VII. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

пVII.1 Все частицы имеют массу и поэтому подчиняются закону всемирного тяготения. Однако большинство из них способны взаимодействовать друг с другом с силой, которая примерно в 10^{40} раз превосходит силу тяготения. Эта сила называется силой электромагнитного взаимодействия.

Если частицы способны к электромагнитным взаимодействиям, то говорят, что они имеют электрический заряд. Таким образом, заряд – это *количественная мера способности тел к электрическим взаимодействиям*.

Существуют два вида заряда: положительный и отрицательный. Все окружающие нас тела состоят из большого числа положительно и отрицательно заряженных частиц. И хотя электрические силы взаимодействия между зарядами очень велики, непосредственно наблюдать эти силы в любом веществе невозможно, так как сумма положительных зарядов в любом веществе равна сумме отрицательных зарядов. В целом, атомы вещества нейтральны.

пVII.2 Если каким-либо способом из атома изымается несколько электронов, то у него окажется избыток положительного заряда и он называется *положительным ионом*. Аналогично, если в атом попадают избыточные электроны, то получается *отрицательно заряженный ион. Избыток зарядов какого-либо вида в данном теле принято называть величиной его заряда, или количеством электричества.*

пVII.3 Важным свойством электрического заряда является тот факт, что он сохраняется: если какая-то изолированная система (система, из которой не выходят и в которую не входят заряды) обладает определенным зарядом, то его величина остается неизменной:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \ldots + q_n = \text{const}.$$

пVII.4 Силу взаимодействия между двумя точечными зарядами можно определить с помощью закона Кулона: *два неподвижных точечных заряда отталкиваются или притягивают друг друга с силой, пропорциональной произведению модулей зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.* Сила направлена вдоль прямой, соединяющей эти заряды:

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где q_1 и q_2 – величины зарядов, r – расстояние между ними, ε_0 – диэлектрическая постоянная, k – коэффициент пропорциональности. Причем

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8{,}85 \cdot 10^{-12}.$$

В векторной форме закон Кулона записывается так:

$$\vec{F}_{ik} = \frac{q_i q_k}{\vec{r}_{ik}^{\,3}}\vec{r}_{ik},$$

где $\vec{F}_{ik}$ – сила, действующая на заряд q_k со стороны заряда q_i, $\vec{r}_{ik}$ – радиус-вектор, проведенный от заряда q_i к заряду q_k.

В среде с диэлектрической проницаемостью ε сила взаимодействия между зарядами уменьшается в ε раз:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Сила взаимодействия двух зарядов не изменяется при наличии третьего, четвертого и так далее зарядов. Это свойство называется *принципом суперпозиции*, позволяющим определить действие целой системы зарядов на любой заряд:

$$\vec{F} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \ldots + \vec{F}_{1n} \sum_{i=2}^{n} F_{1i}.$$

пVII.5 Любой электрический заряд создает вокруг себя электростатическое поле $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$. Поле, созданное точечным зарядом q_0, равно $E = k\frac{q_0}{r^2}$.

Если в пространстве есть несколько зарядов, то результирующее поле равно сумме полей каждого из зарядов:

$$\vec{E}_p = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_n.$$

Заряд, помещенный на проводник, распределяется по его поверхности таким образом, чтобы поле внутри проводника было равно нулю.

Напряженность поля заряженной проводящей сферы (шара)

$$E = \begin{cases} 0 & \text{при} \quad r < R_0; \\ k\dfrac{Q}{r^2} & \text{при} \quad r \geq R_0, \end{cases}$$

где R_0 — радиус сферы.

Напряженность поля, созданного проводящей заряженной бесконечной пластиной

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{Q}{2S\varepsilon\varepsilon_0}.$$

пVII.6 Каждая точка пространства, в котором существует поле, характеризуется своим потенциалом φ. Потенциал – это работа, которую нужно совершить, чтобы перенести единичный положительный заряд из бесконечности в данную точку пространства.

Работа по перемещению положительного заряда из одной точки пространства в другую

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU,$$

где U напряжение между точками *1* и *2*.

Работа по перемещению зарядов не зависит от формы траектории и определяется только величиной заряда и его положением в электростатическом поле.

Потенциал поля точечного заряда в вакууме

$$\varphi = k\frac{q_0}{r} = \frac{q_0}{4\pi\varepsilon_0 r}.$$

Потенциал положительного точечного заряда положителен и убывает с расстоянием от заряда, а потенциал отрицательного заряда — отрицателен и увеличивается при удалении от заряда.

