

Глава 2

Электрическое поле в вакууме

§ 2.1. Основные законы и формулы.

1. Закон Кулона для электрического поля в вакууме:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad [F] = [H],$$

где F – сила взаимодействия двух точечных зарядов q_1 и q_2 ; r – расстояние между зарядами; $k = 1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}$ – коэффициент пропорциональности; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная.

2. Напряженность и потенциал электрического поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad [E] = \left[\frac{B}{\text{м}} \right]; \quad \varphi = \frac{\Pi}{q}, \quad [\varphi] = [B],$$

где $\vec{F}$ – сила, действующая на точечный положительный заряд q , помещенный в данную точку поля; Π – потенциальная энергия точечного положительного заряда q находящегося в данной точке поля (при условии, что потенциальная энергия заряда, удаленного в бесконечность, равна нулю).

4. Сила, действующая на точечный заряд, находящийся в электрическом поле, и потенциальная энергия этого заряда:

$$\vec{F} = q\vec{E}; \quad \Pi = q\varphi.$$

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

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

где E_i , φ – напряженность и потенциал в данной точке поля, создаваемого i -м зарядом.

6. Теорема Гаусса для электрического поля в вакууме:

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i.$$

7. Напряженность и потенциал поля, создаваемого точечным зарядом:

$$E = k \frac{q}{r^2}; \quad \varphi = k \frac{q}{r},$$

где r – расстояние от заряда q до точки, в которой определяются напряженность и потенциал.

8. Линейная плотность заряда (заряд q , приходящийся на единицу длины ℓ заряженного тела):

$$\tau = \frac{dq}{d\ell}; \text{ в случае равномерного распределения заряда: } \tau = \frac{q}{\ell}.$$

9. Поверхностная плотность заряда (заряд q , приходящийся на единицу площади поверхности S заряженного тела):

$$\sigma = \frac{dq}{dS}; \text{ в случае равномерного распределения заряда: } \sigma = \frac{q}{S}.$$

10. Объемная плотность заряда (заряд q , приходящийся на единицу объема V заряженного тела):

$$\rho = \frac{dq}{dV}; \text{ в случае равномерного распределения заряда: } \rho = \frac{q}{V}.$$

11. Напряженность и потенциал поля, создаваемого бесконечно длинной равномерно заряженной нитью (или бесконечно длинным цилиндром):

$$E = k \frac{2\tau}{r}; \quad \varphi = 2k\tau \ln(r),$$

где r – расстояние от нити до точки, в которой определяются напряженность и потенциал; τ – линейная плотность заряда.

12. Напряженность и потенциал поля, создаваемого бесконечной равномерно заряженной плоскостью:

$$E = \frac{1}{2} \frac{\sigma}{\varepsilon_0}; \quad \varphi = \frac{1}{2} \frac{\sigma}{\varepsilon_0} x,$$

где x – расстояние от плоскости до точки, в которой определяются напряженность и потенциал.

13. Напряженность и потенциал поля, создаваемого проводящей заряженной сферой радиуса R , несущей заряд q , на расстоянии r от центра сферы:

$$\begin{aligned} \text{а) внутри сферы } (r < R) \quad & E = 0; \quad \varphi = 0; \\ \text{б) на поверхности сферы } (r = R) \quad & E = k \frac{q}{R^2} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}; \quad \varphi = k \frac{q}{R}; \\ \text{в) вне сферы } (r > R) \quad & E = k \frac{q}{r^2} = \frac{\sigma R^2}{\varepsilon_0 r^2}; \quad \varphi = k \frac{q}{r}. \end{aligned}$$

14. Напряженность и потенциал поля, создаваемого равномерно заряженным по объему шаром радиуса R , несущего заряд q , на расстоянии r от центра шара:

$$\begin{aligned} \text{а) внутри шара } (r < R) \quad & E = \frac{4\pi k \rho r}{3}; \quad \varphi = \frac{2\pi k \rho r^2}{3}; \\ \text{б) на поверхности шара } (r = R) \quad & E = k \frac{q}{R^2} = \frac{\rho R}{3\varepsilon_0}; \quad \varphi = k \frac{q}{R}; \\ \text{в) вне шара } (r > R) \quad & E = k \frac{q}{r^2} = \frac{\rho R^3}{3\varepsilon_0 r^2}; \quad \varphi = k \frac{q}{r}. \end{aligned}$$

15. Связь потенциала с напряженностью:

а) в общем случае,

$$\vec{E} = -grad \varphi, \text{ или } \vec{E} = -\left(\vec{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right);$$

б) в случае однородного поля,

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d};$$

в) в случае поля, обладающего центральной или осевой симметрией,

$$E = -\frac{\partial \varphi}{\partial r}.$$

16. Энергия системы зарядов:

$$W = \sum_{i \neq k} k \frac{q_i q_k}{r_{ik}}, \quad [W] = [Дж].$$

17. Работа сил поля по перемещению заряда q из точки поля с потенциалом φ_1 в точку с потенциалом φ_2 :

$$A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2), \quad [A] = [Дж].$$

§ 2.2. Примеры решения задач.

Пример №1. Найти суммарный заряд q атомных ядер меди, содержащихся в 1 см^3 .

Дано: Cu $V = 1 \text{ см}^3$	СИ: 10^{-6} м^3	Решение: Суммарный заряд атомных ядер q определяется произведением количества ядер N , числом зарядов в ядре т.е. числом n_p – протонов и величиной заряда протона q_p :
$q = ?$		

$$q = N n_p q_p,$$

Согласно определению количества вещества есть:

$$\nu = \frac{N}{N_A},$$

где N – количество частиц (ядер меди), N_A – число Авогадро.

С другой стороны:

$$\nu = \frac{m}{M},$$

где m – масса вещества, M – молярная масса.

Следовательно, количество атомных ядер меди, находящихся в 1 см^3 есть:

$$N = N_A \frac{m}{M} = \frac{N_A \rho V}{M},$$

где ρ – плотность меди; V – объем меди.

Таким образом:

$$q = n_p q_p \frac{N_A \rho V}{M}.$$

Из таблицы Менделеева определяем M и n_p , а заряд протона равен заряду электрона e :

$$q = 29 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 8,93 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}}{64 \cdot 10^{-3}} = 3,9 \cdot 10^5 \text{ Кл}.$$

Пример №2. Два точечных заряда $+9q$ и $-q$ закреплены на расстоянии $\ell = 50$ см друг от друга. Третий заряд q может перемещаться только вдоль прямой, проходящей через заряды. Определить положение заряда q_1 , при котором он будет находиться в равновесии. При каком знаке заряда q_1 равновесие будет устойчивым?

Дано:	СИ:	Решение:
$q_1 = +9q$	0,5 м	Заряд q_3 будет находиться в равновесии в том случае, если геометрическая сумма сил, действующих на него, будет равна нулю. Это значит, что на заряд q_3 должны действовать две силы, равные по величине и противоположные по направлению.
$q_2 = -q$		
$\ell = 50$ см		
$x = ?$		
$q_2 = ?$		

Рассмотрим, на каком из трех участков I, II, III (см. рис. 1.1) может быть выполнено это условие. Для определенности будем считать, что заряд q_3 – положительный.

На участке I (рис. 1.1,а) на заряд q_3 будут действовать две противоположно направленные силы F_1 и F_2 . Сила F_1 , действующая со стороны заряда $+9q$, в любой точке этого участка будет больше, чем сила F_2 , действующая со стороны заряда $-q$, так как больший (по абсолютной величине) заряд $+9q$ будет находиться всегда ближе к заряду q_3 , чем меньший заряд $-q$. Поэтому равновесие на этом участке невозможно.

На участке II (рис. 1.1,б) обе силы F_1 и F_2 направлены в одну сторону к заряду $-q$. Следовательно и на втором участке равновесие невозможно.

На участке III (рис. 1.1,в) силы F_1 и F_2 направлены в противоположные стороны, так же как и на участке I, но в отличие от него меньший (по абсолютной величине) заряд $(-q)$ всегда находится ближе к заряду q_3 , чем больший заряд $+9q$. Это значит, что можно найти такую точку на прямой,

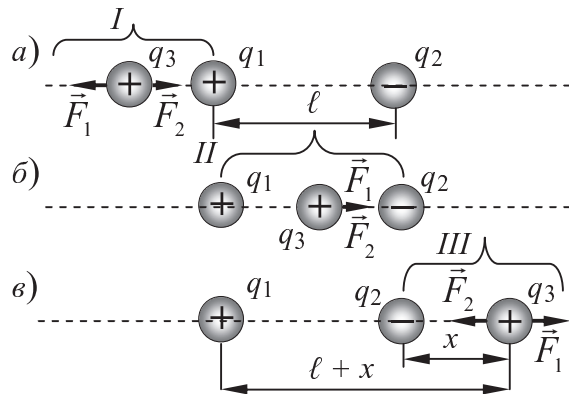


Рис. 1.1

где силы F_1 и F_2 будут одинаковы по абсолютной величине, т.е.

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

Пусть расстояние от заряда q_2 до заряда q_3 , будет x , тогда от заряда q_1 до заряда q_3 расстояние будет равно $\ell + x$. Выражая в равенстве (1) F_1 и F_2 в соответствии с законом Кулона, получим для абсолютной величины этих сил:

$$k \frac{9qq_3}{(\ell + x)^2} = k \frac{qq_3}{x^2}.$$

Сокращая на kqq_3 и извлекая из обеих частей равенства корень квадратный, найдем:

$$\ell + x = \pm 3x,$$

откуда:

$$x_1 = +\ell/2, \quad x_2 = -\ell/4.$$

Корень x_2 не удовлетворяет физическому условию задачи (в этой точке силы F_1 и F_2 хотя и равны по абсолютной величине, но совпадают по направлению).

