого тела составляет целое кратное от **элементарного электрического заряда** *e* (e=1,6·10^{-19} Кл). **Электрон** (m_e=9,11·10^{-31} кг) и **протон** (m_p= 1,67·10^{-27} кг) являются соответственно носителями элементарных отрицательного и положительного зарядов.

Силы электрического взаимодействия проявляются как отталкивание одноименно заряженных или, наоборот, притяжение частиц заряда разного знака (рис. 1).

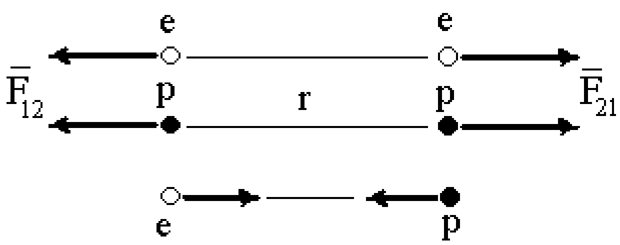

Рис. 1

Величина электрической силы, действующей между двумя точечными заряженными частицами, определяется **законом Кулона:** сила взаимодействия F между двумя неподвижными точечными зарядами Q и q, находящимися *в вакууме,* пропорциональна величине этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними:

$$F_{12} = F_{21} = k_0 \frac{Qq}{r^2}, \qquad (1)$$

где k_0 — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц. В системе СИ $k_0 = 1/4\pi\varepsilon_0$ = $9 \cdot 10^9$ Н · м^2/Кл^2, ε_0 = 8,85·10^{-12} Ф·м$^{-1}$ – электрическая постоянная; q_1, q_2 – электрические заряды частиц; r – расстояние между частицами.

1.2. Электрическое поле и способы его описания. Напряженность электрического поля

Электрически заряженные частицы создают вокруг себя электрическое поле, которое проявляется в том, что на помещенный в него пробный электрический заряд q действует сила $\vec{F}$. В качестве определения поля служит векторная величина **напряженности электрического поля**

$$\vec{E} = \vec{F} / q, \tag{2}$$

Сила взаимодействия между двумя точечными зарядами (рис. 1) определяется **законом Кулона** (1). Один из этих зарядов, например Q, можно считать источником поля с напряженностью $\vec{E}$, а другой q – пробным зарядом.

Тогда напряженность электрического поля точечного заряда Q в точке $\vec{r}$ с учетом (1) определяется по формуле:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = k_0 \frac{Q}{r^2} \vec{e}_r \, , \tag{3}$$

где $\vec{e}_r = \vec{r} / r$ – единичный вектор, направленный от заряда Q к заряду q. Электрическое поле можно наглядно представить с помощью силовых линий напряженности поля. На рис. 2 а, б приведены картины линий напряженности поля $\vec{E}$ в окрестности положительного (+Q) и отрицательного (–Q) точечных зарядов

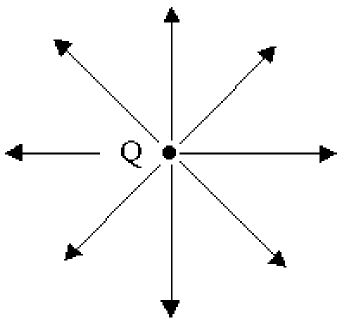

Рис. 2а. Поле заряда +Q

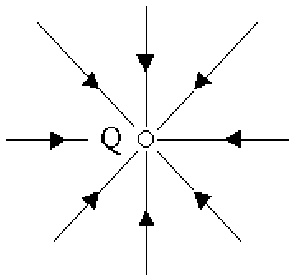

Рис. 2б. Поле заряда –Q

Напряженность поля, создаваемого электрически заряженным **шаром** радиуса R, на расстояниях от центра шара $r \geq R$, также определяется по формуле (3).

1.3. Принцип суперпозиции полей

Для электрических сил справедлив **принцип суперпозиции**, согласно которому результирующая сила, действующая на точечный заряд q, равна векторной сумме сил, действующих на этот заряд со стороны других зарядов:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \ \dots \ + \vec{F}_4 = \sum_{i=1}^{N} \vec{F}_i \ . \tag{4}$$

Соответственно, напряженность $\vec{E}$ поля, созданного системой N точечных зарядов в некоторой точке также можно найти по **принципу суперпозиции**:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \ldots + \vec{E}_N = \sum_{i=1}^{N} \vec{E}_i\,, \tag{5}$$

где $\vec{E}_i$ - напряженность поля, создаваемая зарядом с номером i в рассматриваемой точке.

На рис. 3а приведены картины силовых линий напряженности поля для системы двух разноименных точечных зарядов (диполь), а на рис. 3б – для двух одноименных зарядов.

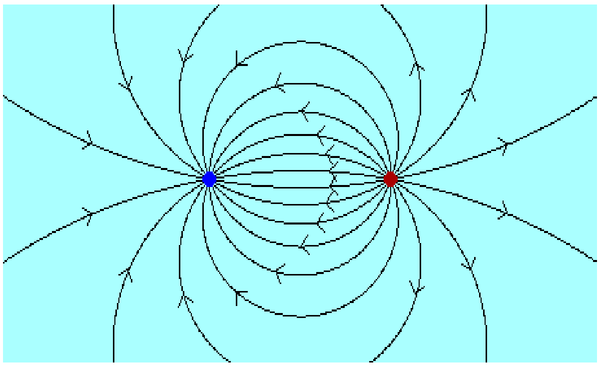

Рис. 3а

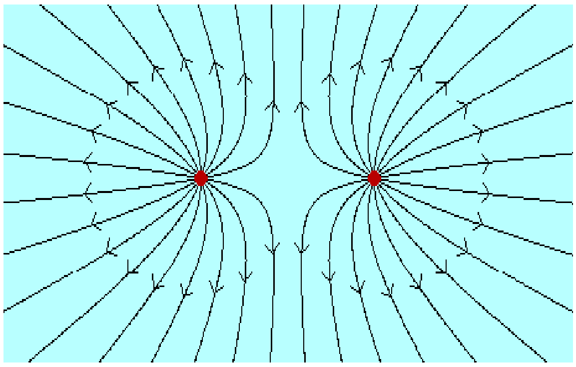

Рис. 3б

При расчете электрического поля $\vec{E}$, создаваемого **протяженным заряженным телом**, необходимо записать формулу (3) для поля точечного заряда dQ в дифференциальной форме

$$d\vec{E} = k_0 \frac{dQ}{r^2}\vec{e}_r\,, \tag{6}$$

где заряд dQ малого элемента данного тела можно выразить через объемную ρ, поверхностную σ, либо линейную τ плотности зарядов: $dQ = \rho \cdot dV$, $dQ = \sigma \cdot dS$, $dQ = \tau \cdot dl$. Тогда вычисление результирующего поля, создаваемого заряженным телом, сводится к интегрированию вкладов от каждого малого элемента этого тела:

например, по объему V для объемно заряженных тел:

$$\vec{E} = \int_V d\vec{E} = k_0 \int_V \frac{\rho dV}{r^2}\vec{e}_r\,; \tag{7}$$

по поверхности S для поверхностно заряженных тел:

$$\vec{E} = \int_S d\vec{E} = k_0 \int_S \frac{\sigma dS}{r^2}\vec{e}_r\,; \tag{8}$$

по линейному участку L для линейно заряженных тел:

$$\vec{E} = \int_L d\vec{E} = k_0 \int_L \frac{\tau dl}{r^2} \vec{e}_r \ ; \qquad (9)$$

Указанные интегралы (8) – (10) легко вычисляются в случае простой геометрии заряженных тел.

1.4. Вычисление полей с помощью теоремы Гаусса

В некоторых случаях при наличии определенной симметрии в пространственном расположении зарядов расчет напряженности электрического поля может быть существенно упрощен, если применять **теорему Гаусса:**

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_i Q_i \qquad (10)$$

Интеграл в левой части равенства (11) называется **потоком вектора напряженности** Ф электрического поля $\vec{E}$ через некоторую замкнутую поверхность *S* (ее часто называют «гауссовой»). Поток через элементарную поверхность $d\vec{S}$ рассчитывается как скалярное произведение вектора напряженности $\vec{E}$ на элемент площади поверхности $d\Phi = \vec{E} \cdot d\vec{S}$. Элемент $d\vec{S}$ направлен по внешней нормали к поверхности. (Напомним, что скалярное произведение рассчитывается как произведение модулей перемножаемых векторов на косинус угла α между ними: $\vec{E} \cdot d\vec{S} = E \cdot dS \cdot \cos\alpha$.)

По теореме Гаусса **поток вектора напряженности** Ф через замкнутую поверхность *S* определяется алгебраической суммой зарядов $\sum_i Q_i$, заключенных внутри выбранной поверхности *S*. Сама поверхность *S* выбирается сообразно симметрии задачи.

При непрерывном распределении зарядов суммирование электрических зарядов в правой части уравнения (10) заменяется интегрированием плотности электрического заряда ρ по объему *V*, охватываемому замкнутой поверхностью *S:*

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} \oint_V \rho dV \qquad (11)$$

Основные затруднения при использовании теоремы Гаусса связаны с выбором замкнутой поверхности *S*. Чтобы их избежать, необходимо придерживаться следующих рекомендаций:

1. Из соображений симметрии определяется направление вектора $\vec{E}$ в пространстве, окружающем заряженное тело.

2. Поверхность *S* выбирают симметричной расположению зарядов, а ее элементы $d\vec{S}$ должны быть либо перпендикулярны (α = 90^0), либо параллельны к вектору напряженности поля $\vec{E}$ (α = 0^0).

3. Точка, в которой определяется вектор напряженности поля $\vec{E}$, должна принадлежать замкнутой поверхности интегрирования S.

В этом случае поток вектора напряженности поля $\vec{E}$ через замкнутую поверхность S можно представить как сумму поверхностных интегралов через отдельные части этой поверхности (подробнее см. задачу 2 из раздела «Примеры решения задач»).

1.5. Электрический потенциал. Работа электрических сил

Электростатическое поле $\vec{E}$ **потенциально**, поэтому работа электрического поля при перемещении точечного заряда в поле равна изменению потенциальной энергии $W_п$ этого заряда:

$$A_{ab} = \int_a^b \vec{F} d\vec{r} = \int_a^b q\vec{E}\, d\vec{r} = W_{п1} - W_{п2} = -\Delta W_п \tag{12}$$

Потенциальная энергия взаимодействия точечных зарядов q и Q равна:

$$W = k_0 \frac{Qq}{r} \ . \tag{13}$$

Потенциал – это скалярная энергетическая характеристика электростатического поля, равная отношению потенциальной энергии пробного точечного электрического заряда, помещенного в поле, к величине этого заряда:

$$\varphi = \frac{W_п}{q}. \tag{14}$$

С помощью потенциала $\varphi(\vec{r})$ можно найти величину потенциальной энергии $W_п$ любого заряда q, помещенного в рассматриваемую точку $\vec{r}$ электрического поля:

$$W_п = q\,\varphi(\vec{r})\,. \tag{15}$$

Отсюда формулу (13) можно представить:

$$A_{ab} = W_{п1} - W_{п2} = -q\Delta\varphi. \tag{16}$$

Работа сил электростатического поля в зависимости от знака заряда q и разности потенциалов точек $\boldsymbol{a}$ и $\boldsymbol{b}$ может быть как положительной ($A_{ab} > 0$), так и отрицательной ($A_{ab} < 0$). Если $A_{ab} > 0$, то работу по переносу заряда q производят силы электрического поля. Если же $A_{ab} < 0$, то перемещение заряда q осуществляется за счет работы сторонних сил, действующих против сил электрического поля.

Полная электростатическая энергия взаимодействия системы точечных зарядов в вакууме (рис. 4а) является суммой потенциальных энергий взаимодействия всех пар зарядов этой системы:

$$W=\frac{1}{2}\sum_{i}Q_i\,\varphi_i=\frac{1}{2}\sum_{i}Q_i\sum_{j\neq i}k_o\frac{Q_j}{r_{i,j}}=\frac{1}{2}\sum_{i\neq j}k_o\frac{Q_i\,Q_j}{r_{i,j}}\quad, \qquad (17)$$

где φ_i – потенциал, создаваемый в точке расположения заряда Q_i всеми остальными зарядами системы; $r_{i,j}$ – расстояние между зарядами Q_i и Q_j. Множитель ½ учитывает, что при суммировании по всем i и j энергия взаимодействия каждой пары присутствует в сумме дважды (W_{ij} и W_{ji}).

Если точечный заряд Q (источник поля $\vec{E}(\vec{r})$) находится в начале координат, то в точке с радиус-вектором $\vec{r}$ величина **потенциала** $\varphi(\vec{r})$, **созданного точечным зарядом *Q*,** определяется по формуле:

$$\varphi=k_0\frac{Q}{r}\quad. \qquad (18)$$

Потенциал шара радиуса *R*, несущего заряд Q, также определяется по формуле (18), где $r \geq R$ – расстояние от центра шара.

Потенциал системы точечных зарядов определяется согласно **принципу суперпозиции:**

$$\varphi=\varphi_1+\varphi_2+\varphi_3+..+\varphi_N=\sum_{i=1}^{N}\varphi_i\quad, \qquad (10)$$

В случае непрерывного расположения заряда, необходимо применять интегрирование потенциалов элементарных зарядов dQ от элементов объема dV, площади dS либо длины dl протяженных заряженных тел:

$$\varphi=k_0\int_V\frac{\rho dV}{r} \qquad (20)$$

– для тела, заряженного по объему V;

$$\varphi=k_0\int_S\frac{\sigma dS}{r} \qquad (21)$$

– для тела, заряженного по поверхности S с плотностью σ;

$$\varphi=k_0\int_L\frac{\tau dl}{r} \qquad (22)$$

– для тонкой заряженной нити L с линейной плотностью заряда τ.

1.6. Объемная плотность энергии электростатического поля

Плотность энергии электрического поля $\vec{E}(\vec{r})$, созданного в вакууме произвольным источником, определяется формулой:

$$w(\vec{r}) = \frac{\varepsilon_o E^2(\vec{r})}{2}. \tag{23}$$

Зная плотность энергии поля w в каждой точке, можно найти **энергию поля**, заключенного в любом объеме пространства V. Для этого необходимо вычислить объемный интеграл

$$W = \int_V w\, dV = \int_V \frac{\varepsilon_o E^2}{2} dV. \tag{24}$$

1.7. Связь напряженности и потенциала электростатического поля

Можно показать, что векторная характеристика электрического поля напряженность $\vec{E}$ связана со скалярной характеристикой $\varphi(\vec{r})$ соотношением:

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\nabla\varphi(\vec{r}), \tag{25}$$

где $\nabla = \vec{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \vec{e}_y \frac{\partial}{\partial y} + \vec{e}_z \frac{\partial}{\partial z}$ – так называемый, дифференциальный оператор **«набла»**, определяющий производную по направлению в пространстве. Вектор $\nabla\varphi(\vec{r})$ указывает направление роста потенциала в пространстве (градиент φ). Вектор $\vec{E}$ согласно (22) направлен противоположно – в сторону убывания потенциала. Силовые линии вектора $\vec{E}$ всегда перпендикулярны **эквипотенциальным поверхностям** (где φ = *const*).

По известной функциональной зависимости поля $\vec{E}(\vec{r})$ можно определить разность потенциалов $(\varphi_b - \varphi_a)$ между любыми двумя точками ***b*** и ***a*** :

$$\varphi_b - \varphi_a = -\int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{r}. \tag{26}$$

1.8. Электрический диполь

Поле системы N электрических зарядов, суммарный заряд которых равен нулю ($\sum_i Q_i = 0$), на больших расстояниях от нее определяется **дипольным электрическим моментом** системы:

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^{N} Q_i \cdot \vec{r}_i , \tag{27}$$

где $\vec{r}_i$ – радиус-вектор заряда Q_i и суммирование ведется по всем N зарядам, входящим в состав системы (рис. 4а). При этом величина дипольного электрического момента **не зависит от выбора точки отсчета системы координат.** В простейшем случае система, состоящая из двух разноименных электрических зарядов равных по величине, называется **диполем**. При этом **дипольный момент** можно рассчитать по формуле:

$$\vec{p} = Q_+\vec{r}_+ + Q_-\vec{r}_- = |Q| \cdot (\vec{r}_+ - \vec{r}_-) = |Q| \cdot \vec{l}\,,$$

где вектор $\vec{l}$ – плечо диполя, направлен от отрицательного заряда к положительному, а направление дипольного момента $\vec{p}$ совпадает с направлением $\vec{l}$ (рис.4б).