При наличии нескольких точечных зарядов общий потенциал в некоторой точке поля равен алгебраической сумме потенциалов, созданных отдельными зарядами, т. е.

$$\varphi = \sum k\frac{q_i}{r_i} = k\sum\frac{q_i}{r_i}.$$

Потенциал заряженной проводящей сферы (шара)

$$\varphi = \begin{cases} k\dfrac{q_0}{r} & \text{при} \quad r \ge R_0; \\ k\dfrac{q_0}{R_0} & \text{при} \quad r \le R_0. \end{cases}$$

пVII.7 Связь между напряженностью E и разностью потенциалов двух точек в однородном электростатическом поле определяется формулой

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U}{d},$$

где U — напряжение между двумя точками, d — расстояние между этими точками.

пVII.8 При помещении зарядов в диэлектрическую среду с проницаемостью ε кроме поля, создаваемого свободными зарядами, необходимо учитывать и поле связанных зарядов. Поэтому в однородном диэлектрике напряженность электростатического поля (как и сила взаимодействия и потенциал) уменьшается в ε раз по сравнению с вакуумом.

пVII.9 Коэффициент пропорциональности между зарядом, находящимся на уединенном проводнике, и его потенциалом называется емкостью этого проводника:

$$q = C\varphi.$$

Емкость уединенного шарика $C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R$.

Два изолированных друг от друга проводника, заряженных равными по модулю, но противоположными по знаку зарядами, образуют конденсатор, емкость которого определяется по формуле

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}\text{ , или } q = CU.$$

Емкость конденсатора с диэлектриком, заполняющим пространство между обкладками конденсатора, увеличивается в ε раз, т. е.

$$C = \varepsilon C_0.$$

Емкость плоского конденсатора $C = \dfrac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$.

Емкость сферического конденсатора $C = \dfrac{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 ab}{b-a}$,

где a и b – радиусы концентрических сфер.

пVII.10 При последовательном соединении нескольких конденсаторов общая емкость определяется формулой

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}.$$

При параллельном соединении конденсаторов общая емкость

$$C = C_1 + C_2 + +C_n = \sum_{i=1}^{n} C_i.$$

пVII.11 Энергия заряженного конденсатора

$$W = \frac{QU}{2} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}.$$

пVII.12 При внесении заряда q из бесконечно удаленной точки в поле, созданное другими зарядами, совершается работа $A = q\varphi$, где φ — потенциал точки поля, куда поместили заряд q. Например, если заряд q вносится в поле, созданное точечным зарядом q_0, из бесконечно удаленной точки, то совершается работа

$$A = q\varphi = \frac{qkq_0}{r} = k\frac{qq_0}{r},$$

где $k = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon}$, r — расстояние между зарядами q и q_0.

Эту работу называют потенциальной энергией взаимодействия зарядов q_0 и q.

Задача VII.1 Два положительных точечных заряда $q_1 = 4q$ и $q_2 = q$ закреплены на расстоянии a друг от друга. Где нужно расположить заряд Q, чтобы он находился в равновесии? При каких условиях равновесие заряда Q будет устойчивым и неустойчивым?

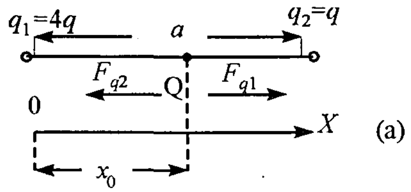


Рис. VII.1

Решение. Пусть заряд Q будет положительным и расположен на расстоянии x_0 от заряда q_1 (*рис. VII.1, а*). На заряд Q действуют две силы со стороны зарядов q_1 и q_2. Условие равновесия для заряда Q запишется:

$$\vec{F}_{q_1} + \vec{F}_{q_2} = 0.$$

В проекциях на ось $0X$ это уравнение имеет вид:

$$F_{q_1} - F_{q_2} = 0, \text{ или } F_{q_1} = F_{q_2} \qquad (1)$$

Из условия равновесия (1) следует

$$k\frac{q_1 Q}{x_0^2} = k\frac{q_2 Q}{(a - x_0)^2}. \qquad (2)$$

Подставляя значения зарядов q_1 и q_2, получим

$$4Q(a - x_0)^2 = Qx_0^2, \text{ или } 3x_0^2 - 8ax_0 + 4a^2 = 0. \qquad (3)$$

Решаем уравнение (3):

$$x_{1,2} = \frac{4a \pm \sqrt{16a^2 - 12a^2}}{3} = \frac{4a \pm 2a}{3};$$

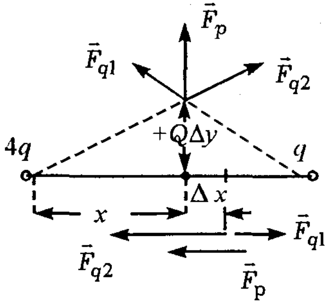
$$x_1 = a/3; \; x_2 = 2a.$$

Из этих двух решений физический смысл имеет только решение $x_1 = a/3$, так как если заряд поместить на расстоянии $x_2 = 2a$ от точки 0, то равновесия быть не может, поскольку силы, действующие со стороны зарядов q_1 и q_2, направлены в одну сторону.