Определим знак заряда q_3 , при котором равновесие будет устойчивым. Равновесие называется устойчивым, если при смещении заряда от положения равновесия возникают силы, возвращающие его в положение равновесия. Рассмотрим смещение заряда q_3 в двух случаях: когда заряд положителен и когда заряд отрицателен.

Если заряд q_3 положителен, то при смещении его влево обе силы F_1 и F_2 возрастают медленнее (заряд $+9q$ всегда находится дальше, чем $-q$). Следовательно, F_2 (по абсолютному значению) больше, чем F_1 , и на заряд q_3 будет действовать результирующая сила, направленная также влево. Под действием этой силы заряд q_3 удаляется от положения равновесия. То же происходит и при смещении заряда q_3 вправо. Сила F_2 будет убывать быстрее, чем F_1 . Геометрическая сумма сил в этом случае направлена вправо. Заряд под действием этой силы также будет перемещаться вправо, т. е. удаляться от положения равновесия. Таким образом, в случае положительного заряда равновесие является неустойчивым.

Если заряд q_3 отрицателен, то его смещение влево вызовет увеличение сил F_1 и F_2 , но сила F_1 возрастает медленнее, чем F_2 , т.е. $|F_2| > |F_1|$. Результирующая сила будет направлена вправо. Под действием этой силы заряд q_3 возвращается к положению равновесия. При смещении q_3 вправо сила F_2 убывает быстрее, чем F_1 , т.е. $|F_1| > |F_2|$, результирующая сила направлена влево, и заряд q_3 опять будет возвращаться к положению равновесия. При отрицательном заряде равновесие является устойчивым. Величина самого заряда q_3 не существенна.

Пример №3. Три точечных заряда $q_1 = q_2 = q_3 = +1 \text{ нКл}$ расположены в вершинах равностороннего треугольника. Какой заряд q_4 нужно поместить в центре треугольника, чтобы указанная система зарядов находилась в равновесии?

Дано:	СИ:	Решение:
$q_1 = q_2 = q_3 = +1 \text{ нКл}$	10^{-9} Кл	Все три заряда, расположенных по вершинам треугольника, находятся в одинаковых условиях.
$q_4 = ?$		

Поэтому достаточно выяснить, какой заряд следует поместить в центре треугольника, чтобы какой-нибудь один из трех зарядов, например q_1 , находился в равновесии. Заряд q_1 будет находиться в равновесии, если векторная сумма действующих на него сил равна нулю (рис. 1.2):

$$\vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 = \vec{F} + \vec{F}_4 = 0, \quad (1)$$

где F_2, F_3, F_4 – силы, с которыми соответственно действуют на заряд q_1 заряды q_2, q_3, q_4 , F – равнодействующая сил F_2 и F_3 . Так как силы F и F_4 направлены по одной прямой в противоположные стороны, то векторное равенство (1) можно заменить скалярным равенством $F - F_4 = 0$, откуда:

$$F_4 = F.$$

Выразив в последнем равенстве F через F_2 и F_3 и учитывая, что $F_3 = F_2$, получим F_4 :

$$F_4 = F_2 \sqrt{2(1 + \cos \alpha)}.$$

Применяя закон Кулона и имея в виду, что $q_3 = q_2 = q_1$, найдем:

$$k \frac{q_1 q_4}{r_1^2} = k \frac{q_1^2}{r^2} \sqrt{2(1 + \cos \alpha)},$$

откуда:

$$q_4 = \frac{q_1 r_1^2}{r^2} \sqrt{2(1 + \cos \alpha)}. \quad (2)$$

Из геометрических построений в равностороннем треугольнике:

$$r_1 = \frac{r/2}{\cos \frac{\alpha}{2}} = \frac{r}{2 \cos 30^\circ} = \frac{r}{\sqrt{3}}, \quad \cos \alpha = \cos 60^\circ = \frac{1}{2}.$$

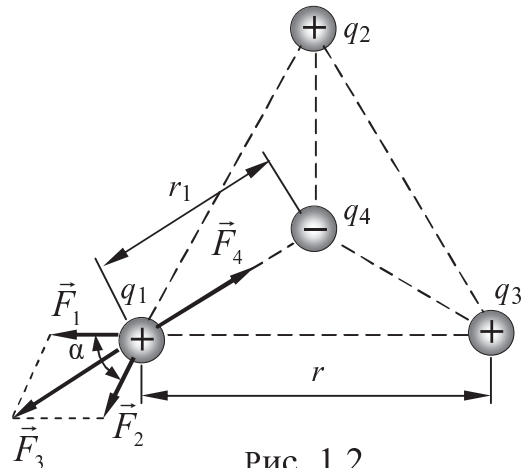


Рис. 1.2

С учетом этого выражения формула (2) примет вид:

$$q_4 = \frac{q_1}{\sqrt{3}}.$$

Подставив сюда числовое значение q_1 , получим:

$$q_4 = \frac{10^{-9}}{\sqrt{3}} \text{ Кл} = 5,77 \cdot 10^{-10} \text{ Кл} = 577 \text{ нКл}.$$

Следует отметить, что равновесие системы зарядов будет неустойчивым.

Пример №4. Тонкий стержень длиной $\ell = 20$ см несет равномерно распределенный заряд. На продолжении оси стержня на расстоянии $a = 10$ см от ближайшего конца находится точечный заряд $q_1 = +40$ нКл, который взаимодействует со стержнем с силой $F = 6$ мкН. Определить линейную плотность τ заряда на стержне.

Дано:	СИ:	Решение:
$\ell = 20 \text{ см}$	$0,2 \text{ м}$	Сила взаимодействия F заряженного стержня с точечным зарядом q_1 зависит от линейной плотности заряда на стержне. Зная эту зависимость, можно определить τ .
$a = 10 \text{ см}$	$0,1 \text{ м}$	
$q_1 = +40 \text{ нКл}$	$4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$	
$F = 6 \text{ мкН}$	$6 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$	
$\tau - ?$		

При вычислении силы F следует иметь в виду, что заряд на стержне не является точечным, поэтому закон Кулона непосредственно применить нельзя. В этом случае можно поступить следующим образом. Выделим на стержне (рис. 1.3) малый участок dr с зарядом $dq = \tau dr$. Этот заряд можно рассматривать как точечный. Тогда, согласно закону Кулона:

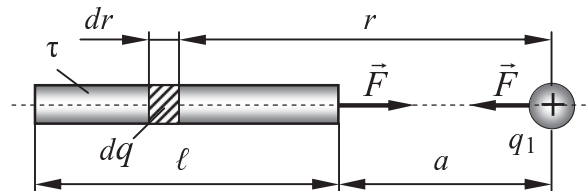


Рис. 1.3

$$dF = k \frac{q_1 \tau dr}{r^2}.$$

Интегрируя это выражение в пределах от a до $a + \ell$, получим:

$$F = kq_1 \tau \int_a^{a+\ell} \frac{dr}{r^2} = kq_1 \tau \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a+\ell} \right) = \frac{kq_1 \tau \ell}{a(a+\ell)},$$

откуда интересующая нас линейная плотность заряда:

$$\tau = \frac{a(a+\ell)F}{kq_1 \ell}.$$

Учитывая, что $a = r$, подставим числовые значения величин в полученную формулу и произведем вычисления:

$$\tau = \frac{0,1 \cdot (0,1 + 0,2) \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{9 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 10^{-8} \cdot 0,2} = 2,5 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Кл}}{\text{м}} = 2,5 \frac{\text{нКл}}{\text{м}}.$$

Пример №5. Два точечных электрических заряда находятся в воздухе на расстоянии $d = 10$ см друг от друга. Величины зарядов $q_1 = +1$ нКл и $q_2 = -2$ нКл. Определить напряженность E и потенциал ϕ поля, создаваемого этими зарядами в точке A , удаленной от заряда q_1 на расстояние $r_1 = 9$ см и от заряда q_2 на $r_2 = 7$ см.

Дано:	СИ:	Решение:
$q_1 = +1$ нКл	$+10^{-9}$ Кл	Согласно принципу суперпозиции электрических полей, каждый заряд создает поле независимо от присутствия в пространстве других зарядов. Поэтому напряженность E электрического поля в искомой точке может быть найдена как геометрическая сумма напряженностей
$q_2 = -2$ нКл	$-2 \cdot 10^{-9}$ Кл	
$r_1 = 9$ см	$0,09$ м	
$r_2 = 7$ см	$0,07$ м	
$d = 10$ см	$0,1$ м	
$E = ?$		
$\phi = ?$		

E_1 и E_2 полей, создаваемых каждым зарядом в отдельности: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Напряженность электрического поля, создаваемого в воздухе ($\epsilon = 1$) зарядом q_1 равна:

$$E_1 = k \frac{q_1}{r_1^2}, \quad (1)$$

а зарядом q_2 соответственно:

$$E_2 = k \frac{q_2}{r_2^2}. \quad (2)$$

Вектор E_1 (рис. 1.4) направлен по силовой линии от заряда q_1 , так как заряд q_1 положителен; вектор E_2 направлен также по силовой линии, но к заряду q_2 , так как заряд q_2 отрицателен.