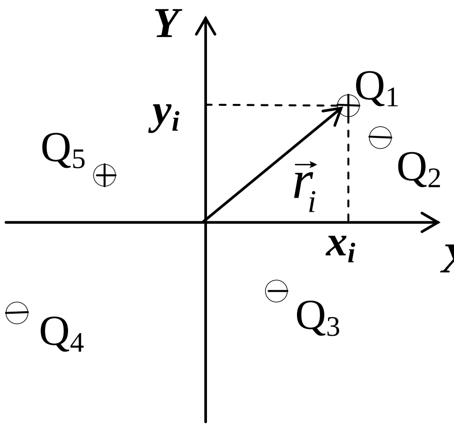

Рис. 4а

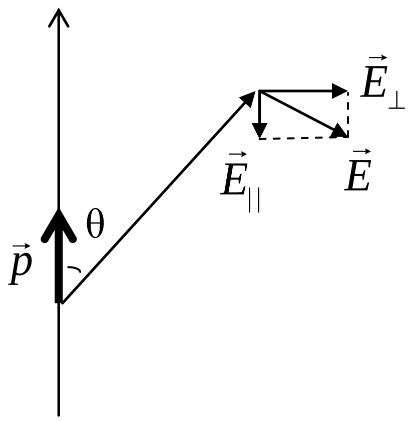

Рис. 4б

Потенциал и напряженность электрического поля диполя

Потенциал φ электрического поля системы с дипольным моментом $\vec{p}$ на достаточно больших расстояниях r от него (рис. 4б) описывается формулой

$$\varphi = k\frac{p}{r^2}\cos\theta, \tag{28}$$

где θ – угол между радиус-вектором $\vec{r}$ и вектором дипольного момента $\vec{p}$.

Модуль вектора напряженности электрического поля диполя $\vec{E}$ в этой точке равен

$$E = k\frac{p}{r^3}\sqrt{1+3\cos^2\theta}\,. \tag{29}$$

Картина линий напряженности электрического поля диполя приведена на рис.3а.

Электрический диполь во внешнем электрическом поле

На диполь, помещенный в однородное электрическое поле, действует механический момент сил $\vec{M}$:

$$\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E}, \tag{30}$$

модуль которого равен $M = pE \cdot \sin\alpha$, где α – угол между направлениями векторов $\vec{p}$ и $\vec{E}$. Момент сил стремится повернуть диполь так, чтобы его электрический момент $\vec{p}$ установился по направлению поля $\vec{E}$. При этом совершается работа, равная изменению потенциальной энергии диполя в электрическом поле. Потенциальная энергия диполя Π в поле $\vec{E}$ определяется по формуле

$$\Pi = -\vec{p} \cdot \vec{E} = pE \cdot \cos\alpha \tag{31}$$

Согласно формуле (30) минимум потенциальной энергии диполя в электрическом поле достигается, когда вектор $\vec{p}$ параллелен вектору $\vec{E}$.

1.9. Электроемкость. Конденсаторы

Рассмотрим уединенный проводник, то есть удаленный от других проводников, тел и зарядов. Электрический заряд, помещенный на проводник, распределяется по поверхности проводника единственно возможным способом. При этом поверхность проводника является эквипотенциальной, а потенциал прямо пропорционален заряду проводника φ ~ Q. Из опыта следует, что проводники различного размера и формы, обладающие одинаковым зарядом, принимают различные потенциалы

Для каждого проводника это соотношение можно записать в виде точного равенства

$$Q = C\varphi. \tag{32}$$

Коэффициент пропорциональности С называется **электроемкостью** (или просто емкостью) уединенного проводника и зависит от геометрической формы, размеров проводника и окружающего его вещества.

Единицей электроемкости C является **Фарада**:

$$C = \frac{Q}{\varphi}, \quad \left[\frac{Кл}{B}\right] = [\Phi] \text{ (Фарада).}$$

Из определения электроемкости следует, что она характеризует способность уединенного проводника к накоплению электрического заряда.

Потенциал уединенного шара радиуса *R*, находящегося в однородной среде с диэлектрической проницаемостью *ε*, равен

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{\varepsilon R}.$$

Используя формулу (32), получим электроемкость шара

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R. \tag{33}$$

Электроемкость уединенных проводников привычных для нас размеров невелика. Поэтому для накопления значительного количества электрического заряда при малых размерах используются устройства, называемые **конденсаторами.** Они изготавливаются в виде двух проводников (обкладок), поверхности которых находятся близко друг к другу. Основными типами конденсаторов являются **плоские** – две близкорасположенные параллельные пластины (рис. 5а), **цилиндрические** – два коаксиальных цилиндра (рис. 5б), и **сферические** – две концентрические сферы (рис. 5с).

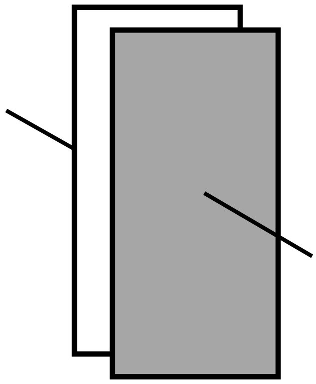

Рис. 5а

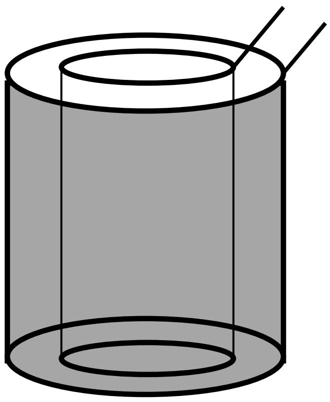

Рис. 5б

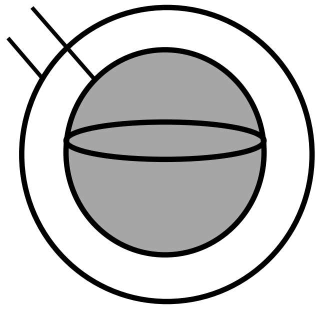

Рис.5с

Обкладкам конденсатора сообщают одинаковые по величине, но противоположные по знаку электрические заряды $+Q$ и $–Q$. В результате возникает электрическое поле $\vec{E}$, заключенное в основном в зазоре между обкладками конденсатора. Возникающая между обкладками конденсатора разность потенциалов электрического поля пропорциональна сообщенному заряду $\Delta\varphi \sim Q$. По аналогии с формулой (32) для конденсатора можно записать

$$Q = C\Delta\varphi, \tag{33}$$

где коэффициент $C = Q/\Delta\varphi$ зависит от размеров, геометрической формы и наличия диэлектрика между обкладками конденсатора и называется **электроемкостью конденсатора**. Расчет величины электроемкости основан на том, что определяется разность потенциалов между обкладками конденсатора в предположении, что они имеют заряды $+Q$ и $–Q$. После подстановки полученного выражения для разности потенциалов в формулу (33) величина Q сокращается и получается формула для расчета электроемкости конденсатора через его геометрические параметры. Например, для плоского конденсатора с воздушным зазором ($\varepsilon = 1$) между пластинами (рис. 5а) имеем:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_o S}{d}, \tag{34}$$

где S – площадь пластин, d – расстояние между пластинами (ширина зазора).

При заполнении зазора между пластинами конденсатора веществом с диэлектрической проницаемостью ε электроемкость конденсатора возрастает в ε раз:

$$C = \varepsilon C_0 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}. \qquad (35)$$

Тема 2. Постоянный ток

2.1. Элементарная теория электропроводности

В классической теории электропроводности предполагается, что электроны проводимости в металлах ведут себя подобно молекулам идеального газа, совершая хаотическое движение и время от времени испытывая соударения с ионами решетки. В отсутствие электрического поля в промежутках между соударениями они движутся совершенно свободно со средней скоростью хаотического теплового движения $< u_{\text{т}} >$, пробегая в среднем некоторый путь $< \lambda >$. При включении электрического поля $\vec{E}$ у электронов появляется ускорение

$$\vec{a} = -\frac{e\vec{E}}{m},$$

и за среднее время $< \tau >$ пробега этого пути электроны приобретают дополнительную скорость $<V_{max}> = a < \tau >$. Принимая, что в результате ударов электроны останавливаются, можно представить их результирующее движение как направленный дрейф со средней скоростью $<V_{\text{д}}> = 0{,}5<V_{max}>$. Учитывая, что

$$<V_{\text{д}}> = 0{,}5<V_{max}> \text{ и } < \tau > = \frac{< \lambda >}{< u_T >},$$

можно вычислить среднюю скорость направленного движения и записать в виде:

$$<V_{\text{д}}> = -\frac{eE < \lambda >}{2m < u_T >}. \qquad (36)$$

Плотность электрического тока, возникающего при этом, определяется выражением:

$$j = en<V_{\text{д}}>, \qquad (37)$$

где n – концентрация электронов проводимости.

Сравнивая формулы (36) и (37), можно записать:

$$\vec{j} = \frac{e^2 n < \lambda >}{2m < V_T >}\vec{E}, \text{ или } \vec{j} = \sigma\vec{E} \qquad (38)$$

где $\sigma = \dfrac{e^2 n < \lambda >}{2m < V_T >}$ – **удельная проводимость** материала проводника, связанная с **удельным сопротивлением** ρ соотношением $\sigma = \dfrac{1}{\rho}$.

2.2. Закон Ома

Формула (38) называется **законом Ома** в дифференциальной форме. Из нее можно получить хорошо известный закон Ома в интегральной форме для однородного участка проводника:

$$U = IR, \tag{40}$$

где U – разность потенциалов на концах проводника, $I = jS$ – сила тока в проводнике (S – площадь поперечного сечения проводника), R – электросопротивление проводника. В самом деле, разность потенциалов U на концах проводника равна работе электрических сил A по переносу единичного электрического заряда:

$$U = \frac{A}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 = El,$$

где l – длина проводника. Подставляя в последнюю формулу величину напряженности поля $E = j/\sigma$ (см. формулу (38)), получим:

$$U = \frac{jl}{\sigma} = \frac{jSl}{\sigma S} = I\,\frac{l}{\sigma S} = I\rho\frac{l}{S} = IR.$$

Величина электрического сопротивления проводника R зависит от материала проводника, его длины l и площади поперечного сечения S:

$$R = \frac{l}{\sigma S} = \rho\frac{l}{S}\ . \tag{41}$$

2.3. Тепловое действие тока. Закон Джоуля-Ленца

При столкновении с ионами кристаллической решетки металла электроны передают ей дополнительно приобретенную энергию, что проявляется в нагревании проводника. В соответствии с **законом Джоуля-Ленца** в локальной (дифференциальной) форме выделяющаяся объемная плотность тепловой мощности w определяется по формуле:

$$w = \sigma E^2 = \rho j^2. \tag{42}$$

Из нее можно получить известную формулу тепловой мощности P, выделяемой электрическим током в проводнике

$$P = I^2 R\ , \tag{43}$$

Соотношение (43) называется **законом Джоуля -Ленца** в интегральной форме. С учетом соотношения (40) (закон Ома), формулу (43) можно записать в виде:

$$P = I^2 R = UI = \frac{U^2}{R} \quad . \tag{44}$$

2.4. ЭДС источника тока

Если в цепи на носители тока действуют только силы электростатического поля, то происходит перемещение заряда от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом. Это приведет к выравниванию потенциалов во всех точках цепи и прекращению электрического тока. Поэтому для существования постоянного тока необходимо наличие в цепи устройства, способного создавать и поддерживать разность потенциалов за счет работы сил неэлектрического происхождения. Такие устройства называются **источниками тока**. Силы неэлектрического происхождения, действующие на заряды со стороны источников тока, называются **сторонними**.

Физическая величина, определяемая работой, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда, называется **электродвижущей силой** (эдс) $\mathcal{E}$:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{стор}}{q} \tag{45}$$

Эта работа производится за счет энергии, затрачиваемой внутри самого источника тока (аккумулятор, гальваническая батарея, генератор и т.п.) за счет сторонних сил, возникающих в результате химических реакций или за счет сторонних сил механического типа, поэтому величину $\mathcal{E}$ можно также называть электродвижущей силой источника тока, включенного в цепь.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Четыре точечных заряда размещены в вершинах квадрата со стороной b = 0,1 м (рис. 6). Заряды в вершинах 1 и 2 – положительные, а в вершинах 3 и 4 – отрицательные. Величины всех зарядов одинаковые и равны Q = 10 нКл. Определить напряженность и потенциал электрического поля в центре квадрата.

Дано: b = 0,1 м.; Q = 10 нКл = 10^{-8} Кл.

Найти: $\vec{E}$ = ? φ = ?

Решение:

Величина напряженности электрического поля каждого из рассматриваемых зарядов в центре квадрата одинакова и равна

$$E_i = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{Q_i}{r^2},$$

где $r = b\sqrt{2}/2$ – половина диагонали квадрата.

Направления векторов $\vec{E}_i$ указаны на рис. 6. Результирующий вектор $\vec{E}$ определяется как векторная сумма этих четырех векторов. В данном случае он направлен параллельно двум сторонам квадрата, как показано на рисунке. Модуль результирующего вектора E в центре квадрата можно найти по формуле:

$$E = 4(E_i \cos 45^0) = 2\sqrt{2}\,E_{\text{i}}.$$

$$E = 2\sqrt{2}\cdot k_o \frac{Q}{r^2} = 4\sqrt{2}\cdot k_o \frac{Q}{b^2}.$$

Выполним расчет: $E = 4\sqrt{2}\cdot 9\cdot 10^9 \cdot \dfrac{10^{-8}}{0{,}1^2} = 5{,}1\cdot 10^4 \;\; В/м.$

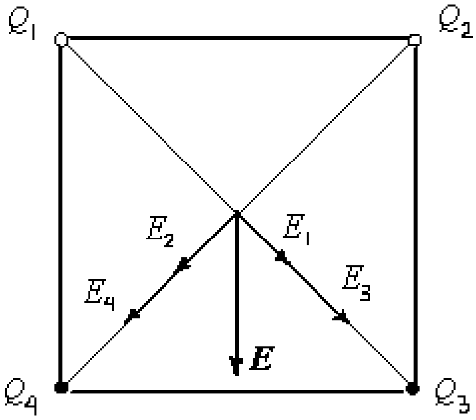

Рис. 6

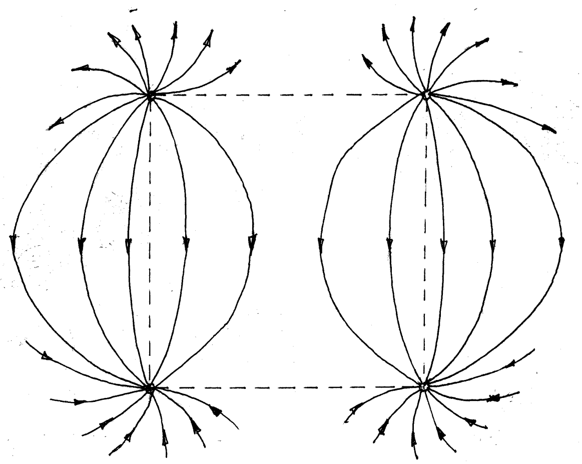

Рис. 7

Потенциалы полей зарядов суммируются по принципу суперпозиции как скалярные величины

$$\varphi = k_o \frac{Q_1}{r} + k_o \frac{Q_2}{r} + k_o \frac{Q_3}{r} + k_o \frac{Q_4}{r} \;,$$

или с учетом знака

$$\varphi = k_o \frac{Q}{r}\cdot(1+1-1-1) = 0.$$

В данной задаче представляет интерес дать качественное изображение линий напряженности электрического поля. Для рассматриваемой системы зарядов приближенная картина линий напряженности электрического поля приведена на рис. 7.

Ответ: Напряженность и потенциал электрического поля в центре квадрата соответственно равны E = 5,1·10^4 В/м, φ = 0 В.

Задача 2. Бесконечный пустотелый цилиндр радиуса R = 10 см имеет на своей поверхности равномерно распределенный заряд. На единицу длины цилиндра приходится τ = 1 нКл/м электрического заряда. Построить график изменения напряженности электрического поля с расстоянием от оси $E = E(r)$ и определить разность потенциалов между осью цилиндра и точкой А, находящейся на расстоянии d = 20 см от оси.

Дано: R = 10 см = 0,1 м; τ = 1 нКл/м = 10^{-9} Кл/м, d = 20 см.

Найти: $\vec{E}$ = ? $\Delta\varphi$ = ?

Решение:

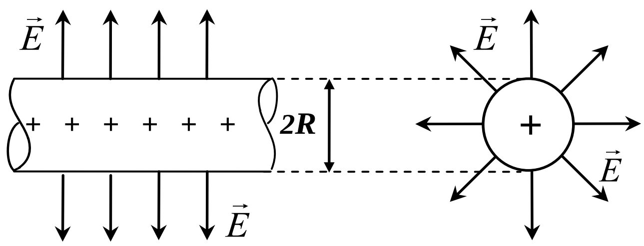

Рис. 8

Из соображений симметрии, очевидно, что вектор напряженности электрического поля заряженного цилиндра может быть направлен только радиально (рис. 8). Заметим, что напряженность поля $E(r)$ внутри и снаружи цилиндра может иметь различный закон изменения с расстоянием r от оси цилиндра. Поэтому исследуем отдельно область 1– снаружи цилиндра и область 2 – внутри.