Следует отметить, что заряд Q может быть любым по величине и по знаку. Это следует из уравнения (2), в котором Q сокращается.

Для определения характера равновесия следует рассмотреть силы, возникающие при малом смещении заряда Q из положения равновесия.

Пусть Q – положительный заряд. При продольном смещении Q вправо на Δx увеличивается сила



(б)

Рис. VII.1

отталкивания $\vec{F}_{q_2}$ (так как уменьшается расстояние между зарядами Q и q_2) и уменьшается сила $\vec{F}_{q_1}$ (увеличивается расстояние между зарядами Q и q_1). Поэтому результирующая этих двух сил $\vec{F}_p$ будет возвращать заряд Q в первоначальное положение равновесия (*рис. VII.1, б*). Это означает, что при продольном смещении положительного заряда Q положение равновесия устойчивое.

Если заряд Q сместить по вертикали от положения равновесия на величину Δy, то возникает результирующая сила $\vec{F}_p = \vec{F}_{q_1} + \vec{F}_{q_2}$, которая удалит заряд Q еще дальше от положения равновесия (*рис. VII.1, б*). Следовательно, при поперечном смещении положительного заряда Q равновесие будет неустойчивым.

Пусть заряд Q – отрицательный. При продольном смещении заряда Q вправо на Δx увеличивается сила притяжения $\vec{F}_{q_2}$ и уменьшается сила $\vec{F}_{q_1}$. Результирующая этих двух сил $\vec{F}_p$ будет удалять отрицательный заряд Q еще дальше от положения равновесия (*рис. VII.1, в*). Это значит, что при продольном смещении отрицательного заряда Q

положение равновесия неустойчивое.

Если заряд Q сместить по вертикали от положения равновесия на величину Δy, то возникает результирующая сила

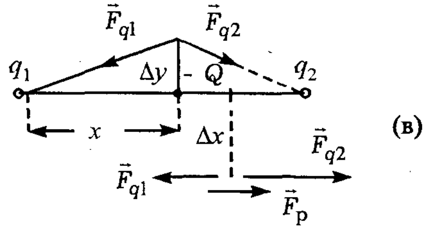


Рис. VII.1

$\vec{F}_p = \vec{F}_{q_1} + \vec{F}_{q_2}$, которая возвращает заряд Q в положение равновесия. Следовательно, при поперечном смещении отрицательного заряда Q равновесие устойчивое.

Задача VII.2 На проволочное металлическое кольцо радиусом R помещен заряд Q. Определить напряженность поля в точке A, лежащей на оси кольца на расстоянии x_0 от центра 0 (*рис. VII.2*).

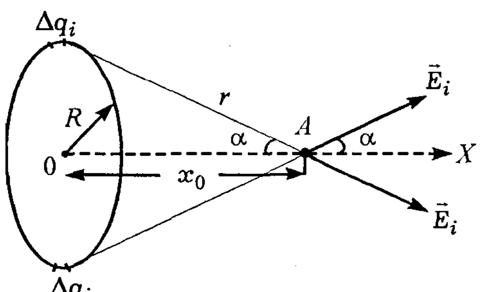


Рис. VII.2

Решение. Напряженность поля, созданного заряженным кольцом в точке A, является векторной суммой полей, созданных всеми отдельными точечными зарядами Δq_i, которые находятся на маленьком участке кольца Δl_i. Заряд

$$\Delta q_i = \frac{Q}{2\pi l}\Delta l_i. \qquad (1)$$

Рассмотрим два точечных заряда Δq_i, находящихся на противоположных концах диаметра. Результирующее поле этих двух зарядов направлено вдоль оси 0X и равно

$$E_{p_i} = 2E_i \cos\alpha = 2k\frac{\Delta q_i}{r^2}\frac{x_0}{r} = 2k\frac{\Delta q_i x_0}{r^3}. \qquad (2)$$

Подставляя выражение для заряда Δq_i в уравнение (2), получим

$$E_{p_i} = 2k\frac{Q\Delta l_i}{2\pi R}\frac{x_0}{r^3} = k\frac{Q\Delta l_i x_0}{\pi R\left(x_0^2 + R^2\right)^{3/2}}.$$

Результирующее поле всего заряженного кольца

$$E_A = \sum E_{p_i} = \frac{kQx_0}{\pi R\left(x_0^2 + R^2\right)^{3/2}}\sum \Delta l_i.$$