Абсолютное значение вектора $\vec{E}$ найдем по теореме косинусов:

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

где α – угол между векторами E_1 и E_2 , который может быть найден из треугольника со сторонами r_1 , r_2 и d :

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

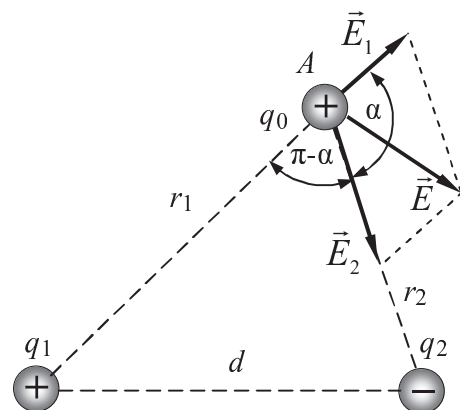


Рис. 1.4

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

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

Подставляя выражение E_1 из формулы (1) и E_2 из формулы (2) в равенство (3) и вынося общий множитель за знак корня, получим:

$$E = k \sqrt{\frac{q_1^2}{r_1^4} + \frac{q_2^2}{r_2^4} + 2 \frac{q_1 q_2}{r_1^2 r_2^2} \cos \alpha}. \quad (4)$$

Подставим числовые значения величин в формулу (4) и произведем вычисления:

$$E = 9 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{\frac{(10^{-9})^2}{(0,09)^4} + \frac{(2 \cdot 10^{-9})^2}{(0,07)^4} + 2 \frac{10^{-9} \cdot 2 \cdot 10^{-9}}{(0,09)^2 (0,07)^2} (-0,238)} \frac{B}{м} = 3,58 \cdot 10^3 \frac{B}{м}.$$

При вычислении E знак заряда q_2 опущен, так как знак заряда определяет направление вектора напряженности, а направление E_2 было учтено при его графическом изображении (см. рис. 1.4).

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

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

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

$$\varphi = k \frac{q}{r}. \quad (6)$$

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

$$\varphi = k \frac{q_1}{r_1} + k \frac{q_2}{r_2} \quad \text{или} \quad \varphi = k \left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} \right).$$

Подставив в это выражение числовые значения физических величин, получим:

$$\varphi = 9 \cdot 10^9 \cdot \left(\frac{10^{-9}}{0,09} + \frac{-2 \cdot 10^{-9}}{0,07} \right) B = -157 B.$$

Пример №6. Два шара массой $m = 1$ г каждый подвешены на нитях, верхние концы соединены в одной точке. Длина каждой нити $\ell = 10$ см. Какие одинаковые заряды надо сообщить шарикам, чтобы они разошлись на угол $\alpha = 60^\circ$?

Дано:

$$m = 1 \text{ г}$$

$$\ell = 10 \text{ см}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$q = ?$$

СИ:

$$10^{-3} \text{ кг}$$

$$0,1 \text{ м}$$

Решение:

На каждый шарик действует сила тяжести $F_g = mg$, сила натяжения нити T и сила кулоновского отталкивания F_k . Выберем соответствующим образом оси координат (рис. 1.5).

Система будет находиться в равновесии, т.е., согласно второму закону Ньютона имеем:

$$\sum_i \vec{F}_i = 0$$

или в развернутом виде:

$$\vec{F}_k + \vec{F}_g + \vec{T} = 0. \quad (1)$$

Выразим проекции уравнения (1) на оси координат:

$$\begin{cases} y: T \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - mg = 0; \\ x: T \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - F_k = 0, \end{cases} \quad (2)$$

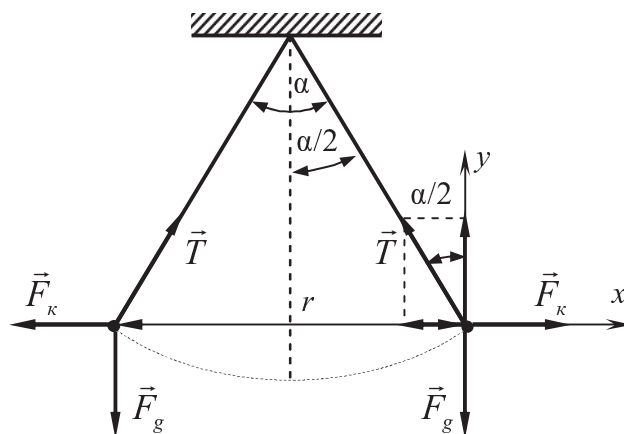


Рис. 1.5

Согласно закону Кулона, шарики отталкиваются друг от друга с силой:

$$F_k = k \frac{q^2}{r^2}, \quad (3)$$

где r – расстояние между шариками.

Используя соотношение, полученное из геометрических соотношений:

$$\frac{r}{2\ell} = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right),$$

решим совместно уравнения (2) и (3):

$$mg \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = k \frac{q^2}{r^2} \quad \text{или} \quad mg \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = k \frac{q^2}{4\ell^2 \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)}.$$

Таким образом, имеем:

$$q = 2\ell \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{\frac{mg}{k} \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}.$$

Подставив в это выражение числовые значения физических величин, получим:

$$q = 2 \cdot 0,1 \cdot 0,5 \sqrt{\frac{10^{-3} \cdot 9,81}{9 \cdot 10^9} \cdot 0,577} = 7,9 \cdot 10^{-8} \text{ Кл} = 79 \text{ нКл}.$$

Пример №7. Точечный заряд $q = -25 \text{ нКл}$ находится в поле, созданном прямым бесконечным цилиндром радиуса $R = 1 \text{ см}$, равномерно заряженным с поверхностной плотностью $\sigma = +0,2 \text{ нКл/см}^2$. Определить силу F , действующую на заряд, если его расстояние от оси цилиндра $r = 10 \text{ см}$.

Дано:	СИ:	Решение:
$q = -25 \text{ нКл}$	$2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$	Численное значение силы F , действующей на точечный заряд q , находящийся в поле, определяется по формуле:
$R = 1 \text{ см}$	$0,01 \text{ м}$	
$\sigma = 0,2 \text{ нКл/см}^2$	$2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2$	$F = qE,$ (1)
$r = 10 \text{ см}$	$0,1 \text{ м}$	где E – напряженность поля.
$F = ?$		

Как известно, напряженность поля бесконечно длинного равномерно заряженного цилиндра (рис. 1.6):

$$E = k \frac{2\tau}{r},$$

где τ – линейная плотность заряда.

Выразим линейную плотность τ через поверхностную плотность σ . Для этого выделим элемент цилиндра длиной ℓ и выразим находящийся на нем заряд q двумя способами:

$$q = \sigma S = \sigma 2\pi R \ell; \quad q = \tau \ell.$$

Приравняв правые части этих равенств и сократив на ℓ , получим:

$$\tau = 2\pi R \sigma.$$

С учетом этого выражения формула (2) примет вид:

$$E = k \frac{4\pi R \sigma}{r} = \frac{R \sigma}{\epsilon_0 r}.$$

Подставив это выражение в (1), получим искомую силу F :

$$F = \frac{q \sigma R}{\epsilon_0 r}. \quad (3)$$

Подставим в (3) числовые значения величин:

$$F = \frac{2,5 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,01}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,1} \text{ Н} = 5,65 \cdot 10^{-4} \text{ Н} = 565 \text{ мкН}.$$

Направление силы $\vec{F}$ совпадает с направлением напряженности $\vec{E}$, а последняя в силу симметрии (цилиндр бесконечно длинный) направлена перпендикулярно поверхности цилиндра (рис. 1.6).

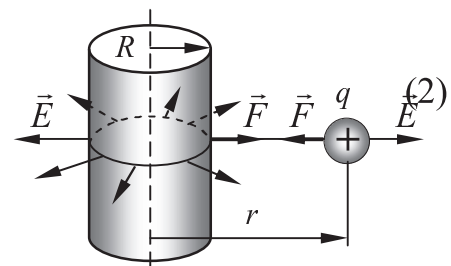


Рис. 1.6

Пример №8. С какой силой, приходящейся на единицу площади, отталкиваются две одноименно заряженные бесконечно протяженные плоскости с одинаковой поверхностной плотностью заряда $\sigma = 3 \text{ мкКл/м}^2$.

Дано: $\sigma = 3 \text{ мкКл/м}^2$ $S = 1 \text{ м}^2$ $F - ?$	СИ: $3 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2$	Решение: Считаем, что одна пластина, несущая некоторый заряд q находится в электростатическом поле другой пластины (рис. 1.7).
--	---	---

Напряженность поля бесконечной пластины определяется:

$$E = \frac{1}{2} \frac{\sigma}{\epsilon_0}.$$

Сила, действующая на заряд, находящийся в поле:

$$\vec{F} = q\vec{E}.$$

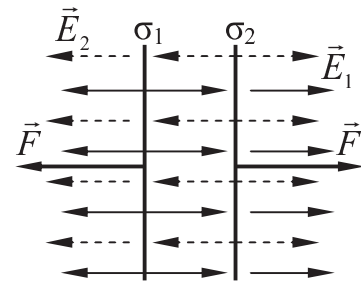


Рис. 1.7

Согласно определению, поверхностная плотность заряда есть:

$$\sigma = \frac{q}{S},$$

тогда имеем:

$$F = \frac{\sigma^2 S}{2\epsilon_0}.$$

Подставим в уравнение числовые значения величин:

$$F = \frac{9 \cdot 10^{-12} \cdot 1}{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 0,5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

Пример №9. По тонкой нити, изогнутой по дуге окружности, равномерно распределен заряд с линейной плотностью $\tau = 10 \text{ нКл/м}$. Определить напряженность E и потенциал ϕ электрического поля, создаваемого таким распределенным зарядом в точке, совпадающей с центром кривизны дуги. Длина нити составляет одну треть длины окружности и равна $\ell = 15 \text{ см}$.