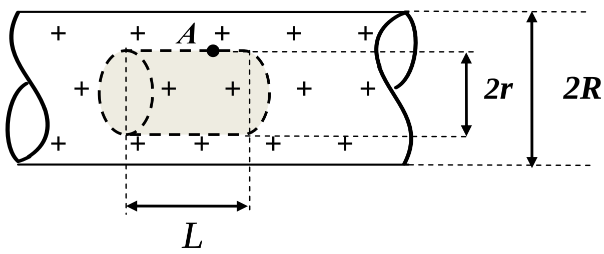

Рис. 9 а

Определим напряженность в *произвольной* точке $\boldsymbol{A}$, находящейся *внутри* цилиндра на расстоянии от его оси $r < R$ (рис. 9а). Выберем замкнутую «гауссову» поверхность в виде цилиндра радиусом $r < R$, ось которого совпадает с осью заданного цилиндра (коаксиальные цилиндры, а точка $\boldsymbol{A}$ лежит на его поверхности.

Длина (высота) «гауссова» цилиндра – произвольная величина L. Цилиндр имеет боковую поверхность и два основания. Рассмотрим поток вектора напряженности через этот цилиндр.

Внутри выбранной поверхности $S(r < R)$ зарядов нет. Поэтому правая часть уравнения Гаусса (11) равна нулю:

$$\oint_S \vec{E}d\vec{S} = 0$$

Интеграл в левой части теоремы Гаусса по замкнутой поверхности S (поток вектора напряженности) можно представить в виде суммы интегралов по основаниям и боковой поверхности:

$$\int\limits_{S_{осн1}} \vec{E}d\vec{S} + \int\limits_{S_{осн2}} \vec{E}d\vec{S} + \int\limits_{S_{бок}} \vec{E}d\vec{S} = 0\,.$$

Напомним, что элемент площади $d\vec{S}$ поверхности направлен в каждой точке этой поверхности по внешней нормали (а значит, сонаправлен $\vec{E}$ в каждой точке боковой поверхности цилиндра, и перпендикулярен на основаниях). Напомним также, что скалярное произведение двух векторов находят как произведение модулей перемножаемых векторов на косинус угла между ними. Таким образом, скалярные произведения $\vec{E}d\vec{S}$ в первых двух интегралах (потоки через основания) равны нулю ($\cos 90^{o} = 0$).

Последний интеграл в выражении (поток через боковую поверхность): $\vec{E}d\vec{S} = E\,dS \cdot \cos 0^{o} = E\,dS$. Исходя из симметрии системы, напряженность поля в точках, принадлежащих боковой поверхности «гауссова» цилиндра, должна быть одинаковой. Тогда последнее равенство примет вид:

$$E\int\limits_{S_{бок}} dS = 0\,,$$

что может иметь место только при выполнении условия $E = 0$. Таким образом, в любой точке внутри заряженного по поверхности цилиндра напряженность электрического поля равна нулю.

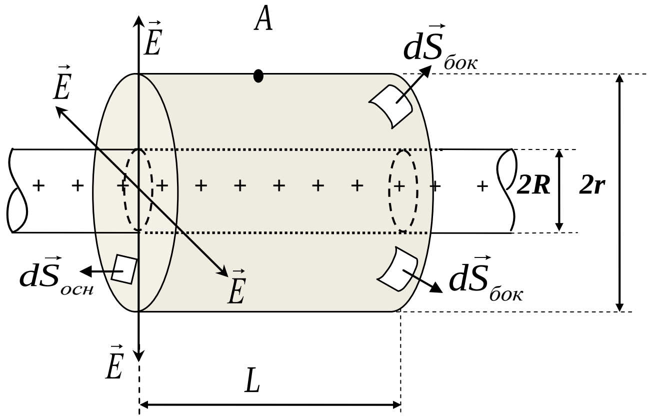

Рис. 9 б

2. Для определения напряженности в произвольной точке снаружи цилиндра поступим аналогично. Выберем «гауссову» поверхность в виде цилиндра высотой L и радиусом $r > R$ (рис. 9б), проходящей через точку A, в которой необходимо определить напряженность E. На рисунке показано также направление элементов площади на основании и боковой поверхности гауссова цилиндра.

Теорема Гаусса (11) для этой поверхности запишется в виде:

$$\oint\limits_{S} \vec{E}d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\tau\,L\,.$$

Поскольку гауссовый цилиндр «вырезает» из заданного по условию цилиндра заряд $Q = \tau L$, (именно такой заряд находится внутри выбранного гауссова), то правая часть теоремы Гаусса в нашем случае $Q/\varepsilon_0 = \tau \cdot L/\varepsilon_0$.

Интеграл в левой части этого равенства по аналогии с предыдущим может быть представлен в виде суммы таких же трех интегралов. Два из них – по основаниям цилиндра (они равны нулю), и один – по его боковой поверхности (он отличен от нуля):

$$\oint_S \vec{E}d\vec{S} = \int_{S_{бок}} E\,dS = E\int_{S_{бок}} dS = E\cdot 2\pi r L$$

Интеграл в предпоследнем выражении – это площадь боковой поверхности цилиндра $S_{бок.} = 2\pi r L$. Тогда теорема Гаусса (11) принимает вид

$$E\,2\pi r\,L = \frac{1}{\varepsilon_0}\tau L\,.$$

Отсюда следует выражение для напряженности поля в наружной области заряженного цилиндра:

$$E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 r}\,,\ \text{при}\ r > R.$$

График зависимости модуля напряженности электрического поля E от расстояния r до оси цилиндра приведен на рис. 10. Максимальное значение напряженность поля E принимает при $r = R$:

$$E_{\max} = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 R}\,.$$

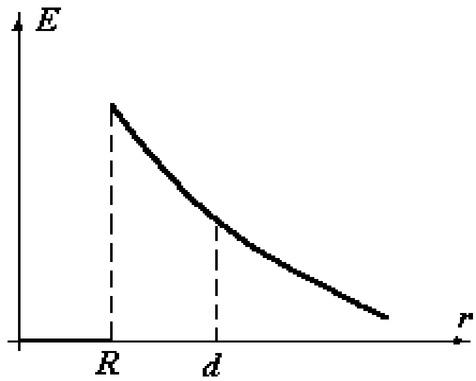

Рис. 10

Разность потенциалов между осью цилиндра и заданной точкой ***A*** равна работе по переносу единичного точечного заряда от оси цилиндра в точку ***A*** :

$$\Delta\varphi = \int_0^d E(r)dr = \int_0^R E(r)dr + \int_R^d E(r)dr = \int_R^d \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 r}dr\,.$$

Производя вычисление интеграла, получаем:

$$\Delta\varphi = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{d}{R} = 2k_0\ln\frac{d}{R},\left(\frac{1}{2\pi\varepsilon_0} = 2k_0\right)$$

Произведем расчет:

$$\Delta\varphi = 2k_o\tau\ln\frac{d}{R} = 2\cdot 9\cdot 10^9\cdot 10^{-9}\cdot\ln 2 = 12{,}6\ B.$$

Проверка размерности:

$$\left[E\right] = \left[\frac{k_o\tau}{r}\right] = \frac{Н\cdot м^2\cdot Кл}{Кл^2\cdot м\cdot м} = \frac{Н}{Кл} = \frac{Н\cdot м}{Кл\cdot м} = \frac{Дж}{Кл\cdot м} = \frac{В}{м};$$

$$\left[\Delta\varphi\right] = \left[k_o\tau\right] = \frac{Н\cdot м^2\cdot Кл}{Кл^2\cdot м} = \frac{Н\cdot м}{Кл} = \frac{Дж}{Кл} = В.$$

Ответ: График изменения напряженности электрического поля с расстоянием от оси цилиндра $E = E(r)$ показан на рис. 10. Разность потенциалов между осью цилиндра и точкой *A,* находящейся на расстоянии d = 20 см от оси равна $\Delta\varphi$ = 12,6 В.

Задача 3. Электрическое поле создано металлическим шаром радиусом R = 0,1 м, потенциал которого 90 В. Каков заряд шара? Определить напряжённость и потенциал в точке, удалённой на расстояние r = 0,2 м от центра шара. Какая сила действует на заряд q_2 = 0,1 нКл в этой точке? Как изменяется при этом его потенциальная энергия, и какова работа электростатического поля?

Дано: R = 0,1 м, φ = 90 В, r = 0,2 м, q_2 = 0,1 нКл

Найти: $E(r)$, $\varphi(r)$, F, A, ΔW, $A_{э/ст}$ - ?

Решение:

Формула для напряженности и потенциала заряженного шара радиусом R для $r \geq R$:

$$E = k_0\frac{Q}{r^2},\quad \varphi = k_0\frac{Q}{r}.$$

Отсюда

$$\varphi_0 = k_0\frac{Q}{R}, \Rightarrow Q = \frac{\varphi_0 R}{k_0} = \frac{90\cdot 0{,}1}{9\cdot 10^9} = 10^{-9}\ \text{Кл} = 1\ \text{нКл},$$

$$\varphi(r) = k_0\frac{Q}{r} = 9\cdot 10^9\frac{10^{-9}}{0{,}2} = 45\ \text{В},$$

$$E(r) = k_0\frac{Q}{r^2} \Rightarrow E(r) = \frac{\varphi}{r} = \frac{45}{0{,}2} = 225\ \text{В/м}.$$

Работа консервативных сил всегда приводит к уменьшению потенциальной энергии: $A_{э/ст} = -\Delta W = -q_2\cdot\Delta\varphi = -q_2\,(\varphi_\infty - \varphi(r)) = q_2\cdot\varphi(r) = 0{,}1\cdot 10^{-9}\cdot 45 = 4{,}5$ нДж.

Ответ: Q = 1 нКл; E = 225 В/м, φ = 45 В; работа по перемещению равна по модулю уменьшению потенциальной энергии заряда $A_{э/ст} = -\Delta W$ = 4,5 нДж.

Задача 4. Между двумя вертикальными пластинами, находящимися на расстоянии *d* = 1 см друг от друга, на нити висит шарик массой *m* = 0,1 г. После подачи на пластины разности потенциалов *U* = 1 кВ нить с шариком отклонилась на угол α = 10^0. Найти заряд шарика.

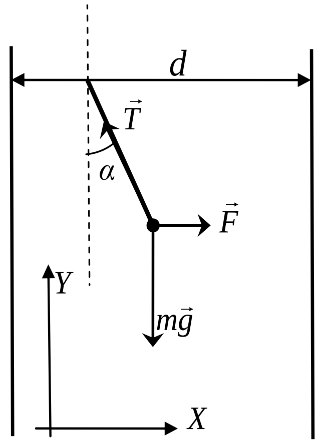

Рис. 11

Дано: *d* = 1 см; *m* = 0,1 г; *U* = 1 Кв,
α = 10^0
Найти: *q*- ?
Решение:

Со стороны электрического поля на шарик действует сила *F = qE*, которая и отклоняет его нить от вертикали (см. рис. 11).

Кроме того, на шарик действуют сила тяжести (*mg*) и натяжения нити (*T*). Поскольку система находится в равновесии, то все силы друг друга компенсируют:

$$\vec{F} + m\vec{g} + \vec{T} = 0.$$

В проекциях на оси координат это дает два выражения:

$$OX: \quad F - T\sin\alpha = 0$$

$$OY: \quad T\cos\alpha - mg = 0$$

Исключив из формул силу натяжения *T*, получим: $F = mg \cdot tg\alpha$

Сила *F = qE*, а напряженность поля плоского конденсатора *E = U/d*. После учета этих выражений получаем:

$$q = \frac{d\, mg \cdot tg\alpha}{U} = 1{,}73 \text{ нКл.}$$

Проверка размерности:

$$[q] = \left[\frac{d\, mg \cdot tg\alpha}{U}\right] = \frac{м \cdot кг \cdot м / c^2}{B} = \frac{м \cdot H}{Дж / Кл} = \frac{Дж}{Дж / Кл} = Кл.$$

Ответ: *q* = 1,73 нКл.

Задача 5.1. Определить энергию электростатического поля металлического шара, которому сообщен заряд *Q* = 100 нКл, если радиус шара *R* = 10 см.
Дано: *Q* = 100 нКл = 10^{-7} Кл; *R* = 10 см. = 0,1 м.
Найти: *W* = ?

Решение: В металлическом шаре электрический заряд равномерно распределяется по поверхности. С помощью теоремы Гаусса можно доказать, что электрическое поле внутри шара отсутствует, а снаружи изменяется по закону

$$E = k_o \frac{Q}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \frac{Q}{r^2} .$$

где r – расстояние от центра шара. Тогда энергию поля найдем интегрированием плотности энергии (25) по всей области существования поля, т.е. в пределах от R до бесконечности

$$W = \int_V w\, dV = \int_V \frac{\varepsilon_o E^2}{2} dV = \int_V \frac{\varepsilon_o Q^2}{32\pi^2 \varepsilon_o^2 r^4} dV .$$

Учитывая сферическую симметрию задачи, элемент объема dV можно представить в виде $dV = 4\pi r^2\, dr$. Тогда получаем:

$$W = \int_R^\infty \frac{Q^2}{32\pi^2 \varepsilon_o r^4} 4\pi r^2 dr = -\frac{Q^2}{8\pi\varepsilon_o} \left(\frac{1}{r}\right)\Bigg|_R^\infty = \frac{Q^2}{8\pi\varepsilon_o R} .$$

Произведем расчет:

$$W = \frac{\left(1 \cdot 10^{-7}\right)^2}{8 \cdot 3{,}14 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 0{,}1} = 4{,}5 \cdot 10^{-4}\ \text{Дж} = 450\ \text{мкДж} .$$

Проверка размерности:

$$\Delta W = \left[\frac{Q^2}{\varepsilon_o R}\right] = \frac{м}{Ф} \cdot \frac{Кл^2}{м} = \frac{В \cdot м \cdot Кл^2}{Кл \cdot м} = В \cdot Кл = Дж .$$

Ответ: Энергия электростатического поля шара $W = 450$ мкДж.

Задача 5.2. Электрон начинает двигаться в однородном электрическом поле из точки, потенциал которой $\varphi_1 = 8{,}6$ В, и за время $t = 0{,}1$ мкс пролетает расстояние $S = 10$ см. Определить напряженность электрического поля, действующего на электрон, и потенциал φ_2 конечной точки этого пути.

Дано: $Q = 100$ нКл $= 10^{-7}$ Кл; $S = 10$ см. $= 0{,}1$ м.

Найти: $W = ?$

Решение:

Из условия следует, что начальная скорость электрона равна нулю. Тогда пройденный путь S и ускорение a связаны формулой:

$$S = \frac{a\,t^2}{2}, \text{ или } a = \frac{2S}{t^2} .$$

Зная ускорение, можно определить силу, действующую на электрон $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$, которая связана с действующим на заряд электрона электрическим полем: $\vec{F} = e \cdot \vec{E}$. Тогда искомое значение напряженности электрического поля равно:

$$E = \frac{F}{e} = \frac{ma}{e} = \frac{2mS}{et^2} .$$

Далее получим: $\Delta\varphi = -\vec{E}\,\Delta\vec{r} = -E\,S\,Cos\left(180^0\right) = E\,S = \dfrac{2mS^2}{et^2}$,

и $\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi.$

Аналогичный результат можно получить, если воспользоваться законом сохранения механической энергии: $e\Delta\varphi = \dfrac{mV^2}{2}$,

где скорость V в конце пути S определяется по формуле $V = 2S/t$.

Произведем расчет:

$$E = \frac{2mS}{et^2} = \frac{2 \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 0{,}1}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-14}} = 114 \text{ В/м},$$

$$\Delta\varphi = E \cdot S = 114 \cdot 0{,}1 = 11{,}4 \text{ В},$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi = 8{,}6 + 11{,}4 = 20 \text{ В}.$$

Проверка размерности:

$$\left[E\right] = \left[\frac{mS}{et^2}\right] = \frac{кг \cdot м}{Кл \cdot с^2} = \frac{Н}{Кл} = \frac{Н \cdot м}{Кл \cdot м} = \frac{Дж}{Кл \cdot м} = \frac{В}{м};$$

$$\left[\Delta\varphi\right] = \left[E\,S\right] = \frac{В \cdot м}{м} = В.$$

Ответ: Напряженность электрического поля, действующего на электрон равна E = 114 В/м; потенциал конечной точки φ_2 = 20 В.

Задача 6.1. Три точечных заряда, расположены в вершинах правильного треугольника со стороной a = 10 см (рис. 12а), представляют собой электрически нейтральную дипольную систему. Величины зарядов Q_1 = 10 нКл, Q_2 = 10 нКл, Q_3 = – 20 нКл. Определить максимальное значение напряженности и потенциала электрического поля этой системы зарядов на расстоянии r = 1 м от центра треугольника.

Дано: a = 10 см = 0,1 м; r = 1 м; Q_1 = 10 нКл, Q_2 = 10 нКл, Q_3 = – 20 нКл.

Найти: $\vec{E}$ = ? φ = ?

Решение:

Поле электрически нейтральной системы зарядов на больших расстояниях от нее определяется величиной ее дипольного момента. Найдем дипольный момент данной системы. Выберем систему координат, как показано на рис. 12б.