Следует отметить, что $\sum \Delta l_i = \pi R$, поскольку мы рассматриваем суммарное поле E_{p_i} от двух заряженных участков Δl_i. Следовательно:

$$E_A = \frac{Qx_0}{4\pi^2\varepsilon_0 R\left(x_0^2 + R^2\right)^{3/2}}\pi R = \frac{Qx_0}{4\pi\varepsilon_0\left(x_0^2 + R^2\right)^{3/2}}.$$

Анализируя полученную формулу, можно заметить, что в центре кольца $(x_0 = 0)$ поле $E_A = 0$. Оно также обращается в нуль при $x_0 \to \infty$.

Задача VII.3 Определить напряженность поля электрического диполя в точке, отстоящей от оси диполя на расстоянии r, в двух случаях:

1) точка A лежит на прямой, проходящей через ось диполя;

2) точка B лежит на прямой, перпендикулярной оси диполя (*рис. VII.3*).

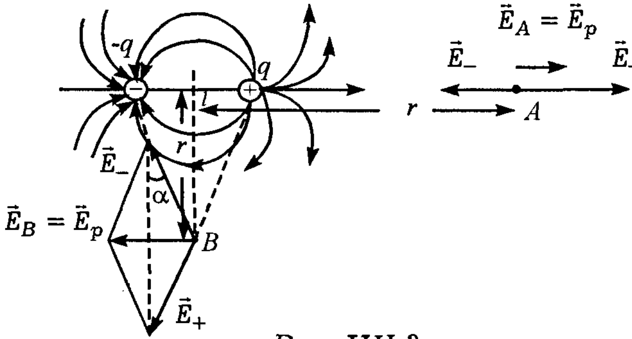


Рис. VII.3

Решение. Электрическим диполем называется совокупность двух равных по величине и противоположных по знаку точечных зарядов, расположенных друг от друга на некотором расстоянии l, малом по сравнению с расстоянием до точек, в которых проводится измере́ние напряженности электрического поля. Прямая, проходящая через заряды, называется осью диполя. Электрическим моментом диполя называется вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному и равный $\vec{p} = q\vec{l}$.

Каждый заряд диполя создает вокруг себя электрическое поле. Суммарное поле $\vec{E}$ определяется по правилу сложения векторов.

Вычислим напряженность поля, создаваемую диполем вдоль его оси в некоторой точке A. Результирующее поле определяется векторной суммой полей отдельных зарядов, т. е. $\vec{E}_A = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$. В проекции вдоль оси диполя

$$E_A = E_+ + E_- = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{q}{\left(r - l/2\right)^2} - \frac{q}{\left(r + l/2\right)^2}\right],$$

где r – расстояние от центра диполя до точки наблюдения A.

Так как $l << r$, то

$$E_A = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q2lr}{r^4} = \frac{2ql}{4\pi\varepsilon_0 r^3} = \frac{P}{2\pi\varepsilon_0 r^3}. \quad (1)$$

Направление вектора $\vec{E}$ определяется направлением дипольного момента $\vec{p}$.

Для точек, лежащих на прямой, перпендикулярной оси, величина векторов $\vec{E}_+$ и $\vec{E}_-$ одинакова.

$$\left|\vec{E}_+\right| = \left|\vec{E}_-\right| = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{\left[r^2 + \left(l/2\right)^2\right]},$$

а результирующий вектор $\vec{E}_B = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$, причем

$$\left|\vec{E}_B\right| = 2E_+ \sin\alpha = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2q\left(l/2\right)}{\left(r^2 + l^4/4\right)^{3/2}} = \frac{P}{4\pi\varepsilon_0 r^3}. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) видно, что напряженность поля диполя убывает пропорционально $1/r^3$, т. е. быстрее, чем поле точечного заряда. Картина распределения поля электрического диполя представлена на рис VII.3.

ЗадачаVII.4 В центре полой проводящей незаряженной сферы помещен точечный заряд q_0.

1) Где и какие электрические поля будут существовать?

2) Будут ли появляться заряды на сфере?

3) Будут ли происходить изменения электрического поля внутри и вне сферы при перемещении заряда внутри сферы?

4) Как будет меняться поле внутри и вне сферы, если заряд останется неподвижным, а внешнюю поверхность сферы заземлить на короткое время, а затем заряд осторожно вывести из полости сферы, не касаясь ее, через маленькое отверстие?

5) Где и какие заряды на сфере будут существовать, если точечный заряд поднести снаружи к незаряженной сфере?

Решение.