Дано: $\tau = 10 \text{ нКл/м}$ $\ell = 15 \text{ см}$ $\alpha = 120^\circ$ $E - ?$ $\phi - ?$	СИ: 10^{-8} Кл/м $0,15 \text{ м}$	Решение: Выберем оси координат так, чтобы начало координат совпадало с центром кривизны дуги, а ось y была бы симметрично расположена относительно концов дуги (см. рис. 1.8).
---	---	---

На нити выделим элемент длины $d\ell$. Заряд $dq = r d\ell$, находящийся на выделенном участке, можно считать точечным.

Определим напряженность электрического поля в точке O . Для этого найдем сначала напряженность $d\vec{E}$ поля, создаваемого зарядом dq :

$$d\vec{E} = k \frac{\tau d\ell}{r^2} \frac{\vec{r}}{r},$$

где $\vec{r}$ – радиус-вектор, направленный от элемента $d\ell$ к точке, напряженность которой вычисляется.

Выразим вектор $d\vec{E}$ через проекции dE_x и dE_y на оси координат:

$$d\vec{E} = \vec{i} dE_x + \vec{j} dE_y,$$

где $\vec{i}$ и $\vec{j}$ – единичные векторы направлений (орты).

Напряженность $\vec{E}$ найдем интегрированием:

$$\vec{E} = \int_{\ell} d\vec{E} = \vec{i} \int_{\ell} dE_x + \vec{j} \int_{\ell} dE_y.$$

Интегрирование ведется вдоль дуги длины ℓ . В силу симметрии интеграл по $\int_{\ell} dE_x$ равен нулю. Тогда:

$$\vec{E} = \vec{j} \int_{\ell} dE_y = \vec{j} \int_{\ell} dE \cos \alpha = \vec{j} \int_{\ell} k \frac{\tau d\ell}{r^2} \cos \alpha. \quad (1)$$

Так как $r = R = \text{const}$, $d\ell = R d\alpha$, то:

$$dE_y = k \frac{\tau R d\alpha}{R^2} \cos \alpha = k \frac{\tau}{R} \cos \alpha d\alpha.$$

Подставим найденное значение dE_y в выражение (1) и, приняв во внимание симметричное расположение дуги относительно оси y , пределы интегрирования возьмем от 0 до $\pi/3$, а результат удвоим:

$$\vec{E} = \vec{j} k \frac{2\tau}{R} \int_0^{\pi/3} \cos \alpha d\alpha = \vec{j} k \frac{2\tau}{R} \sin \alpha \Big|_0^{\pi/3} = \vec{j} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\tau}{R} \sin \alpha \Big|_0^{\pi/3}.$$

Подставив указанные пределы и выразив R через длину дуги ($3\ell = 2\pi R$), получим:

$$\vec{E} = \vec{j} \frac{\tau}{6\epsilon_0 \ell} \sqrt{3}.$$

Из этой формулы видно, что вектор $\vec{E}$ совпадает с положительным направлением оси y .

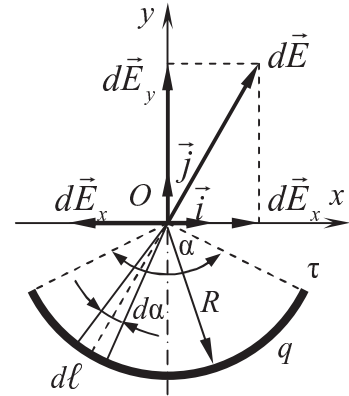


Рис. 1.8

Подставим значения τ и ℓ в полученную формулу и произведем вычисления:

$$E = \frac{10^{-8} \cdot 1,73}{6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,15} = 2180 \frac{B}{м} = 2,18 \frac{кВ}{м}.$$

Найдем потенциал электрического поля в точке O . Сначала найдем потенциал $d\varphi$, создаваемый точечным зарядом dq в точке O :

$$d\varphi = k \frac{\tau d\ell}{r}.$$

Заменим r на R и произведем интегрирование:

$$\varphi = k \frac{\tau}{R} \int_0^{\ell} d\ell = k \frac{\tau \ell}{R}, \text{ а так как } \ell = 2\pi R/3, \text{ то: } \varphi = \frac{\tau}{6\epsilon_0}.$$

Произведем вычисления:

$$\varphi = \frac{10^{-8}}{6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 188 \text{ В}.$$

Пример №10. Электрическое поле создано длинным цилиндром радиусом $R = 1 \text{ см}$, равномерно заряженным с линейной плотностью $\tau = 20 \text{ нКл/м}$. Определить разность потенциалов двух точек этого поля, находящихся на расстоянии $a_1 = 0,5 \text{ см}$ и $a_2 = 2 \text{ см}$ от поверхности цилиндра, в средней его части.

Дано:	СИ:	Решение:
$\tau = 20 \text{ нКл/м}$	$2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/м}$	Для определения разности потенциалов воспользуемся соотношением между напряженностью поля и изменением потенциала: $E = -\text{grad } \varphi$. Для поля с осевой симметрией, каким является поле цилиндра (рис. 1.6), это соотношение можно записать в виде:
$R = 1 \text{ см}$	$0,01 \text{ м}$	
$a_1 = 1,5 \text{ см}$	$0,005 \text{ м}$	
$a_2 = 3 \text{ см}$	$0,02 \text{ м}$	
$\Delta\varphi - ?$		

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

Интегрируя это выражение, найдем разность потенциалов двух точек, отстоящих на расстояниях r_1 и r_2 от оси цилиндра:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -\int_{r_1}^{r_2} E dr. \quad (1)$$

Так как цилиндр длинный и точки взяты вблизи его средней части,

то для выражения напряженности поля можно воспользоваться формулой напряженности поля, создаваемого бесконечно длинным цилиндром:

$$E = k \frac{2\tau}{r}.$$

Подставив выражение E в (1), получим:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -2k\tau \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -2k\tau \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad \text{или} \quad \varphi_1 - \varphi_2 = 2k\tau \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (2)$$

Подставим числовые значения в (2) и вычислим:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-8} \cdot \ln \frac{0,02}{0,005} = 49906 \text{ В} = 49,9 \text{ кВ}.$$

Пример №11. Работа сил поля бесконечной заряженной нити по перемещению заряда $q = +1 \text{ мКл}$ из точки, находящейся на расстоянии $r_1 = 5 \text{ см}$ от нити до $r_2 = 2 \text{ см}$ в перпендикулярном направлении равна $A = 60 \text{ мДж}$. Определить линейную плотность τ заряженной нити.

Дано:	СИ:	Решение:
$q = +1 \text{ мКл}$	10^{-3} Кл	Работа, совершаемая силами электростатического поля по перемещению точечного заряда из точки 1 в точку 2 (рис. 1.9) определяется:
$r_1 = 5 \text{ см}$	$0,05 \text{ м}$	
$r_2 = 2 \text{ см}$	$0,02 \text{ м}$	
$A = 60 \text{ мДж}$	$0,06 \text{ Дж}$	
$\tau = ?$		$A = q (\varphi_1 - \varphi_2).$

Связь между напряженностью и потенциалом электрического поля, обладающего осевой симметрией представляется в виде:

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

А также, используем выражение, определяющее напряженность поля, создаваемого равномерно заряженной бесконечной нитью на расстоянии r от нее:

$$E = k \frac{2\tau}{r},$$

где τ — линейная плотность.

В результате имеем:

$$A = -\int_{r_1}^{r_2} qE dr = -\int_{r_1}^{r_2} k \frac{2q\tau}{r} dr = -2kq\tau \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} dr = 2kq\tau \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

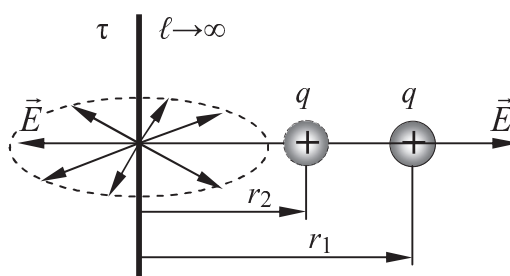


Рис. 1.9

Откуда выражаем τ :

$$\tau = \frac{A}{2kq \ln \frac{r_2}{r_1}}.$$

Произведем вычисления:

$$\tau = \frac{0,06}{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \frac{0,02}{0,05}} = 3,7 \cdot 10^{-12} \frac{Кл}{м} = 3,7 \frac{нКл}{м}.$$

Пример №12. Четыре одинаковых капли ртути заряженных до потенциала $\varphi = 10 В$ сливаются в одну. Каков потенциал φ_1 образовавшейся капли?

Дано:	Решение:
$\varphi = 10 В$	Потенциал капли до сливания в единую равен:
$\varphi_1 = ?$	$\varphi = k \frac{q}{r},$

где q – заряд капли, r – радиус капли.

После сливания четырех капель в одну заряд последней увеличивается в 4 раза, и выражение потенциала имеет вид:

$$\varphi_1 = k \frac{4q}{R},$$

где R – радиус большой капли, тогда:

$$\varphi_1 = k \frac{4\varphi r}{kR} = \frac{4\varphi r}{R}.$$

Объем V_1 большой капли станет равен четырем объемам V маленьких капель:

$$V_1 = 4 V.$$

$$\frac{4}{3} \pi R^3 = 4 \frac{4}{3} \pi r^3, \text{ откуда } \left(\frac{R}{r} \right)^3 = 4 \text{ или } \frac{R}{r} = \sqrt[3]{4}.$$

Таким образом, имеем:

$$\varphi_1 = \frac{4\varphi r}{R} = \frac{4\varphi}{\sqrt[3]{4}}.$$

Произведем вычисления:

$$\varphi_1 = \frac{4 \cdot 10}{\sqrt[3]{4}} = 25,2 В.$$

Пример №13. Определить ускоряющую разность потенциалов U , которую должен пройти в электрическом поле электрон, обладающий скоростью $v_1 = 10^6$ м/с, чтобы скорость его возросла в $n = 2$ раза.