Формула (26) в проекциях на выбранные оси координат запишется в виде:

$$p_x = Q_1\left(-\frac{a}{2}\right) + Q_2\frac{a}{2} + Q_3 \cdot 0 = 0,$$

$$p_y = Q_1 \cdot 0 + Q_2 \cdot 0 + Q_3 a\frac{\sqrt{3}}{2} = Q_3 a\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

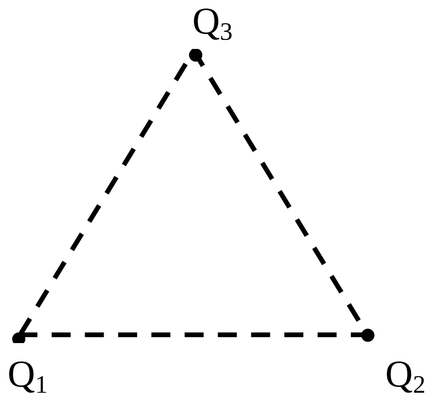

Рис. 12а

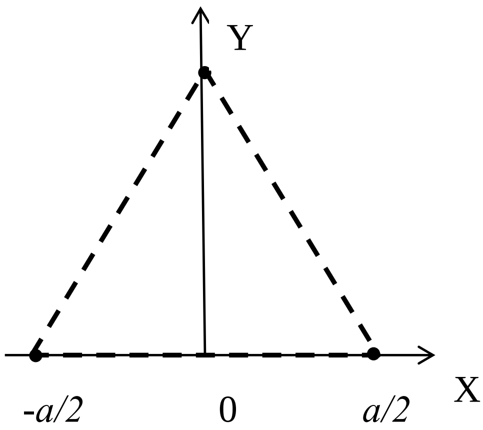

Рис. 12б

Таким образом, электрический дипольный момент системы направлен по оси Y и с учетом знака заряда равен

$$p = p_y = Q_3 \cdot a\frac{\sqrt{3}}{2} = -20 \cdot 10^{-9} \cdot 0{,}1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = -17{,}3 \cdot 10^{-10}\ \text{Кл} \cdot \text{м}.$$

В соответствии с формулами (28) и (29) максимальные значения напряженности и потенциала дипольного поля достигаются при θ = 0, т.е. в точке, находящейся на оси Оy:

$$E_{\max} = E_y = k_o\frac{2p}{r^3}, \quad \varphi_{\max} = k_o\frac{p}{r^2}.$$

С учетом того, что дипольный момент $p = Q_3 \cdot a\sqrt{3}/2$, получаем:

$$E_{\max} = k_o\frac{Q_3 \cdot a\sqrt{3}}{r^3}, \quad \varphi_{\max} = k_o\frac{Q_3 \cdot a\sqrt{3}}{2r^2}.$$

Вычисления дают следующие значения

$$E_{\max} = 9 \cdot 10^9 \frac{20 \cdot 10^{-9} \cdot 0{,}1 \cdot \sqrt{3}}{1^3} = 3{,}12\ В/м\ .$$

$$\varphi_{\max} = 9 \cdot 10^9 \frac{20 \cdot 10^{-9} \cdot 0{,}1 \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot 1^3} = 1{,}56\ В\ .$$

Проверка размерности:

$$\left[E_{\max}\right] = \left[\frac{k_o Q_3 a}{r^3}\right] = \frac{Н \cdot м^2}{Кл^2} \cdot \frac{Кл \cdot м}{м^3} = \frac{Н \cdot м}{Кл \cdot м} = \frac{Дж}{Кл \cdot м} = \frac{В}{м}\ .$$

Ответ: Максимальное значение напряженности поля $E_{\max}$ = 3,12 В/м; максимальное значение потенциала на расстоянии r = 1 м равно $\varphi_{\max}$ = 1,56 В.

Задача 6.2. Диполь с электрическим моментом p = 2 нКл·м находится в однородном электрическом поле напряженностью E =30 кВ/м. Направление вектора $\vec{p}$ составляет угол $\alpha = 60^0$ с направлением силовых линий электрического поля. Определить момент сил действующих на диполь и произведенную им работу при повороте диполя на угол $\beta = 30^0$.

Дано: p = 2 нКл·м; E = 30 кВ/м; $\beta = 30^0$.
Найти: M = ? A = ?
Решение:

В соответствии с формулой (29) искомый момент сил равен

$$\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E}, \quad \text{или} \quad M = p \cdot E\ Sin\alpha.$$

Его направление таково, что он стремится повернуть диполь в сторону совпадения направлений векторов $\vec{p}$ и $\vec{E}$ (рис.13а).

Произведем расчет: $M = 2 \cdot 10^{-9} \cdot 30 \cdot 10^3 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\ \text{Н} \cdot \text{м} = 51 \cdot 10^{-6}\ \text{Н} \cdot \text{м}$.

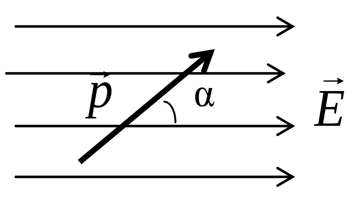

Рис. 13а

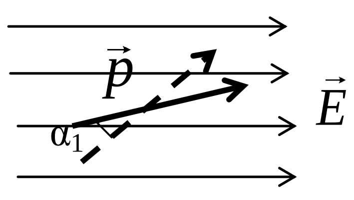

Рис. 13б

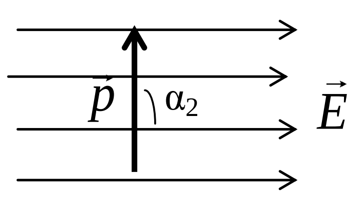

Рис. 13в

Из исходного положения (рис. 13а) диполь можно повернуть на угол β = 30^0 двумя способами: по часовой стрелке (рис. 13б) до угла $\alpha_1 = \alpha - \beta = 30^0$ или против часовой стрелки до угла $\alpha_2 = \alpha + \beta = 90^0$ (рис. 13в).

В первом случае диполь будет поворачиваться под действием механического момента сил поля и его работа положительная. Во втором случае поворот может быть осуществлен только под действием внешних сил, а механический момент сил поля препятствует этому повороту. Следовательно, работа сил поля при этом будет отрицательная. В обоих случаях работу можно определить через изменение потенциальной энергии диполя в электрическом поле

$$A = П_1 – П_2.$$

Используя формулу (27), в первом случае можно записать

$$A_1 = – pE\ \text{Cos}60^0 + pE\ \text{Cos}30^0,$$

а во втором

$$A_2 = – pE\ \text{Cos}60^0 + pE\ \text{Cos}90^0.$$

Произведя расчет, получим: A_1 = 21,9 мкДж, A_2 = – 30 мкДж.

Проверка размерности:

$$[A] = [p \cdot E] = Кл \cdot м \frac{В}{м} = Кл \cdot В = Дж.$$

Ответ: Момент сил действующих на диполь M = 51 мкН·м; произведенная им работа при повороте диполя A = 21,9 мкДж.

Задача 7.1. Три одинаковые плоские металлические пластины площадью S = 100 см^2 и толщиной d = 1 мм каждая расположены параллельно друг другу (рис. 14). Расстояние между соседними пластинами равно их толщине. Крайние пластины подсоединены к электрической цепи. Определить электроемкость этой системы проводников. Принять, что диэлектрическая проницаемость окружающей среды ε =1.

Дано: S = 100 см^2 = 0,01 м^2; d = 1 мм = 0,001 м; ε = 1.

Найти: С = ?

Решение:

Предположим, что крайним пластинам через электрическую цепь сообщили заряды + Q и –Q. Так как пластины расположены близко друг от друга, то их можно считать бесконечными. Внутри всех пластин электрическое поле отсутствует, а снаружи каждая из заряженных пластин создаст электрическое поле напряженностью

$$E_+ = E_- = \frac{\sigma}{2\varepsilon_o \varepsilon} = \frac{Q}{2\varepsilon_o \varepsilon \cdot S},$$

где $\varepsilon_o = 1/4\pi k_o = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ Ф/м$ – электрическая постоянная; σ – поверхностная плотность зарядов.

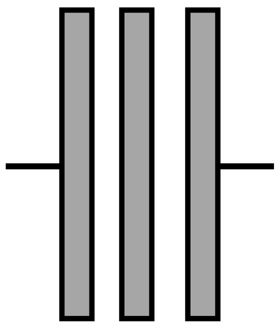

Рис. 14

Направление векторов напряженности полей пластин таково, что при их сложении вне зазоров между пластинами результирующее поле будет нулевым, а в зазорах напряженность будет равна:

$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_- = 2\vec{E}_+ .$$

Соответственно величина напряженности

$$E = \frac{Q}{\varepsilon_o \varepsilon S}.$$

Разность потенциалов между соседними пластинами при однородном поле определяется по формуле $\Delta\varphi = E\,d$. Тогда разность потенциалов между крайними пластинами

$$\Delta\varphi_{\text{общ}} = 2E\,d = \frac{2Qd}{\varepsilon_o \varepsilon S} .$$

По определению электроемкость конденсатора равна

$$C = \frac{Q}{\Delta\varphi_{\text{общ}}}. \quad \text{Тогда} \quad C = \frac{\varepsilon_o \varepsilon S}{2d}.$$

Произведем расчет:

$$C = \frac{8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 100 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-3}} \approx 44{,}2 \cdot 10^{-12}\ \text{Ф} = 44{,}2\ \text{пФ}.$$

Проверка размерности:

$$[C] = \left[\frac{\varepsilon_o S}{d}\right] = \frac{Ф}{м} \cdot \frac{м^2}{м} = Ф .$$

Ответ: Электроемкость конденсатора C = 44,2 пФ.

Задача 7.2. Пластмассовая сфера с внутренним радиусом R_1 = 9 см и внешним радиусом R_2 = 10 см (рис. 15) покрыта изнутри и снаружи тонким слоем серебра. Определить электроемкость C данного сферического конденсатора. Диэлектрическая проницаемость материала сферы ε = 5.

Дано: R_1 = 9 см = 0,09 м; R_2 = 10 см = 0,1 м; ε = 5.
Найти: C = ?
Решение:

Пусть на внутреннюю поверхность сферы помещен заряд $+Q$, а на внешнюю ее поверхность заряд $-Q$. Тогда согласно теореме Гаусса электрическое поле E сосредоточено внутри пластмассовой оболочки сферы, а во внутренней и внешней областях поле E = 0.

Имеем:

$$E = 0,\ \text{при}\ \ 0 < r < R_1\ ,$$

$$E = k_o \frac{Q}{\varepsilon r^2}\ ,\ \ \text{при}\ \ R_1 < r < R_2\ ,$$

$$E = 0,\ \text{при}\ \ R_2 < r\ .$$

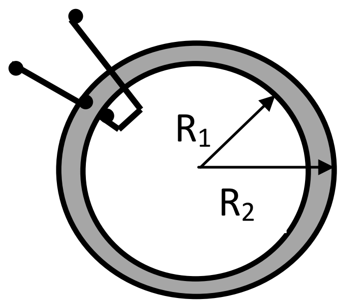

Рис. 15

Вычисляем разность потенциалов между серебряными обкладками конденсатора:

$$\Delta\varphi = \int_{R_1}^{R_2} E dr = k_o Q \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{k_o Q}{\varepsilon}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right).$$

По определению электроемкость конденсатора равна:

$$C = \frac{Q}{\Delta\varphi} = \frac{4\pi\varepsilon\varepsilon_o R_1 R_2}{R_2 - R_1}\ .$$

Произведем расчет:

$$C = \frac{4\pi \cdot 5 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12} 0{,}09 \cdot 0{,}1}{0{,}1 - 0{,}09} = 500 \cdot 10^{-12} = 500\ n\Phi.$$

Проверка размерности:

$$[C] = \left[\frac{\varepsilon_o R_1 R_2}{R_2 - R_1}\right] = \frac{\Phi}{м} \cdot \frac{м^2}{м} = \Phi\ .$$

Ответ: Электроемкость данного сферического конденсатора C = 500 пФ.

Задача 8.1. Электрический ток силой I = 8 А протекает по стальной проволоке круглого сечения. Радиус сечения r = 0,5 мм. Рассчитать скорость направленного движения (дрейфа) электронов в проволоке. Принять концентрацию электронов проводимости равной $n = 10^{29}$ м $^{-3}$.

Дано: I = 8 А; r = 0,5 мм = $5{\cdot}10^{-4}$ м; $n = 10^{29}$ м$^{-3}$.
Найти: V = ?
Решение:

Используя формулу (37), выразим среднюю скорость направленного движения через плотность тока

$$\langle\ V \rangle = \frac{j}{en}\ ,\ \ \text{где}\ \ j = \frac{I}{S} = \frac{I}{\pi r^2}\ .$$

Тогда средняя скорость

$$\langle V \rangle = \frac{I}{en\pi r^2}.$$

Произведем вычисления:

$$\langle V \rangle = \frac{8}{1{,}6\cdot 10^{-19}\cdot 10^{29}\cdot 3{,}14\cdot 0{,}25\cdot 10^{-6}} = 6{,}4\cdot 10^{-4}\ \text{м/с}.$$

Проверка размерности:

$$[V] = \left[\frac{I}{enr^2}\right] = \frac{\text{А}}{\text{Кл}\cdot\text{м}^{-3}\text{м}^2} = \frac{\text{А}\cdot\text{м}}{\text{Кл}} = \frac{\text{Кл}\cdot\text{м}}{\text{с}\cdot\text{Кл}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ: Скорость направленного движения (дрейфа) электронов в проволоке равна $V = 6{,}4\cdot 10^{-4}$ м/с.

Задача 8.2. В эксперименте, аналогичном опыту Стюарта и Толмена, катушка из $N = 400$ витков медной проволоки приводилась во вращательное движение вокруг своей оси с частотой $\nu = 100\ \text{с}^{-1}$. Концы проволоки с помощью двух скользящих контактов присоединялись к баллистическому гальванометру. Диаметр катушки $d = 50$ см, общее сопротивление всей цепи $R = 50$ Ом. При резком затормаживании катушки через гальванометр прошел заряд $Q = 1{,}10^{-8}$ Кл. Определить удельный заряд носителей тока в меди.

Дано: $N = 400$; $\nu = 100\ \text{с}^{-1}$; $R = 50$ Ом; $Q = 1{,}10^{-8}$ Кл; $d = 50$ см $= 0{,}5$ м.
Найти: $e/m = ?$
Решение:

Носителями тока в меди являются электроны. Кинетическая энергия движения электронов после торможения катушки переходит в тепловую, которую в соответствии с законом Джоуля-Ленца можно представить в виде

$$I_{ср}^2 Rt = QI_{ср}R = Qj_{ср}SR,$$

где $I_{ср}$ – средний ток, текущий в цепи при торможении катушки t, $j_{ср}$ – соответствующая средняя плотность тока. Считая, что скорость электронов равномерно убывает от V_{max} до 0, можно среднюю плотность тока выразить через среднюю скорость $\langle V \rangle = 0{,}5V_{max}$

$$j_{ср} = en\langle V \rangle = 0{,}5enV_{max}.$$

Тогда закон сохранения энергии можно записать в виде

$$N_{эл}\frac{mV_{max}^2}{2} = Q\cdot 0{,}5\cdot enV_{max}SR,$$

где $N_{эл}$ – общее число электронов в катушке. Оно связано с концентрацией n и объемом проволоки $N_{эл} = n\cdot L\cdot S = n\cdot N\cdot\pi\cdot d\cdot S$. Скорость электронов перед торможением связана с частотой вращения $V_{max} = \pi d\nu$. Подставив эти равенства в закон сохранения энергии, получим с учетом сокращений

$$n \cdot N \cdot \pi \cdot d \cdot S \cdot m \cdot \pi \cdot d \cdot \nu. = Q \cdot e \cdot n \cdot SR.$$

После сокращений и преобразований получим искомую величину

$$\frac{e}{m} = \frac{\pi^2 d^2 \nu N}{QR}.$$

Произведем вычисления

$$\frac{e}{m} = \frac{3{,}14^2 \cdot 0{,}5^2 \text{м}^2 100\,\text{с}^{-1} \cdot 400}{1{,}1 \cdot 10^{-8}\,\text{Кл} \cdot 50\,\text{Ом}} = 1{,}79 \cdot 10^{11}\,\frac{\text{Кл}}{\text{кг}}.$$

Проверка размерности:

$$\left[\frac{e}{m}\right] = \left[\frac{d^2 \cdot \nu}{Q \cdot R}\right] = \frac{\text{м}^2 \times \text{с}^{-1}}{\text{Кл} \times \text{Ом}} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2 \times \text{В}} = \frac{\text{м}^2 \times \text{Кл}}{\text{с}^2 \times \text{Дж}} = \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}.$$

Ответ: Удельный заряд носителей тока в меди $e/m = 1{,}79 \cdot 10^{11}$ *Кл*/кг, что соответствует удельному заряду электрона.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1.1. Точечные заряды Q_1 =1 нКл, Q_2 = 1 нКл , Q_3 = –1 нКл, Q_4 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами: $\vec{r}_1 = (0, 0)$, $\vec{r}_2 = (a, 0)$, $\vec{r}_3 = (a, a)$, $\vec{r}_4 = (0, a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность (и покажите ее направление на чертеже) и потенциал электрического поля в точке $\vec{r} = (0, -a)$. (Ответ: 865 В/м, 68,4 В)