Внутри полой проводящей сферы будет существовать поле, определяемое по формуле для поля точечного заряда $E = \dfrac{q_0}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$. На внутренней поверхности сферы наведется заряд $-q_0$, который расположен равномерно по внутренней поверхности. Так как сфера нейтральна, на ее внеш-

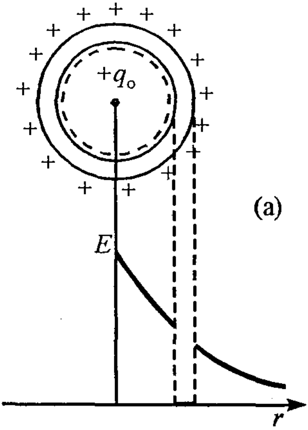


Рис. VII.4

ней поверхности равномерно расположен заряд $+q_0$. Внутри металлического слоя поле равно нулю. Вне сферы поле определяется зарядом $+q_0$ по формуле для поля точечного заряда (*рис. VII.4, а*).

При перемещении заряда внутри сферы изменяется электрическое поле внутри сферы, изменяется распределение отрицательного заряда на внутренней поверхности сферы (*рис. VII.4, б*).

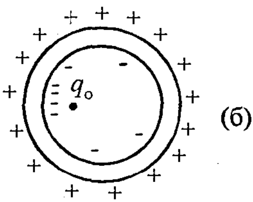
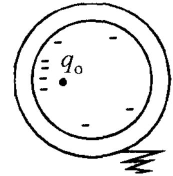


Рис. VII.4

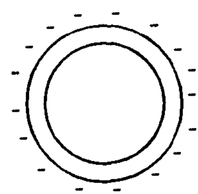
Однако распределение положительного заряда на внешней поверхности сферы, а следовательно, и поле вне сферы изменяться не будет. Это связано с тем, что поле внутри металлического слоя равно нулю, поэтому изменение поля внутри сферы не влияет на распределение зарядов на ее внешней поверхности.

При заземлении на некоторое время внешней поверхности сферы все положительные заряды «уйдут» в землю (на самом деле из поверхности земли, которая является хорошим проводником, на внешнюю поверхность сферы придут электроны, которые компенсируют ее положительный заряд). В этом случае внутри сферы поле будет существовать, а вне ее поле равно нулю (*рис. VII.4, в*). После выведения заряда q_0 из полости сферы отрицательные заряды начнут расталкиваться до тех пор, пока не распределяться равномерно на внешней поверхности сферы. В этом случае поле внутри сферы равно нулю, а вне сферы существует электрическое поле, подобное полю точечного заряда $-q_0$, помещенного в центре сферы (*рис. VII.4, г*).



(в)

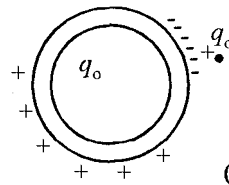
Рис. VII.4



(г)

Рис. VII.4

Если же заряд q_0 поднести к сфере снаружи, то на внешней поверхности сферы образуется наведенный (индуцированный) заряд, который распределен, как указано на *рис. VII.4, д*. Вне сферы результирующее поле определяется суммой полей заряда q_0 и индуцированных зарядов. Внутри сферы поле равно нулю.



(д)

Рис. VII.4

Задача VII.5 Вблизи бесконечной незаряженной металлической пластины помещен заряд $+q_0$. Будут ли появляться заряды на плоскости? Где и какие (*рис. VII.5*)?

Решение. При помещении бесконечной пластины в поле точечного заряда q_0 в первое мгнове-

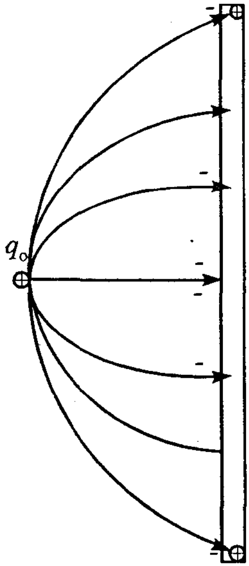


Рис. VII.5

ние в пластине будет существовать поле, которое стремится положительные заряды удалить в бесконечность, а отрицательные заряды приблизить к заряду q_0. Перемещение зарядов внутри проводника происходит до тех пор, пока результирующее поле внутри него не обратится в нуль. После этого движение зарядов внутри проводника прекратится. Все заряды будут распределены на поверхности проводника таким образом, чтобы поле внутри него было равно нулю.

На левой стороне плоскости возникает индуцированный отрицательный заряд, распределенный неравномерно: плотность заряда тем больше, чем ближе соответствующий участок поверхности к заряду q_0. Положительные заряды ушли в бесконечно удаленные части плоскости (*рис. VII.5*).