Дано:	Решение:
$v_1 = 10^6$ м/с	Ускоряющую разность потенциалов можно найти, вычислив работу A сил электростатического поля. Эта работа определяется произведением заряда электрона e на разность потенциалов U :
$n = 2$	
$U - ?$	

$$A = eU. \quad (1)$$

Работа сил электростатического поля в данном случае равна изменению кинетической энергии электрона:

$$A = T_2 - T_1 = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}, \quad (2)$$

где T_1 и T_2 – кинетические энергии электрона до и после прохождения ускоряющего поля; m – масса электрона; v_1 и v_2 – начальная и конечная скорости электрона.

Приравняв правые части равенств (1) и (2), получим

$$eU = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$$

или:

$$eU = \frac{mn^2v_1^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2},$$

где из условия $n = \frac{v_2}{v_1}$.

Отсюда искомая разность потенциалов:

$$U = \frac{mv_1^2}{2e} (n^2 - 1). \quad (3)$$

Подставим числовые значения физических величин в (3) и вычислим:

$$U = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (10^6)^2}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} (2^2 - 1) = 8,53 \text{ В}.$$

Пример №14. Электрон с начальной скоростью $v_0 = 3 \cdot 10^6$ м/с влетел в однородное электронное поле напряженностью $E = 150$ В/м. Вектор начальной скорости перпендикулярен линиям напряженности электрического поля. Найти: 1) силу, действующую на электрон, 2) ускорение, приобретаемое электроном, 3) скорость электрона через $t = 0,1 \cdot 10^{-6}$ с.

Дано:
 $v_0 = 3 \cdot 10^6 \text{ м/с}$
 $E = 150 \text{ В/м}$
 $t = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ с}$

$F = ?$

$a = ?$

$v = ?$

Решение:

Со стороны электрического поля на электрон действует сила (рис. 1.10):

$$F = eE,$$

где e – заряд электрона.

Произведем вычисления:

$$F = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 150 = 24 \cdot 10^{-18} \text{ Н}.$$

Вдоль оси x поле не оказывает силового действия, поэтому ускорение, приобретаемое электроном направлено вдоль оси y . Используя второй закон Ньютона имеем:

$$a = a_y = \frac{F}{m} = \frac{24 \cdot 10^{-18}}{9,1 \cdot 10^{-31}} = 2,6 \cdot 10^{13} \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Следовательно, проекция скорости электрона на ось x величина постоянная $v_x = v_0$. Вдоль оси y , начальная скорость y электрона равна нулю, тогда:

$$a = \frac{v - v_{0y}}{t} = \frac{v_y}{t}.$$

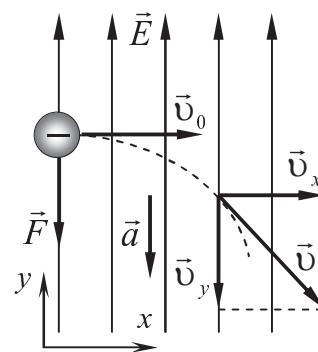


Рис. 1.10

Для нахождения результирующей скорости используем теорему Пифагора:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + a^2 t^2} = \sqrt{9 \cdot 10^{12} + 6,76 \cdot 10^{26} \cdot 0,01 \cdot 10^{-12}} = 3,97 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Скорость v направлена по касательной к траектории.

§ 2.3. Задачи для самостоятельного решения.

1. Точечные заряды $q_1 = +120 \text{ мкКл}$ и $q_2 = -100 \text{ мкКл}$ находятся на расстоянии $d = 5 \text{ см}$ друг от друга. Определить напряженность поля E в точке, удаленной на $r_1 = 3 \text{ см}$ от первого и $r_2 = 4 \text{ см}$ от второго заряда. Определить также силу F , действующую в этой точке на точечный заряд $q = +1 \text{ мкКл}$.

2. Точечные заряды $q_1 = +20 \text{ мкКл}$ и $q_2 = +10 \text{ мкКл}$ находятся на расстоянии $d = 3 \text{ см}$ друг от друга. Определить напряженность E поля в точке, удаленной на $r_1 = 5 \text{ см}$ от первого и $r_2 = 4 \text{ см}$ от второго заряда. Определить также силу F , действующую в этой точке на точечный заряд $q = +30 \text{ мкКл}$.

3. Два положительных точечных заряда $+3q$ и $+7q$ закреплены на расстоянии $\ell = 100 \text{ см}$ друг от друга. Определить, в какой точке на прямой, проходящей через заряды, следует поместить третий заряд так, чтобы он

находился в равновесии. Указать, какой знак должен иметь этот заряд для того, чтобы равновесие было устойчивым, если перемещения заряда возможны только вдоль прямой, проходящей через закрепленные заряды.

4. Два точечных заряда $q_1 = +1,6 \text{ нКл}$ и $q_2 = +0,4 \text{ нКл}$ расположены на расстоянии $d = 12 \text{ см}$ друг от друга. Где надо поместить третий положительный заряд q_3 , чтобы он оказался в равновесии? Будет ли равновесие устойчивым?

5. Расстояние ℓ между двумя точечными зарядами $q_1 = 12 \text{ нКл}$ и $q_2 = 36 \text{ нКл}$ равно 60 см . Определить точку, в которую нужно поместить третий заряд q_3 так, чтобы система зарядов находилась в равновесии. Определить величину и знак заряда. Устойчивое или неустойчивое будет равновесие?

6. Расстояние d между зарядами $q_1 = +100 \text{ нКл}$ и $q_2 = -150 \text{ нКл}$ равно 10 см . Определить силу F , действующую на заряд $q_3 = +1 \text{ мКл}$, отстоящий на $r_1 = 12 \text{ см}$ от заряда q_1 и на $r_2 = 10 \text{ см}$ от заряда q_2 .

7. Расстояние d между зарядами $q_1 = -50 \text{ нКл}$ и $q_2 = -100 \text{ нКл}$ равно 10 см . Определить силу F , действующую на заряд $q_3 = +1 \text{ мКл}$, отстоящий на $r_1 = 20 \text{ см}$ от заряда q_1 и на $r_2 = 10 \text{ см}$ от заряда q_2 .

8. Поле, созданное точечным зарядом $q = +30 \text{ нКл}$, действует на заряд $q_1 = +1 \text{ нКл}$, помещенный в некоторой точке поля, с силой $F = 0,2 \text{ мН}$. Найти напряженность E и потенциал ϕ в этой точке, а также расстояние от нее до заряда.

9. Два заряда $q_1 = +1 \text{ нКл}$ и $q_2 = -3 \text{ нКл}$ находятся на расстоянии $\ell = 200 \text{ мм}$ друг от друга. Найти напряженность E и потенциал ϕ в точке поля, расположенной на продолжении линии, соединяющей заряды, на расстоянии $r_1 = 100 \text{ мм}$ от заряда q_2 и $r_2 = 300 \text{ мм}$ от заряда q_1 .

10. Поле, созданное точечными зарядами $q_1 = +50 \text{ мКл}$ и $q_2 = -30 \text{ мКл}$, действует на заряд $q_3 = +1 \text{ мКл}$, помещенный посередине между зарядами, с силой $F = 20 \text{ мН}$. Найти напряженность E и потенциал ϕ в указанной точке, а также расстояние между зарядами q_1 и q_2 .

11. На заряд $q_1 = +1 \text{ нКл}$, находящийся в поле точечного заряда q на расстоянии $r = 10 \text{ см}$ от него, поле действует с силой $F = 3 \text{ мкН}$. Определить напряженность E и потенциал ϕ в точке, где находится заряд q_1 . Найти также значение заряда q .

12. Два заряда $q_1 = +10 \text{ нКл}$ и $q_2 = +20 \text{ нКл}$ находятся на расстоянии $\ell = 20 \text{ см}$ друг от друга. Найти напряженность E и потенциал ϕ поля, созданного этими зарядами, в точке, расположенной между зарядами на линии, соединяющей заряды, на расстоянии $r = 5 \text{ см}$ от первого из них.

13. Расстояние r между двумя точечными зарядами $q_1 = +1 \text{ нКл}$ и $q_2 = -30 \text{ нКл}$ равно 20 см . Найти напряженность E и потенциал ϕ в точке, лежащей посередине между зарядами.

14. Расстояние r между двумя точечными зарядами $q_1 = +1 \text{ нКл}$ и $q_2 = -30 \text{ нКл}$ равно 20 см . Найти напряженность E и потенциал ϕ в точке,

лежащей на продолжении линии, проведенной между зарядами, на расстоянии r от заряда q_2 .

15. На расстоянии $d = 20$ см находятся два точечных заряда $q_1 = -500$ нКл и $q_2 = 0,3$ мкКл. Определить силу F , действующую на заряд $q_3 = -100$ нКл, удаленный от обоих зарядов на одинаковое расстояние, равное $2d$.

16. Электрическое поле создано двумя точечными зарядами $q_1 = +50$ нКл и $q_2 = +100$ нКл. Расстояние между зарядами $\ell = 10$ см. Где и на каком расстоянии от первого заряда находится точка, в которой напряженность поля равна нулю?