1.2. Точечные заряды Q_1 =1 нКл, Q_2 = –2 нКл , Q_3 = 1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (a, a)$, $\vec{r}_2 = (-a, a)$, $\vec{r}_3 = (-a, -a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность (и покажите ее направление на чертеже) и потенциал электрического поля в точке с радиус-вектором $\vec{r} = (a, -a)$. (Ответ: 93,2 В/м, 26,4 В)

1.3. Точечные заряды Q_1 =1 нКл, Q_2 = 1 нКл , Q_3 = –1 нКл, Q_4 = –1 нКл, Q_5 = –1 нКл, Q_6 = 1 нКл, расположены на координатной плоскости (OXY). Узлы решетки, в которых находятся указанные выше заряды, заданы координатами $\vec{r}_1 = (a, a)$, $\vec{r}_2 = (0, a)$, $\vec{r}_3 = (-a, a)$, $\vec{r}_4 = (-a, -a)$, $\vec{r}_5 = (0, -a)$, $\vec{r}_6 = (-a, -a)$, где a = 0,1 м. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность (и покажите ее направление на чертеже)и потенциал электрического поля в точке с радиус-вектором $\vec{r} = (0, -a)$. (Ответ: 900 В/м, 54 В)

1.4. Точечные заряды Q_1 =1 нКл и Q_2 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (a, a)$, $\vec{r}_2 = (-a, a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность (и покажите ее направление на чертеже) и потенциал электрического поля в точке $\vec{r} = (0, 0)$. (Ответ: 636 В/м, 0 В)

1.5. Точечные заряды Q_1 =1 нКл, Q_2 = –2 нКл , Q_3 = 1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (a, 0)$, $\vec{r}_2 = (-a, a)$, $\vec{r}_3 = (0, -a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность (покажите ее направление на чертеже) и потенциал электрического поля в точке $\vec{r} = (a, -a)$.(Ответ: 1048 В/м, 116 В)

1.6. Точечные заряды Q_1 =1 нКл, Q_2 = 1 нКл , Q_3 = –1 нКл, Q_4 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (a, 0)$, $\vec{r}_2 = (a, a)$, $\vec{r}_3 = (-a, a)$, $\vec{r}_4 = (-a, 0)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке $\vec{r} = (0, -a)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 797 В/м, 0 В)

1.7. Точечные заряды Q_1 = –1 нКл, Q_2 = 1 нКл , Q_3 = 1 нКл, Q_4 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (a, 0)$, $\vec{r}_2 = (0, a)$, $\vec{r}_3 = (-a, 0)$, $\vec{r}_4 = (0, -a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке с радиус-вектором $\vec{r} = (-a, -a)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 1387 В/м, 0 В)

1.8. Точечные заряды Q_1 = –1 нКл, Q_2 = 2 нКл , Q_3 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (a, a)$, $\vec{r}_2 = (-a, a)$, $\vec{r}_3 = (-a, -a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке $\vec{r} = (0, 0)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 900 В/м, 0 В)

1.9. Точечные заряды Q_1 = 1 нКл, Q_2 = 1 нКл , Q_3 = –1 нКл, Q_4 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (0, 0)$, $\vec{r}_2 = (0, a)$, $\vec{r}_3 = (-a, a)$, $\vec{r}_4 = (-a, 0)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке $\vec{r} = (-a, -a)$. $\vec{r} = (0, -a)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 759 В/м, -31,1 В)

1.10. Точечные заряды Q_1 = –1 нКл и Q_2 = 1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами

$\vec{r}_1 = (a, a)$, $\vec{r}_2 = (-a, -a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке $\vec{r} = (0, 0)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 900 В/м, 0 В)

1.11. Точечные заряды Q_1 = 2 нКл, Q_2 = 2 нКл , Q_3 = –2 нКл, Q_4 = –2 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (a, 0)$, $\vec{r}_2 = (0, a)$, $\vec{r}_3 = (-a, 0)$, $\vec{r}_4 = (0, -a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке $\vec{r} = (0, 0)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 5090 В/м, 0 В)

1.12. Точечные заряды Q_1 = 2 нКл, Q_2 = –1 нКл , Q_3 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (0, 0)$, $\vec{r}_2 = (a, a)$, $\vec{r}_3 = (-a, -a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке $\vec{r} = (-a, a)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 582 В/м, 37,3 В)

1.13. Точечные заряды Q_1 = –2 нКл, Q_2 = 1 нКл , Q_3 = 1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (a, 0)$, $\vec{r}_2 = (-a, a)$, $\vec{r}_3 = (-a, -a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке $\vec{r} = (-a, 0)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 450 В/м, 90 В)

1.14. Точечные заряды Q_1 = –1 нКл, Q_2 = –1 нКл , Q_3 = 2 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (a, a)$, $\vec{r}_2 = (-a, a)$, $\vec{r}_3 = (0, -a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке $\vec{r} = (0, a)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 450 В/м, -90 В)

1.15. Точечные заряды Q_1 = 3 нКл, Q_2 = –1 нКл , Q_3 = –1 нКл, Q_4 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (0, 0)$, $\vec{r}_2 = (a, a)$, $\vec{r}_3 = (-a, 0)$, $\vec{r}_4 = (0, -a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке $\vec{r} = (a, 0)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 2234 В/м, 71,4 В)

1.16. Точечные заряды Q_1 = 1 нКл, Q_2 = 1 нКл , Q_3 = -2 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (0, a)$, $\vec{r}_2 = (0, -a)$, $\vec{r}_3 = (a, 0)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке $\vec{r} = (-a, 0)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 819 В/м, 38,6 В)

1.17. Точечные заряды Q_1 = 2 нКл, Q_2 = –1 нКл , Q_3 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (0, 0)$, $\vec{r}_2 = (a, 0)$, $\vec{r}_3 = (-a, 0)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке $\vec{r} = (0, a)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 1164 В/м, 52,7 В)

1.18. Точечные заряды Q_1 = 2 нКл, Q_2 = –1 нКл , Q_3 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (0, 0)$, $\vec{r}_2 = (0, a)$, $\vec{r}_3 = (-a, 0)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке с радиусом-вектором $\vec{r} = (-a, a)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 373 В/м, -52,7 В)

1.19. Точечные заряды Q_1 = 3 нКл, Q_2 = –1 нКл , Q_3 = –1 нКл, Q_4 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (0, 0)$, $\vec{r}_2 = (a, 0)$, $\vec{r}_3 = (0, a)$, $\vec{r}_4 = (-a, 0)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке $\vec{r} = (0, -a)$. (Ответ: 1839 В/м, 97,7 В)

1.20. Точечные заряды Q_1 = –1 нКл, Q_2 = –1 нКл , Q_3 = 2 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (0, a)$, $\vec{r}_2 = (-a, 0)$, $\vec{r}_3 = (-a, -a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке с радиус-вектором $\vec{r} = (-2a, -2a)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 170 В/м, -8,3 В)

1.21. Точечные заряды Q_1 = 1 нКл, Q_2 = 1 нКл , Q_3 = –2 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (a, 0)$, $\vec{r}_2 = (0, a)$, $\vec{r}_3 = (-a, -a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке с радиус-вектором $\vec{r} = (0, 0)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 2173 В/м, 52,7 В)

1.22. Точечные заряды Q_1 = 1 нКл, Q_2 = –2 нКл , Q_3 = 1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиусами-векторами $\vec{r}_1 = (a, a)$, $\vec{r}_2 = (0, a)$, $\vec{r}_3 = (-a, a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке с радиусом-вектором $\vec{r} = (2a, a)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 582 В/м, 37,3 В)

1.23. Точечные заряды Q_1 = 2 нКл, Q_2 = –1 нКл , Q_3 = –1 нКл, расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1=(0,0),\ \vec{r}_2=(a,0),\ \vec{r}_3=(0,a),$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке $\vec{r}=(a,\,a)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 0 В/м, 36 В)

1.24. Точечные заряды Q_1 = –1 нКл и Q_2 = 1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1=(0,\,a),\ \vec{r}_2=(-a,\,a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке $\vec{r}=(0,\,0)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 663 В/м, -26,4 В)

1.25. Точечные заряды Q_1 = 1 нКл, Q_2 = 1 нКл , Q_3 = 2 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1=(0,a),\ \vec{r}_2=(0,-a),\ \vec{r}_3=(a,0)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке $\vec{r}=(-a,0)$. Сделайте поясняющий чертеж. (Ответ: 1719 В/м, 218,6 В)

2.1. Очень длинная тонкая прямая проволока несет заряд, равномерно распределенный по всех длине с линейной плотностью заряда 5,55 нКл/м. Найти напряженность поля на расстоянии a = 0,5 м от проволоки против ее середины равна. (Ответ: 200 В/м)

2.2. Расстояние d между двумя длинными тонкими проволоками, расположенными параллельно друг другу, равно 16 см. Проволоки равномерно заряжены разноименными зарядами с линейной плотностью τ =150 мкКл/м. Какова напряженность E поля в точке, удаленной на r = 10 см как от первой, так и от второй проволоки? (Ответ: 43,2 МВ/м)

2.3. Прямой длинный металлический стержень диаметром d = 5 см несет равномерно распределенный по его поверхности заряд Q = 500 нКл. Определить напряженность E поля в точке, находящейся против средней части стержня на расстоянии a = 1 см от его поверхности. (Ответ: 64,3 кВ/м)

2.4. Бесконечно длинная тонкостенная металлическая трубка радиусом R = 2 см несет равномерно распределенный по поверхности заряд (σ = 1 нКл/м^2). Определить напряженность E поля в точках, отстоящих от оси трубки на расстояниях r_1 = 1 см, r_2 = 3 см. Построить график зависимости $E(r)$. (Ответ: 0 В/м; 75,5 В/м)

2.5. Две длинные тонкостенные коаксиальные трубки радиусами R_1 = 2 см и R_2 = 4 см несут заряды, равномерно распределенные по длине с линейными плотностями τ_1 = 1 нКл/м, τ_2 = -0,5 нКл/м. Пространство между трубками заполнено эбонитом. Определить напряженность E поля в точках на расстояниях

r_1 = 1 см, r_2 = 3 см, r_3 = 5 см от оси трубок. Построить график зависимости *E* (*r*). (Ответ: 0 В/м; 200 В/м; 180 В/м)

2.6. Электрическое поле создано двумя бесконечными параллельными пластинами, несущими одинаковый равномерно распределенный по площади заряд (σ = 1 нКл/м^2). Определить напряженность *E* поля: 1) между пластинами; 2) вне пластин. Построить график изменения напряженности вдоль линии, перпендикулярной пластинам. (Ответ: 0 В/м; 113 В/м)

2.7. Электрическое поле создано двумя бесконечными параллельными пластинами, несущими равномерно распределенный по площади заряд с поверхностными плотностями σ_1 = 1 нКл/м^2 и σ_2 = 3 нКл/м^2. Определить напряженность *E* поля: 1) между пластинами; 2) вне пластин. Построить график изменения напряженности вдоль линии, перпендикулярной пластинам. (Ответ: 113 В/м; 226 В/м)

2.8. Электрическое поле создано двумя бесконечными параллельными пластинами, несущими равномерно распределенный по площади заряд с поверхностными плотностями σ_1 = 2 нКл/м^2 и σ_2 = -5 нКл/м^2. Определить напряженность *E* поля: 1) между пластинами; 2) вне пластин. Построить график изменения напряженности вдоль линии, перпендикулярной пластинам. (Ответ: 396 В/м; 170 В/м

2.9. Две прямоугольные одинаковые параллельные пластины, длины сторон которых *a* = 10 см и *b* = 15 см, расположены на малом (по сравнению с линейными размерами пластин) расстоянии друг от друга. На одной из пластин равномерно распределен заряд Q_1 = 50 нКл, на другой - Q_2 = 150 нКл. Определить напряженность электрического поля между пластинами. (Ответ: 377 В/м)

2.10. Электрическое поле создано двумя бесконечными параллельными пластинами, несущими равномерно распределенный по площади заряд с поверхностными плотностями σ_1 = 10 нКл/м^2 и σ_2 = -30 нКл/м^2. Определить силу взаимодействия между пластинами, приходящуюся на площадь *S* = 1 м^2. (Ответ: 16,9 мкН)

2.11. Две круглые параллельные пластины радиусом *R* = 10 см находятся на малом (по сравнению с радиусом) расстоянии друг от друга. Пластинам сообщили одинаковые по модулю, но противоположные по знаку заряды $Q_1 = Q_2 = Q$. Определить этот заряд, если пластины притягиваются с силой *F* = 2 мН. Считать, что заряды распределяются по пластинам равномерно. (Ответ: 33.3 нКл)

2.12. Тонкая нить несет равномерно распределенный по длине заряд с линейной плотностью τ_1 = 2 мкКл/м. Вблизи средней части нити на расстоянии r = 1 см, малом по сравнению с ее длиной, находится точечный заряд Q = 0,1 мкКл. Определить силу *F*, действующую на заряд. (Ответ: 0,36 Н)

2.13. Большая металлическая пластина несет равномерно распределенный по поверхности заряд (σ = 10 нКл/м^2). На малом расстоянии от пластины находится точечный заряд *Q* = 100 нКл. Найти силу *F*, действующую на заряд. (Ответ: 56,5 мкН)

2.14. Точечный заряд Q = 1 мкКл находится вблизи большой равномерно заряженной пластины против ее середины. Вычислить поверхностную плотность заряда пластины и напряженность электрического поля, если на точечный заряд действует сила F = 60 мН. (Ответ: 1,06 мкКл/м^2; $6\cdot10^4$ В/м)

2.15. Между пластинами плоского конденсатора находится точечный заряд Q = 30 нКл. Поле конденсатора действует на заряд с силой F_1 = 10 мН. Определить силу F_2 взаимного притяжения пластин, если площадь S каждой пластины 100 см^2. (Ответ: 4,92 мН)

2.16. Параллельно бесконечной пластине, несущей заряд, равномерно распределенный по площади с поверхностной плотностью σ = 20 нКл/м^2, расположена тонкая нить с равномерно распределенным по длине зарядом (τ = 0,4 нКл/м). Определить силу F, действующую на отрезок нити длиной l = 1 м. (Ответ: 452 нН/м)

2.17. Две одинаковые круглые пластины площадью по S = 100 см^2 каждая расположены параллельной друг другу. Заряд одной пластины равен +100 нКл, другой -100 нКл. Определить силу взаимодействия пластин в двух случаях, когда расстояние между ними 1) r_1 = 2 см; и 2) r_2 = 10 м. (Ответ: 1) 56,5 мН; 2) 0,9 мкН)

2.18. Плоский конденсатор состоит из двух пластин, разделенных стеклом. Какое давление производят пластины на стекло перед пробоем, если напряженность Е электрического поля перед пробоем равна 30 МВ/м? (Ответ: 27,9 кПа)

2.19. Две параллельные, бесконечно длинные прямые нити несут заряд, равномерно распределенной по длине с линейными плотностями τ_1 = 0,1 мкКл/м, τ_2 = 0,2 мкКл/м. Определить силу взаимодействия, приходящуюся на отрезок нити длиной 1 м. Расстояние между нитями равно 10 см. (Ответ: 3,6 мН/м)

2.20. Электрическое поле создано длинным цилиндром радиусом R = 1 см, равномерно заряженным с линейной плотностью τ = 20 нКл/м. Определите разность потенциалов для двух точек этого поля, находящихся на расстояниях 0,5 см и 2 см от поверхности цилиндра, в средней его части. (Ответ: 250 В)

2.21. Точечный заряд q = 20 нКл находится в поле, созданном прямым бесконечным цилиндром радиусом R = 1 см, заряженным с поверхностной плотностью заряда = 2 нКл/см 2 , на расстоянии r = 0,2 м от оси цилиндра. Найти силу, действующую на заряд. (Ответ: 2, 26 мН)

2.22. Шарик радиусом R = 2 см, сделанный из диэлектрика (ε = 1), заряжен с объемной плотностью $\rho = 0{,}3\cdot10^{-3}$ Кл/м^3. Какова напряженность поля на расстоянии r = 3 см от центра шара? (Ответ: 10^5 В/м)

2.23. На металлической сфере радиусом R = 10 см находится заряд q = 1 нКл. Определить напряженность электрического поля в точках, находящихся: 1) на расстоянии r_1= 8 см от центра сферы; 2) на поверхности сферы ($r = R$); 3) на расстоянии r_2= 15 см от центра сферы. (Ответ: 1) $E(r_1)$ = 0,2 В/м; 2) $E(R)$ = 900 В/м; 3) $E(r_2)$ = 400 В/м).