Слева от плоскости поле в любой точке пространства определяется векторной суммой полей заряда q_0 и распределенного по плоскости индуцированного заряда.

Справа от плоскости поле равно нулю.

Другими словами, незаряженная бесконечная пластина экранирует часть пространства, лежащую справа от пластины, от всех полей. Если пластина не закреплена, то заряд и пластина притягиваются друг к другу.

Задача VII.6 В однородное электрическое поле с напряженностью E_0 перпендикулярно полю внесли большую металлическую пластину с площадью S (*рис. VII.6*). Какой заряд индуцируется на каждой ее стороне?

Решение. В незаряженном металлическом проводнике имеется огромное количество электронов (свободных зарядов), которые движутся хаотически. Под действием электрического поля заряженные частицы начинают двигаться упорядоченно. Принято говорить, что положительные заряды перемещаются в направлении поля, а отрицательные – против поля. (На самом деле в металле при наличии поля перемещаются лишь электроны. Положительные заряды (ядра атомов) не могут перемещаться. Они образуют кристаллическую решетку. Те части проводника, откуда электроны ушли, заряжаются положительно.) Таким образом, в нашей задаче на левой стороне пластины индуцируются отрицательные заряды, а на правой – положительные. Эти заряды равны по величине, так как пластина не заряжена (*рис. VII.6*).

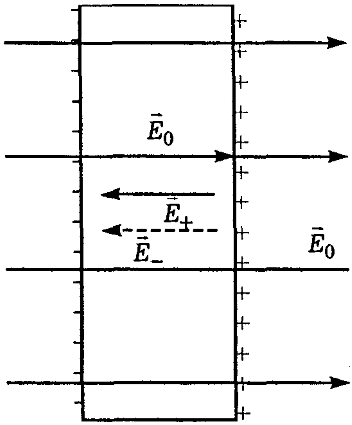


Рис. VII.6

Внутри металлической пластины суммарное поле, состоящее из внешнего поля $\vec{E}_0$, поля отрицательных зарядов $\vec{E}_-$ и поля положительных зарядов $\vec{E}_+$, равно нулю, т. е.

$$E_0 - E_+ - E_- = 0.$$

Воспользовавшись выражением для поля, созданного проводящей бесконечной заряженной пластиной (пVII.5), запишем

$$E_0 - \frac{Q}{2S\varepsilon_0} - \frac{Q}{2S\varepsilon_0} = 0.$$

Следовательно, искомый заряд $Q = E_0 S \varepsilon_0$.

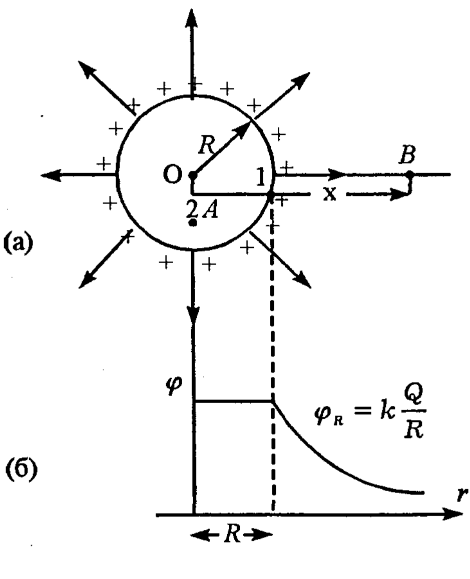


Рис. VII.7

Задача VII.7 Металлический шар радиуса R заряжен зарядом Q. Определить потенциал в любой точке внутри шара и в точке B, расположенной на расстоянии $x > R$ от центра шара (*рис. VII.7, а*).

Решение. Потенциал заряженного металлического шара (или сферы) на самой поверхности и вне ее определяется по формуле для потенциала точечного заряда, помещенного в центре O, поскольку поле, созданное заряженным шаром (или сферой) вне поверхности шара, в точности совпадает с полем одинакового по величине точечного заряда, помещенного в центре шара.

Определим потенциал внутри заряженного шара (сферы). Мысленно перенесем положительный заряд q_0 из точки 1, лежащей на поверхности шара, в произвольную точку 2 внутри шара. При этом мы совершим работу, определяемую формулой $A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2)$ (см. пVII.6). С другой стороны, $A_{12} = F\Delta l = q_0 E\Delta l$.

Приравнивая эти два выражения, получим

$$q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0 E\Delta l.$$

Так как поле внутри металла равно нулю $(E = 0)$, то $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$, или $\varphi_1 = \varphi_2$. Поскольку точка 2 взята произвольно, то можно сделать вывод, что потенциал любой точки внутри металлического шара равен потенциалу на его поверхности.