17. Два одинаковых положительных заряда q находятся на расстоянии $\ell = 20$ см друг от друга. Найти на прямой, перпендикулярной линии, соединяющей заряды и проходящей через середину этой линии, точку, в которой напряженность поля E максимальна.

18. Два заряда $q_1 = +3$ нКл и $q_2 = +1,2$ нКл находятся на расстоянии $\ell = 10$ см друг от друга. Найти напряженность поля E на продолжении линии, соединяющей заряды, на расстоянии $r = 6$ см от второго заряда. Определить также напряженность E_1 в этой точке, если второй заряд отрицательный.

19. Точечный заряд q создает в точке, находящейся на расстоянии $r = 10$ см от заряда, поле с напряженностью $E = +1$ кВ/м. Найти потенциал поля ϕ в этой точке и силу F , действующую на заряд $q_1 = -1$ нКл, помещенный в эту точку электрического поля.

20. Поле создано точечным зарядом q . В точке, отстоящей от заряда на расстоянии $r = 30$ см, напряженность поля $E = +2$ кВ/м. Определить потенциал ϕ в этой же точке и величину заряда q .

21. Положительный точечный заряд q создает в точке, находящейся на расстоянии $r = 15$ см от заряда, поле с потенциалом $\phi = 100$ В. Найти напряженность электрического поля E в этой точке и силу F , действующую на заряд $q_1 = -1$ нКл, помещенный в эту точку поля.

22. В элементарной теории атома водорода принимают, что электрон обращается вокруг ядра по круговой орбите. Определить радиус орбиты r и скорость движения электрона v , если частота обращения электрона $\nu = 6,5 \cdot 10^5$ с⁻¹.

23. По первоначальным представлениям Бора, электрон в атоме водорода движется по круговой орбите. Вычислить скорость движения электрона, если радиус его орбиты (боровский радиус) $r_0 = 0,5 \cdot 10^{-8}$ см.

24. Найти силу F электростатического отталкивания между ядром атома углерода и бомбардирующим его протоном, считая, что протон подошел к ядру атома углерода на расстояние $r = 5,2 \cdot 10^{-14}$ м. Заряд ядра углерода в 6 раз больше заряда протона. Влиянием электронной оболочки пренебречь.

25. Бомбардирующий протон подошел к ядру атома натрия на расстояние $r = 6 \cdot 10^{-14}$ м. Заряд ядра натрия в 11 раз больше заряда протона.

Пренебрегая влиянием электронной оболочки, найти силу F электростатического отталкивания между ядром атома натрия и его протоном.

26. Три одинаковых точечных заряда $q_1 = q_2 = q_3 = +20 \text{ нКл}$ закреплены в вершинах равностороннего треугольника со стороной $r = 10 \text{ см}$. Определить по величине и направлению силу F , действующую на один из зарядов со стороны двух других.

27. Три одинаковых точечных заряда $q_1 = q_2 = q_3 = +10 \text{ нКл}$ закреплены в вершинах равностороннего треугольника со стороной $a = 25 \text{ см}$. Определить напряженность E и потенциал ϕ электрического поля в центре треугольника.

28. Три отрицательных точечных заряда $q_1 = q_2 = q_3 = -25 \text{ нКл}$ расположены в вершинах равностороннего треугольника со стороной $a = 25 \text{ см}$. Какой заряд q нужно поместить в центре треугольника, чтобы система находилась в равновесии? Будет ли равновесие устойчивым?

29. Четыре одинаковых положительных заряда $q_1 = q_2 = q_3 = q_4$ закреплены в вершинах квадрата со стороной $a = 100 \text{ мм}$. Найти величину зарядов, если сила F , действующая на один из этих зарядов со стороны трех остальных равна $0,2 \text{ мН}$.

30. Четыре одинаковых заряда $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = +50 \text{ нКл}$ закреплены в вершинах квадрата со стороной $a = 10 \text{ см}$. Найти напряженность E и потенциал ϕ электрического поля в центре квадрата.

31. В вершинах квадрата со стороной $a = 10 \text{ см}$ закреплены одинаковые заряды $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = +8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$. Какой отрицательный заряд q нужно поместить в центре квадрата, чтобы сила взаимного отталкивания положительных зарядов была уравновешена силой притяжения отрицательного заряда? Будет ли равновесие устойчивым?

32. В вершинах квадрата расположены точечные заряды $q_1 = +1,33 \text{ нКл}$; $q_2 = -0,66 \text{ нКл}$; $q_3 = +0,99 \text{ нКл}$; $q_4 = -1,32 \text{ нКл}$. Определить потенциал поля ϕ в центре квадрата, если его диагональ равна $a = 20 \text{ см}$.

33. Пять одинаковых зарядов $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q_5 = -0,9 \text{ мКл}$ закреплены в вершинах правильного пятиугольника со стороной $a = 10 \text{ см}$. Найти силу F , действующую на один из этих зарядов со стороны четырех остальных.

34. Пять одинаковых заряда $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q_5 = +5 \text{ мКл}$ закреплены в вершинах правильного пятиугольника со стороной $a = 100 \text{ мм}$. Найти напряженность E и потенциал ϕ электрического поля в центре пятиугольника.

35. В вершинах правильного пятиугольника закреплены одинаковые положительные заряды $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q_5$. После помещения в центр пятиугольника отрицательного заряда $q = -5,2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ сила взаимного отталкивания положительных зарядов была уравновешена силой притяжения отрицательного заряда. Определить величину зарядов.

36. В вершинах правильного шестиугольника закреплены точечные

заряды одинаковой величины и знака $q = +2,5 \text{ мкКл}$. Найти сторону a шестиугольника, если сила F , действующая на один из этих зарядов со стороны пяти остальных равна 200 мкН .

37. В вершинах правильного шестиугольника со стороной $a = 10 \text{ см}$ помещаются точечные заряды одинаковой величины $q = +1,5 \text{ мкКл}$. Найти потенциал φ и напряженность поля E в центре шестиугольника при условии, что знаки соседних зарядов противоположны.

38. В вершинах правильного шестиугольника со стороной $a = 100 \text{ мм}$ закреплены точечные заряды одинаковой величины q . После помещения в центр шестиугольника отрицательного заряда $q = -5 \text{ мкКл}$ сила взаимного отталкивания положительных зарядов была уравновешена силой притяжения отрицательного заряда. Определить величину зарядов.

39. Определить напряженность E поля, создаваемого зарядом, равномерно распределенным по тонкому прямому стержню с линейной плотностью заряда $\tau = +200 \text{ нКл/м}$, в точке, лежащей на продолжении оси стержня на расстоянии $a = 20 \text{ см}$ от ближайшего конца. Длина стержня $\ell = 400 \text{ мм}$.

40. На продолжении оси тонкого прямого стержня, равномерно заряженного с линейной плотностью заряда $\tau = +15 \text{ нКл/см}$ на расстоянии $a = 40 \text{ см}$ от конца стержня находится точечный заряд $q = +10 \text{ мкКл}$. Вторым концом стержня уходит в бесконечность. Определить силу, действующую на заряд q .

41. Тонкий стержень длиной $\ell = 20 \text{ см}$ равномерно заряжен с линейной плотностью $\tau = 1 \text{ нКл/см}$. Определить напряженность поля E , созданного стержнем в точке A на продолжении его оси на расстоянии $r = 10 \text{ см}$ от ближнего конца, и силу взаимодействия стержня и заряда $q = 10^{-8} \text{ Кл}$, помещенного в точку A .

42. На тонком кольце равномерно распределен заряд с линейной плотностью заряда $\tau = +0,5 \text{ нКл/см}$. Радиус кольца $R = 15 \text{ см}$. На перпендикуляре к плоскости кольца, восставленном из его середины, находится точечный заряд $q = +10 \text{ нКл}$. Определить силу F , действующую на точечный заряд со стороны заряженного кольца, если он удален от центра кольца на: 1) $a_1 = 20 \text{ см}$; 2) $a_2 = 10 \text{ м}$.

43. По тонкой нити, изогнутой по дуге окружности радиуса $R = 20 \text{ см}$, равномерно распределен заряд $q = +20 \text{ нКл}$. Определить напряженность E поля, создаваемого этим зарядом в точке, совпадающей с центром кривизны дуги, если длина нити ℓ равна четверти длины окружности.

44. По тонкому кольцу радиусом $R = 10 \text{ см}$ равномерно распределен заряд $q_1 = +20 \text{ нКл}$. Какова напряженность E поля в точке, находящейся на оси кольца на расстоянии $a = 25 \text{ см}$ от центра кольца?

45. Кольцо из проволоки радиусом $R = 10 \text{ см}$ равномерно заряжено зарядом $q = -5 \text{ нКл}$. Найти напряженность электрического поля E на оси кольца в точках, находящихся от центра кольца на расстояниях $r_1 = 0 \text{ см}$,

$r_2 = 5 \text{ см}$, $r_3 = 8 \text{ см}$, $r_4 = 10 \text{ см}$ и $r_5 = 15 \text{ см}$. Начертить график зависимости напряженности поля от расстояния от центра кольца.

46. Два длинных, тонких равномерно заряженных ($\tau = +1 \text{ мкКл/м}$) стержня расположены перпендикулярно друг другу так, что точка пересечения их осей находится на расстоянии $a = 10 \text{ см}$ и $b = 15 \text{ см}$ от ближайших концов стержней. Найти силу F , действующую на заряд $q = +10 \text{ нКл}$, помещенный в точку пересечения осей стержней.