2.24. Металлический шар радиусом R_1 = 2 см окружен концентрической металлической оболочкой R_2 = 4 см. На шаре находится заряд q_1= +3,3·10^{-9} Кл, на оболочке q_2= –6,6·10^{-9} Кл. Определить напряженность поля на расстоянии: а) R_3 = 3 см; б) R_4 = 5 см от центра. (Ответ: $E(R_3)$ = 3,3·10^4 В/м, $E(R_4)$ = - 1,2·10^4 В/м)

2.25. Бесконечная равномерно заряженная плоскость имеет поверхностную плотность электрического заряда σ = 9·10^{-6} Кл/м^2. Над ней находится алюминиевый шарик, заряженный зарядом q = 3,68·10^{-7} Кл. Какой радиус должен иметь шарик, чтобы он не падал? (Ответ: r = 1,2 10^{-2} м)

3.1. Сто одинаковых капель ртути, зарядили до потенциала φ_1 = 3 В каждый. Затем шарики сблизили и слили в одну большую каплю. Каков потенциал φ образовавшейся капли? (Ответ: 65 В)

3.2. Какую работу необходимо совершить, чтобы перенести точечный заряд 2,0·10^{-8} Кл из бесконечности в точку, находящуюся на расстоянии 28 см от поверхности проводящего шара радиусом 2,0 см, если потенциал шара равен 300 В? Шар находится в воздухе. (Ответ: 4·10^{-7} Дж)

3.3. Электрическое поле создано точечным зарядом Q =50 нКл. Вычислить работу A внешних сил по перемещению точечного заряда q = –2 нКл из точки $\boldsymbol{a}$ в точку $\boldsymbol{b}$, если расстояния от заряда Q до этих точек равны соответственно r_a = 10 см, r_b = 20 см. Определить также изменение ΔП потенциальной энергии данной системы зарядов и работу поля при этом перемещении. (Ответ: $A = \Delta П = -A_{\text{поля}}$ = 45 10^{-7} Дж)

3.4. Металлический шарик диаметром d = 2 см заряжен до потенциала φ = –150 В. Сколько электронов находится на поверхности шарика? (Ответ: ≈ 10^9)

3.5. Электрическое поле создано длинным цилиндром радиусом 1 см, равномерно заряженным с линейной плотностью 20 нКл/м. Определить разность потенциалов двух точек этого поля, находящихся на расстояниях 0,5 см и 2 см от поверхности цилиндра в средней его части. (Ответ: 250 В)

3.6. Электрическое поле создано точечным зарядом Q_1 = 6 нКл. Положительный заряд Q_2 переносится из точки А, находящейся на расстоянии r_a = 20 см от заряда, в точку В (r_b = 50 см). Каково изменение ΔП потенциальной энергии, приходящееся на единицу заряда? (Ответ: -162 Дж/Кл)

3.7. Вычислить потенциальную энергию системы двух точечных зарядов Q_1 = 100 нКл и Q_2 = 10 нКл, находящихся на расстоянии d = 10 см друг от друга. (Ответ: 90 мкДж)

3.8. Вычислить потенциальную энергию системы трех точечных зарядов Q_1 = 10 нКл и Q_2 = 20 нКл и Q_3 = -30 нКл, расположенных в вершинах равностороннего треугольника со стороной a =10 см. (Ответ: - 63 мкДж)

3.9. Какова потенциальная энергия взаимодействия четырех одинаковых точечных зарядов Q = 10 нКл, расположенных в вершинах квадрата со стороной a =10 см. (Ответ: 48,8 мкДж)

3.10. Какова потенциальная энергия взаимодействия четырех одинаковых по модулю точечных зарядов Q = 10 нКл, расположенных в вершинах квадрата со стороной a =10 см, если два диагонально расположенных из них отрицательные, а другие два – положительные. (Ответ: -12,7 мкДж)

3.11. Бесконечно длинная тонкая прямая нить несет равномерно распределенный по длине нити заряд с линейной плотностью 0,01 мкКл/м. Определить разность потенциалов двух точек поля, удаленных от нити на r_1 = 2 см и r_2 = 4 см. (Ответ: 125 В)

3.12. Имеются две концентрические металлические сферы радиусами R_1 = 3 см и R_2 = 6 см. Пространство между сферами заполнено парафином (диэлектрическая проницаемость ε = 2). Заряд внутренней сферы равен Q_1 = -1 нКл, внешний Q_2 = 2 нКл. Найти разность потенциалов электрического поля в точках на расстоянии r_1 = 1 см и r_2 = 5 см от центра сфер. (Ответ: -60 В)

3.13. Имеются две концентрические металлические сферы радиусами R_1 = 3 см и R_2 = 6 см. Пространство между сферами заполнено парафином (диэлектрическая проницаемость ε = 2). Заряд внутренней сферы равен Q_1 = -1 нКл, внешний Q_2 = 2 нКл. Найти потенциал электрического поля на расстоянии r_1 = 5 см и r_2 = 9 см от центра сфер. (Ответ: 35 В)

3.14. Металлический шар радиусом 10 см заряжен до потенциала 300 В. Определить потенциал этого шара после того, как его окружат сферической проводящей оболочкой радиусом 15 см и на короткое время соединят с ней проводником. (Ответ: 200 В)

3.15. Металлический шар радиусом R_1 = 10 см заряжен до потенциала 300 В. Определить потенциал этого шара, если его окружить сферической проводящей заземленной оболочкой радиусом R_2 = 15 см. (Ответ: 100 В)

3.16. Заряд распределен равномерно по бесконечной плоскости с поверхностной плотностью σ = 10 нКл/м^2.Определить разность потенциалов двух точек поля, одна из которых находится на плоскости, а другая удалена от нее на расстояние d = 10 см. (Ответ: 56,6 В)

3.17. Определить потенциал, до которого можно зарядить уединенный металлический шар радиусом R = 10 см, если напряженность E поля, при которой происходит пробой воздуха, равна 3 МВ/м. (Ответ: 300 кВ)

3.18. Две бесконечные параллельные плоскости находятся на расстояниях d = 0,5 см друг от друга. На плоскостях равномерно распределены заряды с поверхностными плотностями σ_1 = 0,2 мкКл/м^2 и σ_2 = -0,3 мкКл/м^2. Найти разность потенциалов между плоскостями. (Ответ: 141 В)

3.19. Две бесконечные параллельные плоскости находятся на расстояниях d = 1 см друг от друга. На плоскостях равномерно распределены заряды с поверхностными плотностями σ_1 = 0,2 мкКл/м^2 и σ_2 = 0,5 мкКл/м^2. Найти разность потенциалов между плоскостями. (Ответ: 170 В)

3.20. Металлический шарик диаметром 2 см заряжен отрицательно до потенциала -150 В. Сколько электронов находится на поверхности шарика? (Ответ: $1{,}04\cdot10^9$)

3.21. Две наэлектризованные пластины образовали однородное поле напряженностью 250 В/см. Каково напряжение на пластинах, если расстояние между ними 4 см? С какой силой поле действует на заряд $q = 6{\cdot}10^{-6}$ Кл? (Ответ: 1000 В; 0,15 Н)

3.22. Электрическое поле создано бесконечным длинным равномерно заряженным (σ = 0,1 мкКл/м^2) цилиндром радиусом R = 5 см. Определить изменение потенциальной энергии протона при перемещении его из точки, находящейся на расстоянии $r_1 = 2R$ от поверхности цилиндра, до точки $r_2 = R$. (Ответ: -229 эВ)

3.23. Какова потенциальная энергия взаимодействия четырех одинаковых по модулю точечных зарядов Q = 10 нКл, расположенных в вершинах квадрата со стороной a =10 см, если диагонально расположенные заряды разных знаков. (Ответ: 12,7 мкДж)

3.24. Две металлические концентрические сферы радиусами 15 и 30 см расположены в воздухе. На внутренней сфере распределен заряд $-2{\cdot}10^{-8}$ Кл, а потенциал внешней сферы равен 450 В. Вычислить напряженность и потенциал в точках, удаленных от центра сфер на 10 и 20 см. (Ответ: 0, 4500 В/м; -150 В; 150 В)

3.25. Пылинка массой $1{\cdot}10^{-11}$ г имеет заряд, равный 20 элементарным зарядам, и находится в равновесии между двумя параллельными пластинами с разностью потенциалов 153 В. Каково расстояние между пластинами? (Ответ: 0,005 м)

4.1. По теории Бора электрон вращается вокруг ядра по круговой орбите радиусом $0{,}53{\cdot}10^{-10}$ м в атоме водорода. Определите скорость вращения электрона. (Ответ: $2{,}2{\cdot}10^{6}$ м/с)

4.2. Два точечных заряда имеют массы 2 и 4 мг и заряды –2 нКл и +2 нКл соответственно. На каком расстоянии друг от друга должны быть расположены заряды, чтобы в однородном внешнем электрическом поле с напряженностью E =100 кВ/м, направленном вдоль прямой, проходящей через заряды, они ускорялись как одно целое (т.е. не изменяя расстояния между собой)? (Ответ:$1{,}3{\cdot}10^{-2}$ м)

4.3. Металлический шарик диаметром d = 2 см заряжен до потенциала φ = –150 В. Сколько электронов находится на поверхности шарика? (Ответ: 10^{9} электронов)

4.4. Два одинаковых маленьких шарика массой по 0,4 г подвешены в одной точке на шелковых нитях длиной L = 30 см. Какие заряды нужно сообщить шарикам, чтобы угол между нитями составил $\alpha = 90^0$? (Ответ: 0,3 мкКл)

4.5. Два одинаковых шарика подвешены на нитях одинаковой длины 40 см так, что их поверхности соприкасаются. После сообщения шарикам заряда q? они оттолкнулись и разошлись на угол 60^0. Найти силу взаимодействия шариков и величину сообщенного им заряда, если масса каждого $m = 6{\cdot}10^{-4}$ кг. (Ответ: 3,4 мкН, 8 нКл)

4.6. Два шарика массой m = 0,1 г каждый подвешены в одной точке на нитях длиной L = 20 см каждая. Получив одинаковый заряд, шарики разошлись так, что нити образовали между собой угол $\alpha = 60°$. Найти заряд каждого шарика. (Ответ: 52 нКл)

4.7. Тонкая шелковая нить выдерживает максимальную силу натяжения T = 10 мН. На этой нити подвешен шарик массой m = 0,6 г, имеющий положительный заряд q_1 = 11 нКл. Снизу к нему подносят другой шарик, имеющий отрицательный заряд q_2 = -13 нКл. При каком расстоянии r между шариками нить разорвется? (Ответ: 1,8 см)

4.8. Даны два шарика массой m = 1 г каждый. Какой заряд Q нужно сообщить каждому шарику, чтобы сила взаимного отталкивания зарядов уравновесила силу взаимного притяжения шариков по закону тяготения Ньютона? Рассматривать шарики как материальные точки. (Ответ: $0{,}9 \cdot 10^{-13}$ Кл)

4.9. В элементарной теории атома водорода принимают, что электрон обращается вокруг ядра по круговой орбите. Определите частоту вращения электрона, если радиус его орбиты r = 53 пм. (Ответ: $6{,}6 \cdot 10^{15}$ $с^{-1}$)

4.10. Одинаковые по модулю электрические заряды 0,3 нКл расположены в воздухе в вершинах при острых углах равнобедренного прямоугольного треугольника на расстоянии от третьей вершины 1 мм. Определить ускорение движения протона р, помещенного в вершине при прямом угле треугольника. (Ответ: $7\ 10^{-15}$ м/с^2)

4.11. Две сферические капли ртути имеют одинаковые радиусы 1 мм. Какое число электронов необходимо удалить с каждой капли, чтобы сила их кулоновского отталкивания в воздухе стала равной силе их гравитационного взаимодействия. Плотность ртути 13500 кг/м^3. (Ответ: $3 \cdot 10^7$)

4.12. Два заряда находятся в керосине (ε = 2) на расстоянии r = 1 см друг от друга и взаимодействуют между собой с силой F = 2,7 Н. Величина одного из зарядов в 3 раза больше другого. Найти величину зарядов. (Ответ: $q_1 = 1{,}4 \cdot 10^{-7}$ Кл, $q_1 = 4{,}2 \cdot 10^{-7}$ Кл)

4.13. Капля воды радиусом r = $5\ 10^{-5}$ м с плотностью ρ_1 =1000 кг/м^3 находится в состоянии безразличного равновесия в масле с плотностью ρ_2 =800 кг/м^3 при напряженности электрического поля Е=10^4 Н/Кл. Вектор напряженности поля направлен вертикально вверх. Сколько элементарных электрических зарядов находится на капле? (Ответ: $6{,}25 \cdot 10^5$)

4.14. Электрон со скоростью $\upsilon = 2\ 10^6$ м/с влетает в направлении силовых линий однородного электрического поля напряженность. Е = 2,4 В/м. В течение какого времени будет двигаться электрон до полной остановки? Какое расстояние пройдет частица? (Ответ: 5 мкс, 5 м)

4.15. Три одинаковых заряда Q = 1 нКл каждый расположен по вершинам равностороннего треугольника. Какой заряд Q_1 нужно поместить в центре треугольника, чтобы его притяжение уравновесило силы взаимного отталкивания зарядов? Будет ли это равновесие устойчивым. (Ответ: 0,58 нКл)

4.16. В вершинах квадрата находятся одинаковые заряды Q = 0,3 нКл каждый. Какой заряд Q_1 нужно поместить в центре квадрата, чтобы сила взаимного отталкивания положительных зарядов была уравновешена силой притяжения заряда? (Ответ: 0,58 нКл)

4.17. Две сферические капли ртути имеют одинаковые радиусы 1 мм. Какое число электронов необходимо удалить с каждой капли, чтобы сила их кулоновского отталкивания в воздухе стала равной силе их гравитационного взаимодействия. Плотность ртути 13500 кг/м^3. (Ответ: $3 \cdot 10^7$)

4.18. Со скоростью $2 \cdot 10^7$ м/с электрон влетает в пространство между обкладками плоского конденсатора в середине зазора в направлении, параллельном обкладкам. При какой минимальной разности потенциалов на обкладках электрон не вылетит из конденсатора, если длина конденсатора 10 см, а расстояние между его обкладками – 1 см? (Ответ: 22,75 В)

4.19. Два одинаковых шарика подвешены на нитях одинаковой длины так, что их поверхности соприкасаются. После сообщения шарикам заряда 0,4 мкКл они оттолкнулись и разошлись на угол 60^0. Найти массу каждого шарика, если расстояние от центра шарика до точки подвеса 20 см. (Ответ: 15,6 г)

4.20. Два одинаковых шарика подвешены на нитях одинаковой длины так, что их поверхности соприкасаются. Какой заряд q нужно сообщить шарикам, чтобы сила натяжения нитей стала равной T = 98 мН?. Расстояние от центра шарика до точки подвеса l = 10 см; масса каждого шарика m = 5 г. (Ответ: $1{,}1 \cdot 10^{-6}$ Кл)

4.21. Два одинаковых заряженных шарика подвешены на нитях одинаковой длины и опущены в жидкий диэлектрик, плотность которого равна ρ и диэлектрическая проницаемость ε. Какова должна быть плотность материала шариков, чтобы углы расхождения нитей в воздухе и диэлектрике были одинаковыми? (Ответ: $\rho_0 = \dfrac{\rho\varepsilon}{\varepsilon - 1}$.)