График изменения потенциала φ заряженного шара с расстоянием r приведен на *рис. VII.7, б.*

Таким образом, потенциал в точке A

$$\varphi_A = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R},$$

а потенциал в точке B определяется по формуле потенциала для точечного заряда

$$\varphi_{в} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 x}.$$

Задача VII.8 Металлический шар радиуса R, заряженный до потенциала φ, окружают сферической проводящей оболочкой радиуса R_1. Как изменится потенциал шара после того, как он будет на короткое время соединен проводником с оболочкой (*рис. VII.8*)?

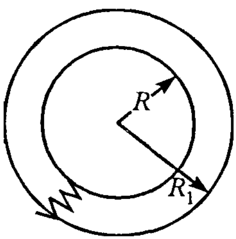


Рис. VII.8

Решение. Потенциал металлического заряженного шара радиуса R равен (см. пVII.6) $\varphi = k\dfrac{Q}{R}$, поэтому заряд, находящийся на шаре: $Q = \dfrac{\varphi R}{k}$. При соединении шара с металлической оболочкой радиуса R_1 весь заряд перетечет на внешнюю сторону оболочки, и она теперь становится заряженной зарядом Q. (Вспомним, что внутри проводящего шара (сферы) поле всегда равно нулю и заряды отсутствуют!) Теперь потенциал этой оболочки равен:

$$\varphi_1 = k\frac{Q}{R_1} = \varphi\frac{R}{R_1}.$$

Этот потенциал будет таким же и в любой точке внутри оболочки, а значит, и у шара радиуса R.

Таким образом, изменение потенциала шара

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi = k\frac{Q}{R_1} - k\frac{Q}{R} = \frac{k\varphi R}{k}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R}\right) = \varphi\left(\frac{R}{R_1} - 1\right).$$

Задача VII.9 Сфера радиуса R заряжена зарядом Q. Ее окружают незаряженным металлическим шаровым слоем с радиусами R_1 и R_2. Определить поле E и потенциал φ в точках A, B, C (*рис. VII.9*). Расстояния от центра сферы до точек A, B, C известны: r_A, r_B, r_C. Нарисовать график зависимости электростатического поля и потенциала от расстояния r.

Решение. Положительный заряд Q наводит на внутренней поверхности шарового слоя заряд $-Q$. Так как шаровой слой был не заряжен, то на его внешней поверхности появится положительный равномерно распределенный заряд $+Q$. Электростатическое поле (так же, как и потенциал) в любой точке пространства будет определяться суммой полей, созданных всеми заряжен-

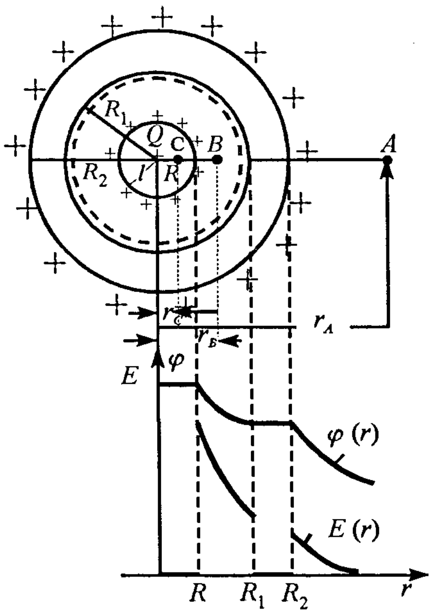


Рис. VII.9

ными поверхностями с радиусами R, R_1, R_2:

$$E_A = k\frac{Q}{r_A^2}, \ \varphi_A = \frac{kQ}{r_A}, \text{ где } k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.$$

Поля от заряженных поверхностей радиусов R_1 и R_2 (как и потенциал), складываясь, дают результирующее поле в точке A, равное нулю.

В точке B поле от заряженных поверхностей шарового слоя равно нулю, и остается лишь поле, созданное зарядом Q, находящимся на сфере радиуса R, т. е.

$$E_B = k\frac{Q}{r_B^2}.$$

Потенциал в точке B складывается из потенциала, который создает сфера радиуса R, и сферические поверхности шарового слоя с радиусами R_1 и R_2, т. е.

$$\varphi_B = \varphi_R + \varphi_{R_1} + \varphi_{R_2} = k\frac{Q}{r_B} - k\frac{Q}{R_1} + k\frac{Q}{R_2}.$$

Поле в точке C от всех трех заряженных поверхностей равно нулю (внутри любой заряженной сферической поверхности поле равно нулю), т. е.

$$E_C = 0.$$

Потенциал в точке С равен сумме потенциалов, созданных всеми заряженными поверхностями, т.е.

$$\varphi_C = \varphi_R + \varphi_{R_1} + \varphi_{R_2} = k\frac{Q}{R} - k\frac{Q}{R_1} + k\frac{Q}{R_2}.$$

Графики изменения электростатического поля и потенциала с расстоянием изображен на *рис.VII.9.*

Задача VII.10 Две параллельные металлические пластины соединены с источником напряжения с ЭДС $\mathcal{E}$ (*рис. VII.10, а*). Параллельно им вводят еще две металлические пластины, так что расстояние между каждой из пластин равно d.