47. Тонкое полукольцо радиусом $R = 20 \text{ см}$ несет равномерно распределенный заряд $q_1 = +2 \text{ мкКл}$. Определить силу F , действующую на точечный заряд $q_2 = +40 \text{ нКл}$, расположенный в центре кривизны полукольца.

48. Определить напряженность E поля, создаваемого тонким, длинным стержнем равномерно заряженным с линейной плотностью $\tau = +20 \text{ мкКл/м}$, в точке, находящейся на расстоянии $a = 3 \text{ см}$ на перпендикуляре, восстановленном от края стержня.

49. Электрическое поле создано двумя бесконечными параллельными плоскостями с поверхностной плотностью заряда $\tau_1 = 2 \text{ нКл/м}^2$ и $\tau_2 = -4 \text{ нКл/м}^2$. Определить напряженность поля E между плоскостями и вне плоскостей.

50. Параллельно бесконечной плоскости, заряженной с поверхностной плотностью заряда $\sigma = +40 \text{ мкКл/м}^2$, расположена бесконечно длинная прямая нить, заряженная с линейной плотностью $\tau = +100 \text{ нКл/м}$. Определить силу F , действующую со стороны плоскости на отрезок нити длиной $\ell = 5 \text{ м}$.

51. На бесконечном тонкостенном цилиндре диаметром $d = 20 \text{ см}$ равномерно распределен заряд с поверхностной плотностью $\sigma = +15 \text{ мкКл/м}^2$. Определить напряженность поля в точке, отстоящей от поверхности цилиндра на $r = 15 \text{ см}$.

52. Поле создано бесконечной вертикальной плоскостью с поверхностной плотностью заряда $\tau = 400 \text{ нКл/см}^2$. В нем подвешен на нити шарик массой $m_1 = 1 \text{ г}$ и зарядом $q_1 = 1 \text{ мкКл}$. Определить угол α , образованный нитью с плоскостью.

53. Две одинаковые круглые пластины площадью $S = 250 \text{ см}^2$ каждая расположены параллельно друг другу. Заряд одной пластины $q_1 = +250 \text{ нКл}$, другой $q_2 = -200 \text{ нКл}$. Определить силу F взаимного притяжения пластин, если расстояние между ними: а) $r_1 = 3 \text{ мм}$; б) $r_2 = 10 \text{ м}$.

54. С какой силой F на единицу площади S взаимодействуют две бесконечные параллельные плоскости, заряженные с одинаковой поверхностной плотностью $\sigma = +5 \text{ мкКл/м}^2$?

55. Две длинные прямые параллельные нити находятся на расстоянии $d = 5 \text{ см}$ друг от друга. На нитях равномерно распределены заряды с линейными плотностями $\tau_1 = -5 \text{ нКл/см}$ и $\tau_2 = +10 \text{ нКл/см}$. Определить напряженность E электрического поля в точке, удаленной от первой нити на расстояние $r_1 = 3 \text{ см}$ и от второй на расстояние $r_2 = 4 \text{ см}$.

56. Два шарика одинаковых радиуса R и массы $m = 5$ г подвешены на двух нитях так, что их поверхности соприкасаются. Расстояние от точки подвеса до центра шарика равно $\ell = 100$ мм. Какой заряд q нужно сообщить шарикам, чтобы натяжение нитей T стало равным $0,098$ Н?

57. К бесконечной равномерно заряженной вертикальной плоскости подвешен на нити одноименно заряженный шарик массой $m = 50$ мг и зарядом $q = 0,6$ нКл. Натяжение нити, на которой висит шарик, $F = 1,7$ мН. Найти поверхностную плотность σ заряда на плоскости.

58. Поле создано бесконечной вертикальной плоскостью с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 4$ нКл/см². В нем подвешен на нити шарик массой $m = 1$ г и зарядом $q = 1$ нКл. Определить угол α , образованный нитью с плоскостью.

59. Маленький шарик массой $m = 100$ мг и зарядом $q = 16,7$ нКл подвешен на нити. На какое расстояние ℓ надо поднести к нему снизу одноименный и равный ему заряд q , чтобы сила натяжения нити уменьшилась вдвое?

60. Маленький шарик массой $m = 150$ мг и зарядом $q = 30$ нКл подвешен на нити. На какое расстояние ℓ надо поднести к нему сверху одноименный и равный ему заряд q , чтобы сила натяжения нити увеличилась вдвое?

61. Маленький шарик массой $m = 200$ мг и зарядом $q = 50$ нКл подвешен на нити. На какое расстояние ℓ надо поднести к нему сбоку одноименный и равный ему заряд q , чтобы сила натяжения нити увеличилась вдвое? Заряды удерживают в одной горизонтальной плоскости.

62. Во сколько раз сила тяготения между двумя протонами меньше силы их кулоновского отталкивания?

63. Даны два шарика массой $m = 1$ г каждый. Какой заряд q нужно сообщить каждому шарiku, чтобы сила F взаимного отталкивания зарядов на шариках уравнивала гравитационную силу взаимного притяжения шариков? Шарики находятся в воздухе.

64. На двух одинаковых каплях воды находится по одному лишнему электрону ($e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл). Сила кулоновского отталкивания капель уравнивает силу их взаимного тяготения. Каковы их радиусы?

65. С какой силой (на единицу длины) взаимодействуют две заряженные бесконечно длинные параллельные нити с одинаковой линейной плотностью заряда $\tau = 20$ мкКл/м, находящиеся на расстоянии $r = 10$ см друг от друга?

66. Поверхностная плотность заряда бесконечно протяженной вертикальной плоскости $\sigma = 400$ мкКл/м². К плоскости на нити подвешен заряженный шарик массой $m = 10$ г. Определить заряд q шарика, если нить образует с плоскостью угол $\alpha = 30^\circ$.

67. Две параллельные плоские пластины, находящиеся на расстоянии $d = 10$ см друг от друга, заряжены до разности потенциалов $\Delta\varphi = 1$ кВ. Ка-

кая сила F будет действовать на заряд $q = 10^{-4}$ Кл, помещенный между пластинами?

68. Две параллельные заряженные плоскости, поверхностные плотности которых $\sigma_1 = +20$ мкКл/м² и $\sigma_2 = +75$ мкКл/м², находятся на расстоянии $d = 0,6$ см друг от друга. Определить разность потенциалов $\Delta\phi$ между плоскостями.

69. Поле образовано бесконечной равномерно заряженной плоскостью с поверхностной плотностью заряда $\sigma = +70$ нКл/м². Определить разность потенциалов $\Delta\phi$ двух точек поля, отстоящих от плоскости на $r_1 = 15$ см и $r_2 = 20$ см.

70. Три заряженные водяные капли радиусом $r = 1$ мм каждая сливаются в одну большую каплю. Найти потенциал большой капли, если заряд каждой малой $q = +10^{-10}$ Кл.

71. Четыре заряженные водяные капли массой $m = 1$ мг каждая сливаются в одну большую каплю. Найти поверхностную плотность заряда σ большой капли, если заряд каждой малой $q = -10$ нКл.

72. Шарик, заряженный до потенциала $\phi = 792$ В, имеет поверхностную плотность заряда $\sigma = +333$ нКл/м². Найти радиус r шарика.

73. Тонкий стержень согнут в кольцо радиусом $R = 10$ см. Он равномерно заряжен с линейной плотностью $\tau = +800$ нКл/м. Определить потенциал ϕ в точке, расположенной, на оси кольца на расстоянии $h = 10$ см от его центра.

74. В центре полого металлического шара радиусом $R = 1$ м с зарядом $q_1 = +3,34$ нКл находится маленький шарик с зарядом $q_2 = -6,67$ нКл. Определить потенциалы поля в точках, находящихся от центра шара на расстояниях $r_1 = 0,5$ м; $r_2 = 1$ м; $r_3 = 10$ м.

75. Имеются две металлические концентрические сферы, радиусы которых $R_1 = 5$ см и $R_2 = 10$ см и заряды $q_1 = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл и $q_2 = -10^{-8}$ Кл. Определить напряженность поля E , созданного этими сферами, в точках, отстоящих от центров сфер на расстояниях $r_1 = 3,8$ см и $r_2 = 14$ см. Построить график зависимости напряженности поля от расстояния точки от центра сфер.

76. Электрическое поле образовано бесконечно длинной заряженной нитью, линейная плотность заряда которой $\tau = +20$ нКл/м. Определить разность потенциалов $\Delta\phi$ двух точек поля, отстоящих от нити на расстоянии $r_1 = 8$ см и $r_2 = 12$ см.

77. Тонкая квадратная рамка равномерно заряжена с линейной плотностью заряда $\tau = +200$ нКл/м. Определить потенциал ϕ поля в точке пересечения диагоналей.

78. Электрическое поле образовано положительно заряженной бесконечно длинной нитью. Двигаясь под действием этого поля от точки, находящейся на расстоянии $x_1 = 1$ см от нити, до точки $x_2 = 4$ см, α -частица изменила свою скорость от $v_1 = 2 \cdot 10^5$ м/с до $v_2 = 3 \cdot 10^6$ м/с. Найти линейную

плотность заряда τ на нити.

79. Определить потенциал φ точки поля, созданного металлическим шаром с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 10^{-11} \text{ Кл/см}^2$ и радиусом $R = 1 \text{ см}$, если расстояние от этой точки до поверхности шара $r = 9 \text{ см}$.