4.22. Два точечных заряда, находясь в воздухе (ε = 1) на расстоянии r_1= 20 см друг от друга, взаимодействуют с некоторой силой. На каком расстоянии r_2 нужно поместить эти заряды в масле, чтобы получить ту же силу взаимодействия? (Ответ: r_2= 8,94 см)

4.23. Свинцовый шарик (ρ = 11,3 г/см^3) диаметром 0,5 см помещен в глицерин (ρ=1,26 г/см^3). Определите заряд шарика, если в однородном электростатическом поле шарик оказался взвешенным в глицерине. Электростатическое поле направлено вертикально вверх, и его напряженность E = 4 кВ/см. (Ответ: 2,6 мкКл)

4.24. Вычислить ускорение, сообщаемое одним электроном другому, находящемуся на расстоянии от первого r= 1 мм. (Ответ: $2{,}5 \cdot 10^8$ м/с^2)

4.25. Какую массу должен был бы иметь протон для того, чтобы сила электростатического отталкивания двух протонов уравновешивалась силой их гравитационного притяжения? (Ответ: $\approx 10^{18}$ m_p)

5.1. Частица массой m = 1 мг, имеющая заряд Q_1 = 1 нКл, начинает двигаться издалека со скоростью V = 1 м/с в сторону центра заряженного шара. При каком минимальном значении радиуса шара частица достигнет его поверхности, если заряд шара Q_2 = 3 нКл? (Ответ: $5{,}4\,\text{см}$)

5.2. До какого расстояния могут сблизиться два электрона, если они движутся с большого расстояния навстречу друг другу с относительной скоростью $V = 10^6$ м/с? (Ответ: 1нм)

5.3. Разность потенциалов между катодом и анодом электронной лампы равна 90 В. Какова скорость электрона в момент удара об анод? (Ответ: $5{,}5 \cdot 10^6$ м/с)

5.4. Три электрона, находившихся неподвижно на одинаковых расстояниях a = 10 нм друг от друга, начинают разлетаться под действием сил отталкивания. Какими будут скорости электронов на большом расстоянии друг от друга? (Ответ: 225 км/с)

5.5. Кольцо радиуса R = 1 см имеет равномерно распределенный отрицательный заряд Q = 1 нКл. Какую скорость приобретет электрон, удаляясь без начальной скорости из центра кольца в бесконечность? (Ответ: $1{,}8 \cdot 10^7$ м/с)

5.6. Заряженная частица, пройдя ускоряющую разность потенциалов U = 600 кВ, приобрела скорость $V = 5{,}4 \cdot 10^6$ м/с. Определить удельный заряд частицы (отношение заряда частицы к её массе). (Ответ: $2{,}43 \cdot 10^7$ Кл/кг)

5.7. При бомбардировке неподвижного ядра натрия (${}_{23}Na^{11}$) α-частицей (${}_{4}He^{2}$) сила отталкивания между ними достигла значения F = 140 Н. На какое наименьшее расстояние приблизилась α-частица к ядру атома натрия? Какую начальную скорость имела α-частица? (Ответ: $6 \cdot 10^{-15}\,\text{м}, 15{,}9 \cdot 10^6\,\text{м/с}$)

5.8. Бесконечная плоскость заряжена отрицательно с поверхностной плотностью σ = 35,4 нКл/м^2. По направлению силовой линии поля, созданного плоскостью, летит электрон. Определить минимальное расстояние, на которое может подойти к плоскости электрон, если на расстоянии S = 5 см он имел кинетическую энергию T = 80 эВ. (Ответ: $1\,\text{см}$)

5.9. Протон, начальная скорость которого V = 100 км/с, влетел в однородное электрическое поле так, что вектор скорости совпал с направлением линий напряженности. Какое расстояние должен пролететь протон в этом поле, чтобы его скорость удвоилась, если напряженность поля E = 300 В/см. (Ответ: 5,2 мм)

5.10. Определить начальную скорость сближения протонов, находящихся на достаточно большом расстоянии друг от друга, если минимальное расстояние r_{min}, на которое они могут сблизиться в вакууме, равно 10^{-11} см. (Ответ: $2{,}2 \cdot 10^6\,\text{м/с}$)

5.11. Вдоль силовой линии однородного электрического поля движется протон. В точке поля с потенциалом φ_1 = 445 В протон имел скорость V = 100 км/с. Определить потенциал φ_2 точки поля, в которой скорость протона возрастет в два раза. Отношение заряда протона к его массе равно 96 МКл/кг. (Ответ: 288 В)

5.12. От поверхности отрицательно заряженного шара отделяется без начальной скорости электрон. Какой будет его скорость на большом расстоянии от шара, если радиус шара R = 1 см, заряд шара Q = 1 нКл? (Ответ: $1{,}8\cdot10^7$ м/с)

5.13. Протон, летящий по направлению к ядру двукратно ионизированного неподвижного атома гелия, в некоторой точке поля с напряженностью E = 10 кВ/см имеет скорость V = 1 км/с. На какое расстояние сможет протон приблизиться к этому ядру? (Ответ: 48,9 нм)

5.14. Какая ускоряющая разность потенциалов требуется, чтобы сообщить электрону скорость V = 30 Мм/с? (Ответ: 2560 В)

5.15. Два электрона, находясь вначале на расстоянии r = 0,1 мм друг от друга, начинают двигаться под действием сил отталкивания. Какую максимальную скорость они приобретут? (Ответ: 1600 м/с)

5.16. Какая энергия выделится при неупругом ударе электрона о положительно заряженный шар радиуса R = 1 см, если на бесконечно большом расстоянии от шара скорость электрона была направлена к центру шара и равна V = 100 км/с? Заряд шара Q = 1 мкКл. (Ответ: $1{,}44\cdot10^{-13}$ Дж)

5.17. В однородное электрическое поле напряженностью E = 1 кВ/м влетает вдоль силовой линии электрон со скоростью V = 1 Мм/с. Определить расстояние, пройденное электроном до точки, в которой его скорость будет равна половине начальной. (Ответ: 2,1 мм)

5.18. Четыре пылинки с массами m = 0,1 мг каждая расположены в вершинах квадрата со стороной a = 1 см. Пылинкам сообщили одинаковые заряды Q = 1 нКл и предоставили возможность разлетаться под действием сил отталкивания. Определить скорость пылинок на большом расстоянии друг от друга. (Ответ: 4,9 м/с)

5.19. Пылинка массой m = 1 пг, несущая на себе 5 электронов, прошла без начальной скорости в вакууме ускоряющую разность потенциалов U = 3 МВ. Какую скорость приобретет пылинка? (Ответ: 69,3 м/с)

5.20. При облучении шара ультрафиолетовыми лучами с его поверхности вырываются электроны с начальной скоростью V =10^6 м/с. В результате шар приобретает положительный заряд. Определить предельный заряд шара. Радиус шара R = 1 см. (Ответ: 3,16 пКл)

5.21. Электрон движется вдоль силовой линии однородного электрического поля. В некоторой точке с потенциалом φ = 100 В электрон имел скорость V = 6 Мм/с. Определить потенциал точки поля, в которой скорость электрона будет в два раза меньше первоначальной. (Ответ: 23,2 В)

5.22. При радиоактивном распаде из ядра атома полония вылетает α-частица со скоростью V = $1{,}6\cdot10^7$ м/с. Определить разность потенциалов электрического поля, в котором можно разогнать покоящуюся α-частицу ($_4He^2$) до такой же скорости. (Ответ: 2,66 МВ)

5.23. Протон движется по направлению к центру равномерно заряженного до потенциала φ = 400 В шара. Какой минимальной скоростью должен обладать протон, находясь на расстоянии, равном четырем радиусам шара от его центра, чтобы достигнуть поверхности шара? (Ответ: 240 км/с)

5.24. Электрон, пройдя в плоском конденсаторе путь от одной пластины до другой, приобрел скорость $V = 10^6$ м/с. Определить разность потенциалов между пластинами. (Ответ: 2,8 В)

5.25. Электрон вылетает из точки, потенциал которой равен φ_1 = 450 В, со скоростью V_1 = 190 м/с. Какую скорость он будет иметь в точке с потенциалом φ_2 = 475 В? (Ответ: $3\cdot10^6$ м/с)

6.1. Точечные заряды Q_1 = –1 нКл и Q_2 = 1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (a,\, a),\ \vec{r}_2 = (-a,\, -a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить дипольный момент $\vec{p}$ данной системы зарядов и ее потенциальную энергию W во внешнем электрическом поле $\vec{E} = (50,\, 0)$ В/м. (Ответ: $(-2,-2)\cdot10^{-10}$ Кл·м; $100\cdot10^{-10}$ Дж)

6.2. Два точечных диполя с электрическими моментами p_1 = 1 пКл·м и p_2 = 4 пКл·м находятся на расстоянии r = 2 см друг от друга. Найти модуль напряженность электрического поля первого диполя в месте нахождения второго и момент сил, действующий на второй диполь со стороны поля первого. Считать, оси диполей лежат на одной прямой. (Ответ: $4{,}5\cdot10^3$ В/м; $4{,}9\cdot10^{-9}$ Н·м)

6.3. Диполь с электрическим моментом p = 20 нКл·м находится в однородном электрическом поле с напряженностью E = 50 кВ/м. Вектор электрического момента составляет угол α = 60° с силовыми линиями поля. Какова потенциальная энергия W диполя? За нулевую потенциальную энергию принять энергию, соответствующую такому расположению диполя, когда вектор электрического момента перпендикулярен линиям поля. (Ответ: –500 мкДж)

6.4. Точечные заряды Q_1 = –2 нКл, Q_2 = 1 нКл , Q_3 = 1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиусами-векторами $\vec{r}_1 = (a,\, 0),\ \vec{r}_2 = (-a,\, a),\ \vec{r}_3 = (-a,\, -a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить дипольный момент $\vec{p}$ данной системы зарядов и ее потенциальную энергию W во внешнем электрическом поле $\vec{E} = (100,\, 0)$ В/м. (Ответ: $(-4{,}0)\cdot10^{-10}$ Кл·м; $40\cdot10^{-10}$ Дж)

6.5. Диполь с электрическим моментом p =100 пКл·м свободно устанавливается в однородном электрическом поле напряженностью E = 10 кВ/м.

Определить изменение потенциальной энергии ΔW диполя при повороте его на угол α = 60°. (Ответ: $500 \cdot 10^{-9}$ Дж)

6.6. Точечные заряды Q_1 = 3 нКл, Q_2 = –1 нКл , Q_3 = –1 нКл, Q_4 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (0,\, 0),\ \vec{r}_2 = (a,\, a),\ \vec{r}_3 = (-a,\, 0),\ \vec{r}_4 = (0,\, -a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить дипольный момент $\vec{p}$ данной системы зарядов и ее потенциальную энергию W во внешнем электрическом поле $\vec{E} = (0,\, 100)$ В/м. (Ответ: $(0,0)$ Кл·м; 0 Дж)

6.7. Точечные заряды Q_1 = 1 нКл, Q_2 = 1 нКл , Q_3 = –2 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (a,\, a),\ \vec{r}_2 = (-a,\, a),\ \vec{r}_3 = (a,\, -a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить дипольный момент $\vec{p}$ данной системы зарядов и ее потенциальную энергию W во внешнем электрическом поле $\vec{E} = (0,\, -100)$ В/м. (Ответ: $(-2,-4) \cdot 10^{-10}$ Кл·м; $400 \cdot 10^{-10}$ Дж)

6.8. Точечные заряды Q_1 = 2 нКл, Q_2 = –1 нКл , Q_3 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиусами-векторами $\vec{r}_1 = (0,\, 0),\ \vec{r}_2 = (a,\, 0),\ \vec{r}_3 = (-a,\, 0)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить дипольный момент $\vec{p}$ данной системы зарядов и ее потенциальную энергию W во внешнем электрическом поле $\vec{E} = (0,\, -100)$ В/м. (Ответ: $(0,0)$ Кл·м; 0 Дж)

6.9. Два точечных диполя с электрическими моментами p_1 = 20 пКл·м и p_2 = 50 пКл·м находятся на расстоянии r = 10 см друг от друга, так что их оси лежат на одной прямой. Вычислить напряженность электрического поля первого диполя в точке нахождения второго и взаимную потенциальную энергию диполей, соответствующую их устойчивому равновесию. (Ответ: 180 В/м; –$9 \cdot 10^{-9}$ Дж)

6.10. Точечные заряды Q_1 = 3 нКл, Q_2 = –1 нКл , Q_3 = –1 нКл, Q_4 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (0,\, 0),\ \vec{r}_2 = (a,\, 0),\ \vec{r}_3 = (0,\, a),\ \vec{r}_4 = (-a,\, 0)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить дипольный момент $\vec{p}$ данной системы зарядов и ее потенциальную энергию W во внешнем электрическом поле $\vec{E} = (-50,\, 0)$ В/м. (Ответ: $(0,0)$ Кл·м; 0 Дж)

6.11. Расстояние между зарядами диполя Q = ± 3,2 нКл равно l =12 см. Найти напряженность E и потенциал φ поля, созданного диполем, в точке, удаленной на r = *8* см как от первого, так и от второго заряда. (Ответ: 6,75 к В/м; 0 В)

6.12. Точечные заряды Q_1 = 1 нКл, Q_2 = 1 нКл , Q_3 = –2 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (a,0)$, $\vec{r}_2 = (0,a)$, $\vec{r}_3 = (-a,-a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить дипольный момент $\vec{p}$ данной системы зарядов и ее потенциальную энергию W во внешнем электрическом поле $\vec{E} = (50,0)$ В/м. (Ответ: $(0{,}3;0{,}3)\cdot 10^{-9}$ Кл·м; $-15\cdot 10^{-9}$ Дж)

6.13. Определить момент сил, действующих на диполь с электрическим моментом $\vec{p}$ = 2 нКл·м, находящийся в однородном электрическом поле напряженностью E = 15 кВ/м. Вектор $\vec{p}$ составляет с направлениями силовых линий поля угол α = 60°. (Ответ: $26\cdot 10^{-6}$ Н·м)

6.14. Точечные заряды Q_1 = 3 нКл, Q_2 = –1 нКл , Q_3 = –1 нКл, Q_4 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (0,0)$, $\vec{r}_2 = (a,0)$, $\vec{r}_3 = (0,a)$, $\vec{r}_4 = (-a,-a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить дипольный момент $\vec{p}$ данной системы зарядов и ее потенциальную энергию W во внешнем электрическом поле $\vec{E} = (-100,0)$ В/м. (Ответ: $(0,0)$ Кл·м; 0 Дж)

6.15. Диполь с электрическим моментом p =100 пКл·м свободно устанавливается в однородном электрическом поле напряженностью E = 150 кВ/м. Вычислить работу A, необходимую для того, чтобы повернуть диполь на угол α = 180°. (Ответ: $15\cdot 10^{-9}$ Дж)

6.16. Определить напряженность поля, создаваемого точечным диполем с электрическим моментом $\vec{p}$ = 4 пКл·м, на расстоянии r = 10 см от центра диполя, в направлении, составляющем угол α = 60° с вектором электрического момента. (Ответ: 42,2 В/м)

6.17. Точечные заряды Q_1 =1 нКл, Q_2 = 1 нКл , Q_3 = –1 нКл, Q_4 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (0,0)$, $\vec{r}_2 = (a,0)$, $\vec{r}_3 = (a,a)$, $\vec{r}_4 = (0,a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить дипольный момент $\vec{p}$ данной системы зарядов и ее потенциальную энергию W во внешнем электрическом поле $\vec{E} = (0,100)$ В/м. (Ответ: $(0;-0{,}2)\cdot 10^{-9}$ Кл·м; $-20\cdot 10^{-9}$ Дж)

6.18. Точечные заряды Q_1 =1 нКл, Q_2 = –2 нКл , Q_3 = 1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (a,a)$, $\vec{r}_2 = (-a,a)$, $\vec{r}_3 = (-a,-a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить дипольный момент $\vec{p}$ данной системы зарядов и ее потенциальную энергию W во внешнем электрическом поле $\vec{E} = (0,\, -100)$ В/м. (Ответ: $(0,3;-0,2)\cdot 10^{-9}$ Кл·м; $20\cdot 10^{-9}$ Дж)

6.19. Рассчитать дипольный электрический момент системы зарядов Q_1 = 4 нКл, Q_2 = Q_3 = –2 нКл. Заряды расположены вдоль одной прямой на одинаковом расстоянии друг от друга b = 0,1 м. (Ответ: $(-0,6;0)\cdot 10^{-9}$ Кл·м)

6.20. Точечные заряды Q_1 =1 нКл и Q_2 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиусами-векторами $\vec{r}_1 = (a,\, a),\ \vec{r}_2 = (-a,\, a)$. Определить дипольный момент $\vec{p}$ данной системы зарядов и ее потенциальную энергию W во внешнем электрическом поле $\vec{E} = (50,\, 0)$ В/м. (Ответ: $(0,2;0)\cdot 10^{-9}$ Кл·м; $10\cdot 10^{-9}$ Дж)

6.21. Вычислить потенциал электрического поля, создаваемоцj точечным диполем с электрическим моментом $\vec{p}$ = 6 нКл·м на расстоянии r = 12 см от центра диполя в направлении, составляющем угол α = 150° с вектором электрического момента. (Ответ: –361 нВ)

6.22. Точечные заряды Q_1 =1 нКл, Q_2 = 1 нКл , Q_3 = –1 нКл, Q_4 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (a,\, 0),\ \vec{r}_2 = (a,\, a),\ \vec{r}_3 = (-a,\, a),\ \vec{r}_4 = (-a,\, 0)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить дипольный момент $\vec{p}$ данной системы зарядов и ее потенциальную энергию W во внешнем электрическом поле $\vec{E} = (-100,\, 0)$ В/м. (Ответ: $(0,4;0)\cdot 10^{-9}$ Кл·м; $-40\cdot 10^{-9}$ Дж)

6.23. Определить дипольный электрический момент системы зарядов Q_1 = Q_2 = – 4 нКл и Q_3 = 8 нКл, расположенных в порядке возрастания их номеров вдоль одной прямой. Расстояние между Q_1 и Q_2 = 2 см, Q_2 и Q_3 = 4 см. (Ответ: $(0,4;0)\cdot 10^{-9}$ Кл·м)

6.24. Точечные заряды Q_1 = –1 нКл, Q_2 = 2 нКл , Q_3 = –1 нКл расположены на плоскости в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной a = 0,1 м. Узлы решетки, в которых находятся указанные заряды, заданы радиус-векторами $\vec{r}_1 = (a,\, a),\ \vec{r}_2 = (-a,\, a),\ \vec{r}_3 = (-a,\, -a)$. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определить дипольный момент $\vec{p}$ данной системы зарядов и ее потенциальную энергию W во внешнем электрическом поле $\vec{E} = (0,\, 50)$ В/м. (Ответ: $(-0,2;0,2)\cdot 10^{-9}$ Кл·м; $10\cdot 10^{-9}$ Дж)

6.25. Заряды Q_1 = Q_2 = 8 нКл и Q_3 = –16 нКл расположены в вершинах равностороннего треугольника со сторонами a = 2 см. Вычислить дипольный электрический момент этой системы зарядов. (Ответ: $(0,8;1,4)\cdot 10^{-10}$ Кл·м)

7.1. С какой силой притягиваются друг к другу пластины заряженного плоского конденсатора, электроемкость которого C = 1 мкФ, расстояние между пластинами d = 1 мм, а разность потенциалов между пластинами U = 100 В? Конденсатор находится в воздухе. (Ответ: 10 Н)

7.2. Определить электроемкость C металлической сферы радиусом R = 2 см, погруженной в воду. Диэлектрическая проницаемость воды ε = 81. (Ответ: 180 пФ)

7.3. Определить электроемкость Земли, принимая ее за шар радиусом R = 6400 км. Диэлектрическая проницаемость атмосферного воздуха ε = 1. (Ответ: 0,7 мФ)

7.4. Два металлических шара радиусами R_1 = 2 см и R_2 = 6 см соединены проводником, емкостью которого можно пренебречь. Этой системе сообщен заряд Q = 1 нКл. Найти поверхностную плотность σ зарядов на шарах. (Ответ: 50 нКл/м^2; 16,6 нКл/м^2)

7.5. Шар радиусом R_1 = 6 см заряжен до потенциала φ_1 = 300 В, а шар радиусом R_2 = 4 см - до потенциала φ_2= 500 В. Определить потенциал φ шаров после того, как их соединили тонким металлическим проводником. Емкостью соединительного проводника пренебречь. (Ответ: 380 В)

7.6. Конденсаторы электроемкостью 1 мкФ и 2 мкФ заряжены до разности потенциалов 20 В и 50 В соответственно. После зарядки конденсаторы соединили одноименными полюсами. Какой станет разность потенциалов между обкладками конденсаторов? (Ответ: 40 В)

7.7. Между пластинами плоского конденсатора, заряженного до разности потенциалов U = 600 В, находятся два слоя диэлектриков: стекла толщиной d_1 =7 мм с диэлектрической проницаемостью ε_1 = 7 и эбонита толщиной d_2 = 3 мм и ε_2 = 3. Площадь S каждой пластины конденсатора равна 200 см^2. Найти электрическую емкость C конденсатора.(Ответ: 88,5 пФ)

7.8. Два одинаковых плоских конденсатора соединены параллельно и заряжены до разности потенциалов 6 В. Определить разность потенциалов между пластинами конденсаторов, если после отключения конденсаторов от источника у одного конденсатора уменьшили расстояние между пластинами в два раза. (Ответ: 4 В)

7.9. На пластинах плоского конденсатора равномерно распределен заряд с поверхностной плотностью σ = 0,2 мкКл/м^2. Расстояние d между пластинами равно 1 мм. На сколько изменится разность потенциалов на его обкладках при увеличении расстояния d между пластинами до 3 мм? (Ответ: 45 В)

7.10. Плоский конденсатор зарядили при помощи источника с напряжением 200 В, а затем отключили от источника. Каким станет напряжение между пластинами, если расстояние между ними увеличить от первоначального d_1 = 0,2 мм до d_2 = 0,7 мм, а пространство между пластинами заполнить слюдой? Диэлектрическая проницаемость слюды ε = 7. (Ответ: 100 В)

7.11. Конденсатор емкости C = 5 мкФ присоединен к источнику тока, который поддерживает на обкладках конденсатора разность потенциалов U = 5 В. Какой заряд пройдет через источник при заполнении пространства между пластинами жидкостью с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2$? (Ответ: 25 мкКл)

7.12. Между пластинами плоского конденсатора находится плотно прилегающая диэлектрическая стеклянная пластинка. Конденсатор заряжен до разности потенциалов U_1 = 100 В. Какой будет разность потенциалов U_2, если вытащить стеклянную пластинку из конденсатора? (Ответ: 700 В)

7.13. Два конденсатора с электроемкостями C_1 = 2 мкФ и C_2 = 5 мкФ соединены между собой параллельно и присоединены к батарее с э.д.с. $\mathcal{E}$ = 100 В. Определить установившиеся заряды Q_1 и Q_2 конденсаторов и разности потенциалов U_1 и U_2 между их обкладками. (Ответ: 200 мкКл; 500 мкКл; 100 В)

7.14. Две концентрические металлические сферы радиусами R_1 = 2 см и R_2 = 2,1 см образуют сферический конденсатор. Определить его электроемкость C, если пространство между сферами заполнено парафином с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2{,}2$. (Ответ: 103 пФ)

7.15. Конденсатор состоит из двух концентрических сфер. Радиус R_1 внутренней сферы равен 10 см, внешней R_2 = 10,2 см. Промежуток между сферами заполнен парафином с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2{,}2$. Внутренней сфере сообщен заряд Q = 5 мкКл. Определить разность потенциалов U между сферами. (Ответ: 4 кВ)

7.16. Два конденсатора электроемкостями C_1 = 3 мкФ и C_2 = 6 мкФ соединены между собой последовательно и присоединены к батарее с э.д.с. $\mathcal{E}$ = 120 В. Определить установившиеся заряды Q_1 и Q_2 конденсаторов и разности потенциалов U_1 и U_2 между их обкладками. (Ответ: 240 мкКл; 80 В; 40 В)

7.17. Конденсатор электроемкостью C_1 = 0,2 мкФ был заряжен до разности потенциалов U_1 = 320 В. После того как его соединили параллельно со вторым конденсатором, заряженным до разности потенциалов U_2 = 450 В, напряжение U на нем изменилось до 400 В. Вычислить емкость C_2 второго конденсатора. (Ответ: 0,32 мкФ)

7.18. Конденсатор электроемкостью C_1 = 0,6 мкФ был заряжен до разности потенциалов U_1 = 300 В, и после этого соединен со вторым конденсатором электроемкостью C_2 = 0,4 мкФ, заряд на котором отсутствовал. Найти заряд Δq, перетекший с пластин первого конденсатора на второй. (Ответ: 72 мкКл)

7.19. Два одинаковых конденсатора соединены последовательно и подключены к источнику. Во сколько раз изменится разность потенциалов на одном из конденсаторов, если другой погрузить в жидкость с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_2 = 2$? (Ответ: 4/3)

7.20. Два последовательно соединенных конденсатора емкостями C_1 = 2 мкФ и C_2 = 4 мкФ присоединены к источнику постоянного напряжения с ЭДС $\mathcal{E}$ = 120 В. Определить напряжение на каждом конденсаторе. (Ответ: 80 В, 40 В)

7.21. Между пластинами плоского конденсатора находится плотно прилегающая стеклянная пластина, площадь которой в два раза меньше площади пластин конденсатора. Конденсатор заряжен до разности потенциалов U = 100 В и отключен от источника. Найти разность потенциалов на пластинах конденсатора, если стеклянную пластину удалить? (Ответ: 400 В)

7.22. Плоский конденсатор с воздушным промежутком между пластинами шириной d_1 = 0,5 мм заряжен до разности потенциалов U_1 =10 В и отключен от источника. Какова будет разность потенциалов, если ширину промежутка увеличить до d_2 = 5 мм? (Ответ: 100 В)

7.23. Рассчитать потенциалы шаров радиусами R_1 = 4 см и R_2 = 8 см, имеющих заряды Q_1 = 3 нКл и Q_2 = –5 нКл после того, как их соединили тонкой проволокой. Емкостью проволоки пренебречь. (Ответ: 150 В)

7.24. Металлический шар радиусом R_1 = 1 см имеет заряд Q_1 = 4 нКл. Шар соединен с другим металлическим шаром радиусом R_2 = 2 см. Найти поверхностную плотность зарядов шаров после их соединения проводником. Емкостью проводника пренебречь. (Ответ: 1 мкКл/м^2; 0,5 мкКл/м^2)

7.25. Два последовательно соединенных конденсатора емкостями C_1 = 2 мкФ и C_2 = 4 мкФ подключены к источнику постоянного напряжения. Какова максимально безопасная величина напряжения, если каждый из конденсаторов имеет напряжение пробоя U_0 = 20 В? (Ответ: 30 В)

8.1. Из медного провода площадью поперечного сечения S = 0,5 мм^2 свита круглая петля радиусом r = 60 см. Чтобы совершить один оборот в петле, электрону требуется в среднем 10 часов. Какой величины ток идет по проводу? Принять, что концентрация свободных электронов в меди равна 10^{29} м$^{-3}$. (Ответ: 0,84 А)

8.2. В модели атома водорода электрон движется вокруг протона по круговой орбите радиусом r = $0{,}53 \cdot 10^{-10}$ м. Чему равна сила тока, обусловленная движением электрона по орбите? (Ответ: 1,05 мА)

8.3. Разность потенциалов между концами медной проволоки длиной L = 10 м равна 1 В.Сколько времени потребуется электрону проводимости, чтобы проделать путь от одного конца проволоки к другому, если удельное сопротивление меди равно 17 нОм$\cdot$м, а концентрация электронов проводимости в меди равна 10^{29} м$^{-3}$. (Ответ: 27200 с)

8.4. Удельная проводимость меди σ = $5{,}9 \cdot 10^7$ (Ом$\cdot$м)$^{-1}$. Чему равна средняя длина свободного пробега свободных электронов в меди, если их средняя скорость хаотического теплового движения равна 1,3 Мм/с, а объемная концентрация n = 10^{29} м$^{-3}$. (Ответ: 54,5 нм)

8.5. Изолированный алюминиевый провод намотали в один слой на круглую катушку радиусом R =50 см. Определить момент импульса электронов проводимости в проводе относительно оси катушки, если по проводу пропускать ток силой I = 10 А. Катушка содержит N =300 витков провода. (Ответ: $2{,}68\cdot10^{-8}$ кг·м^2/с)

8.6. Средняя скорость дрейфа электронов в медной проволоке равна 74 мкм/с. Определить разность потенциалов на концах проволоки длиной L = 5 м. Удельная проводимость меди $\sigma = 5{,}9\cdot10^7$ (Ом·м)$^{-1}$, а концентрация электронов проводимости в ней равна 10^{29} м$^{-3}$. (Ответ: 100 мВ)

8.7. Допустимая сила тока в алюминиевой проволоке с площадью сечения S = 1 мм^2 равна 8 А. При этом электроны проводимости имеют среднюю скорость дрейфа $\langle V\rangle$ = 0,24 мм/с. Определить количество электронов проводимости, приходящееся на один атом алюминия. (Ответ: 3,5 эл/атом)

8.8. Металлический стержень движется вдоль своей оси со скоростью V = 200 м/с. Оценить заряд, который протечет через гальванометр, подключенный к концам стержня, при резком его торможении, если длина стержня равна 10 м, а сопротивление всей цепи (включая гальванометр) равно 10 мОм. (Ответ: 2,3 мкКл)

8.9. Линия электропередачи имеет сопротивление 300 Ом. Какое напряжение должен иметь генератор, чтобы при передаче по этой линии к потребителю мощности 25 кВт потери в линии составляли 4 % передаваемой мощности? (Ответ: 2,8 кВ)

8.10. Металлический проводник движется с ускорением a = 100 м/с^2. Используя модель свободных электронов, определить напряженность электрического поля в проводнике. (Ответ: 0,57 нВ/м)

8.11. По медному проводу течет ток плотности j = 1 А/мм^2. Оценить, какой путь пройдет электрон, переместившись вдоль провода на расстояние L = 10 мм. Принять, что концентрация свободных электронов в меди равна 10^{29} м$^{-3}$, а средняя скорость хаотического теплового движения электронов равна 100 км/с. (Ответ: 16000 км)

8.12. Найти суммарный импульс электронов в прямом проводе длины L = 1000 м, по которому течет ток силой I = 70 А. (Ответ: $4{,}4\cdot10^{23}$ кг·м/с)

8.13. Лампочка и реостат, соединенные последовательно, подключены к сети постоянного тока.. Напряжение на лампочке 40 В, сопротивление реостата 10 Ом. Общая мощность, потребляемая этой цепью, равна 450 Вт. Какова сила тока в цепи? (Ответ: 5 А)

8.14. При протекании электрического тока по металлической проволоке напряженность электрического поля внутри нее равна 0,05 В/м. Скорость дрейфа электронов проводимости при этом равна 0,5 м/с. Определить среднюю частоту соударений электронов проводимости с ионами решетки.
(Ответ: $8{,}8\cdot10^9$ с$^{-1}$)

8.15. По медному проводу длиной L = 100 м течет ток силой I = 5 А. Определить сумму электрических сил, действующих на все свободные электроны в данном проводе, если концентрация электронов проводимости в меди равна 10^{29} м$^{-3}$, а удельное сопротивление меди ρ = 17 нОм·м. (Ответ: 136 кН)

8.16. Однородный пучок протонов, ускоренных разностью потенциалов $\Delta\varphi$ = 600 кВ, имеет круглое сечение радиуса r = 5 мм. Определить концентрацию протонов в пучке при силе тока I = 50 мА. Масса протона m = 1,67·10^{-27} кг. (Ответ: 7,4·10^{14} м$^{-3}$)

8.17. Определить объемную плотность тепловой мощности в металлическом проводнике, если плотность протекающего по нему тока j= 10 А/мм^2 при напряженности электрического поля E=1 мВ/м. (Ответ: 10 кВт/м^3)

8.18. Исходя из модели свободных электронов, определить число соударений, которое испытывает электрон за одну секунду, находясь в металле, имеющем удельную проводимость σ = 10^7 (Ом·м)$^{-1}$. Концентрацию электронов проводимости принять равной 10^{29} м$^{-3}$. (Ответ: 1,4·10^{14} с$^{-1}$)

8.19. Два проводника, с сопротивлением 13 Ом и 12 Ом каждое, соединили параллельно и подключили к источнику постоянного тока. В первом проводнике за некоторый промежуток времени выделилось количество теплоты 300 Дж. Сколько теплоты за то же время выделилось во втором проводнике? (Ответ: 325 Дж)

8.20. Из ускорителя вылетает пучок электронов круглого сечения со скоростью 10^7 м/с. Радиус пучка r = 3 см, сила тока в пучке I = 10 А. Определить напряженность электрического поля на поверхности пучка. (Ответ: E = 597 кВ/м)

8.21. Удельная проводимость некоторого металла равна10^7 (Ом·м)$^{-1}$. Вычислить среднюю длину свободного пробега электронов в металле, если концентрация свободных электронов в металле равна 10^{28} м$^{-3}$. Среднюю скорость хаотического теплового движения электронов в металле принять равной 1 Мм/с. (Ответ: 71,1 нм)

8.22. Между двумя населенными пунктами протянут медный провод длиной L = 1000 м и сечением S =10 мм^2. По нему течет ток силой I = 45 А. Считая, что концентрация свободных электронов в меди равна 10^{29} м$^{-3}$, найти время, за которое электроны преодолеют это расстояние. (Ответ: 3,56·10^6 с)

8.23. В проводе длиной L = 10 м полный движущийся заряд, равномерно распределенный по проводу, равен 10^5 Кл. Определить среднюю скорость направленного движения зарядов, если сила тока I =10 А. (Ответ: 1 мм/с)

8.24. Плотность тока в пучке электронов равна 2 А/мм^2, скорость электронов V = 10^6 м/с. Определите плотность зарядов в пучке. (Ответ: 1,25·10^{19} м$^{-3}$)

8.25. Электроны перемещаются от одного конца алюминиевой проволоки к другому за 100 часов. Определить силу тока в проволоке, если ее длина L = 1000 м, площадь поперечного сечения S = 1 мм^2, и на каждый атом алюминия приходится в среднем 3 электрона проводимости. (Ответ: 80 А)

Приложение

Таблица 1. Фундаментальные физические постоянные

Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Скорость света в вакууме	$c = 2{,}998 \cdot 10^{8}$ м/с
Масса покоя электрона	$m_e = 9{,}109 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	$m_p = 1{,}673 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1{,}675 \cdot 10^{-27}$ кг
Элементарный заряд	$e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Удельный заряд электрона	$e/m = 1{,}76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг

Таблица 2. Диэлектрические проницаемости веществ

Вещество	Температура, ^{0}C					
	0	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**
Вода	87,8	83,8	80	76,5	73	70
Глицерин	–	–	56	–	–	–
Спирт	28	26	25	23	22	21
Керосин	–	–	2	–	–	–
Ацетон	23	22	21	20	19	18
Воздух	–	–	1,0006	–	–	–
Водород	–	–	1,0003	–	–	–
Азот	–	–	1,0006	–	–	–
Гелий	–	–	1,0001	–	–	–

Таблица 3. Удельное электросопротивление металлов

Металл	ρ, 10^{-8} Ом·м	Металл	ρ, 10^{-8} Ом·м
Алюминий	2,8	Никель	10,0
Бронза	8,0	Олово	11,5
Вольфрам	5,5	Ртуть	95,8
Железо	9,8	Свинец	22,1
Латунь	4,0	Серебро	1,6
Медь	1,7	Тантал	15,5
Молибден	5,7	Хром	2,7