80. При радиоактивном распаде из ядра атома полония вылетает α -частица со скоростью $v = 1,6 \cdot 10^7 \text{ м/с}$. Какую разность потенциалов $\Delta\varphi$ надо приложить, чтобы сообщить α -частице такую же скорость?

81. Под действием электростатического поля равномерно заряженной бесконечной плоскости точечный заряд $q = +1 \text{ нКл}$ переместился вдоль силовой линии на расстояние $r = 1 \text{ см}$, при этом совершена работа $A = 50 \text{ мкДж}$. Определить поверхностную плотность заряда σ на плоскости.

82. Под действием электростатического поля равномерно заряженной сферы радиусом $R = 10 \text{ см}$ точечный заряд $q = +1 \text{ нКл}$ переместился вдоль силовой линии на расстояние $r = 1 \text{ см}$, при этом совершена работа $A = 50 \text{ мкДж}$. Определить поверхностную плотность заряда σ на сфере.

83. Бесконечная плоскость заряжена отрицательно с поверхностной плотностью $\sigma = -35,4 \text{ нКл/м}^2$. По направлению силовой линии поля, созданного плоскостью, летит электрон. Определить минимальное расстояние, на которое может подойти к плоскости электрон, если на расстоянии $\ell_0 = 5 \text{ см}$ он имел кинетическую энергию $T = 80 \text{ эВ}$ ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

84. Заряд $q = 1 \text{ нКл}$ перемещается под действием сил однородного электрического поля из одной точки поля в другую, при этом совершается работа $A = 0,2 \text{ мкДж}$. Определить разность потенциалов $\Delta\varphi$ этих точек поля.

85. Определить потенциальную энергию W системы двух точечных зарядов $q_1 = +100 \text{ нКл}$ и $q_2 = +20 \text{ нКл}$, находящихся на расстоянии $r = 5 \text{ см}$ друг от друга.

86. Определить потенциальную энергию W системы трех точечных зарядов $q_1 = +100 \text{ нКл}$, $q_2 = +20 \text{ нКл}$ и $q_3 = -50 \text{ нКл}$, находящихся на одинаковом расстоянии $r = 5 \text{ см}$ друг от друга.

87. Два точечных заряда $q_1 = +12 \text{ мкКл}$ и $q_2 = +24 \text{ мкКл}$ находятся на расстоянии $r_1 = 40 \text{ см}$. Какую работу A надо совершить, чтобы сблизить их до расстояния $r_2 = 20 \text{ см}$?

88. Два точечных заряда $q_1 = +12 \text{ мкКл}$ и $q_2 = -24 \text{ мкКл}$ находятся на расстоянии $r_1 = 20 \text{ см}$. Какую работу A надо совершить, чтобы отдалить их друг от друга до расстояния $r_2 = 40 \text{ см}$?

89. Шарик массой $m = 1 \text{ г}$ перемещается из точки A , потенциал которой $\varphi_A = 600 \text{ В}$, в точку B , потенциал которой $\varphi_B = 0 \text{ В}$ в направлении по силовым линиям. Определить скорость v_A шарика в точке A , если в точке B его скорость $v_B = 200 \text{ см/с}$. Заряд шарика $q = +10 \text{ нКл}$.

90. Шарик массой $m = 1 \text{ г}$ перемещается из точки A , потенциал которой $\varphi_A = 600 \text{ В}$, в точку B , потенциал которой $\varphi_B = 0 \text{ В}$ в направлении по

силовым линиям. Определить скорость v_A шарика в точке A , если в точке B его скорость $v_B = 200$ см/с. Заряд шарика $q = -10$ нКл.

91. На расстоянии $r_1 = 50$ см от поверхности шара радиусом $R = 10$ см, заряженного до потенциала $\phi = 25$ кВ, находится точечный заряд $q = 10^{-8}$ Кл. Какую работу A надо совершить для уменьшения расстояния между шаром и зарядом до $r_2 = 20$ см?

92. Расстояние между зарядами $q_1 = +1$ мкКл и $q_2 = -6,67$ нКл равно $r_1 = 10$ см. Какую работу A надо совершить, чтобы перенести второй заряд в точку, находящуюся от первого заряда на расстоянии $r_2 = 1$ м?

93. Заряд $q_1 = +10$ нКл создает электрическое поле. Какую работу A совершат силы этого поля, если оно переместит заряд $q_2 = 1$ нКл вдоль силовой линии из точки, находящейся от заряда q_1 на расстоянии $r_1 = 15$ см, до расстояния $r_2 = 1$ м?

94. В поле точечного заряда q_1 из точки, отстоящей на расстоянии $r_1 = 5$ см от этого заряда, движется вдоль силовой линии заряд $q_2 = +1$ мкКл. Определить заряд q_1 если при перемещении заряда q_2 на расстояние $s = 50$ см полем совершена работа $A = 180$ мДж.

95. На расстоянии $r_1 = 50$ см от поверхности шара радиусом $R = 5$ см, заряженного до потенциала $\phi = 50$ кВ, находится точечный заряд $q = +10^{-5}$ Кл. Какую работу A надо совершить для уменьшения расстояния между шаром и зарядом до $r_2 = 5$ см?

96. Шарик массой $m = 40$ мг, имеющий заряд $q = +1$ нКл, перемещается из бесконечности со скоростью $v = 12$ см/с. На какое минимальное расстояние может приблизиться шарик к точечному заряду, равному $q = +2$ нКл?

97. В поле, созданном заряженной сферой радиусом $R = 10$ см, движется электрон по радиусу между точками, находящимися на расстояниях $r_1 = 10$ см и $r_2 = 15$ см от центра сферы. При этом скорость электрона изменяется от $v_1 = 2 \cdot 10^5$ м/с до $v_2 = 2 \cdot 10^6$ м/с. Найти поверхностную плотность заряда σ сферы.

98. Поле создано тонким стержнем, который согнут в полукольцо и равномерно заряжен с линейной плотностью $\tau = +20$ нКл/м. В центре полукольца помещен точечный заряд $q = -1$ нКл. Определить работу A , которую надо совершить для перемещения заряда из центра полукольца в бесконечность.

99. Пылинка массой $m = 20$ мкг, несущая на себе заряд $q = +50$ нКл, влетела в электрическое поле в направлении силовых линий. После прохождения разности потенциалов $U = 200$ В пылинка имела скорость $v_2 = 10$ м/с. Определить скорость v_1 пылинки до того, как она влетела в поле.

100. Материальная точка с зарядом $q = +0,67$ нКл, двигаясь в ускоряющем электрическом поле, приобретает кинетическую энергию $T = 10^7$ эВ. Найти разность потенциалов $\Delta\phi$ между начальной и конечной

точками траектории частицы в поле, если ее начальная кинетическая энергия равна нулю.

101. Материальная точка с зарядом $q = +0,67 \text{ нКл}$, двигаясь в ускоряющем электрическом поле, приобретает кинетическую энергию $T_2 = 10^7 \text{ эВ}$. Найти перемещение частицы, если разность потенциалов между начальной и конечной точками траектории частицы в поле $\Delta\varphi = 1200 \text{ В}$, а ее начальная кинетическая энергия $T_1 = 10^6 \text{ эВ}$.

102. Электрон влетел в однородное поле с напряженностью $E = +200 \text{ кВ/м}$ в направлении его силовых линий. Начальная скорость электрона $v_1 = 2 \text{ Мм/с}$. Найти ускорение a , приобретаемое электроном в поле, и скорость v_2 по истечении времени $t = 0,1 \text{ нс}$.

103. Электрон, начальная скорость которого $v_0 = 10^6 \text{ м/с}$, влетел в однородное электрическое поле с напряженностью $E = +100 \text{ В/м}$ так, что начальная скорость электрона противоположна напряженности поля. Найти энергию электрона по истечении времени $t = 10 \text{ нс}$.

104. Заряженная частица, пройдя некоторую разность потенциалов, приобрела скорость $v = 2 \text{ Мм/с}$. Какую разность потенциалов прошла частица, если удельный заряд ее (отношение заряда к массе) $q/m = 47 \text{ МКл/кг}$?

105. Заряженная частица, удельный заряд которой $q/m = 47 \text{ МКл/кг}$, прошла разность потенциалов $U = 50 \text{ кВ}$. Какую скорость приобрела частица, если начальная скорость ее движения $v_0 = 100 \text{ м/с}$?

106. Найти отношение скоростей ионов Cu^+ и K^+ , прошедших одинаковую разность потенциалов U .

107. Ион атома лития Li^+ прошел разность потенциалов $U_1 = 400 \text{ В}$, ион атома натрия Na^+ разность потенциалов $U_2 = 300 \text{ В}$. Найти отношение скоростей этих ионов.

108. Электрон с энергией $T = 100 \text{ эВ}$ (в бесконечности) движется вдоль силовой линии по направлению к поверхности металлической заряженной сферы радиусом $R = 10 \text{ см}$. Определить минимальное расстояние ℓ , на которое приблизится электрон к поверхности сферы, если заряд ее $q = -10 \text{ нКл}$.

109. Пылинка массой $m = 5 \text{ нг}$, несущая на себе $N = 100$ электронов, прошла в вакууме ускоряющую разность потенциалов $U = 1 \text{ МВ}$. Какова кинетическая энергия T пылинки? Какую скорость v приобрела пылинка?

110. При бомбардировке неподвижного ядра калия α -частицей сила отталкивания между ними достигла $F = 100 \text{ Н}$. На какое наименьшее расстояние приблизилась α -частица к ядру атома калия? Какую скорость v имела α -частица вдали от ядра? Влиянием электронной оболочки атома калия пренебречь.