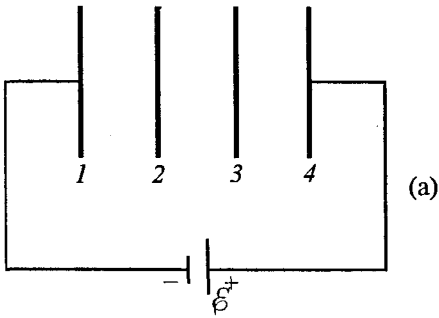


Рис. 7.10

1) Определить потенциал каждой из четырех пластин и поле во всех трех промежутках между пластинами.

2) Как изменятся потенциалы пластин и напряженности полей во всех промежутках, если пластины *2* и *3* на короткое время замкнуть?

3) Как изменятся заряды на пластинах *1* и *4*?

4) Будут ли пластины *2* и *3* заряжены до и после замыкания?

Решение. Будем отсчитывать потенциалы всех пластин относительно первой пластины, т. е. ее потенциал примем за нуль $(\varphi_1 = 0)$. Тогда из схемы ясно видно, что потенциал пластины *4* равен $\mathcal{E}$.

Так как все пластины одинаковы и находятся на равном расстоянии друг от друга, то падение напряжения на каждом промежутке между пластинами равны, т. е. $U_{21} = U_{32} = U_{43} = \mathcal{E}/3$. Следовательно:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = U_{21} = \frac{\mathcal{E}}{3}, \text{ или } \varphi_2 = \frac{\mathcal{E}}{3} - 0 = \frac{\mathcal{E}}{3};$$

$$\varphi_4 - \varphi_3 = U_{43} = \frac{\mathcal{E}}{3}, \text{ откуда } \varphi_3 = \varphi_4 - \frac{\mathcal{E}}{3} = \frac{2}{3}\mathcal{E}.$$

Распределение зарядов на пластинах изображено на *рис. VII.10, б.*

Во всех трех промежутках электростатическое

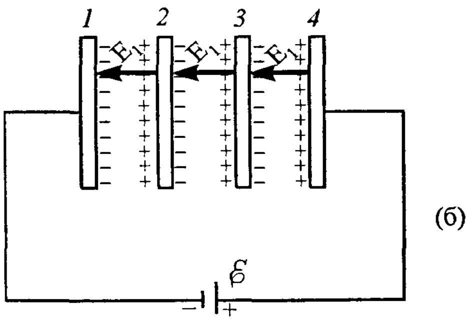


Рис. VII.10

поле направлено справа налево, одинаково по величине и равно $E_1 = U/d = \mathcal{E}/3d$. Если пластины *2* и *3* на короткое время замкнуть, то отрицательные заряды пластины *2* перейдут на пластину *3* и компенсируют положительные заряды этой пластины. Положительные заряды пластины *2* и отрицательные заряды пластины *3* останутся на месте, так как они удерживаются силами притяжения зарядов, расположенных на соседних пластинах *1* и *4*. Таким образом, распределение зарядов на пластинах изменится (*рис. VII.10, в*). В этом случае электрическое поле будет только между пластинами *1–2* и *3–4*. Поле между пластинами *2–3* равно нулю. А это значит, что пластины *2–3* мож-

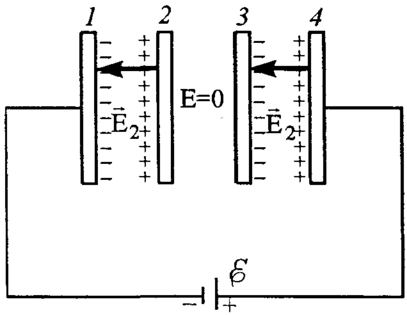


Рис. VII.10

но мысленно (а можно и реально) соединить металлическим проводником и при этом в схеме ничего не изменится (ведь в проводнике поле всегда равно нулю!). Теперь потенциал пластины *1* равен по-прежнему нулю $(\varphi_1 = 0)$, потенциал пластины *4* $\varphi_4 = \mathscr{E}$, а потенциалы пластин *2* и *3* одинаковы и равны: $\varphi_2 = \varphi_3 = \mathscr{E}/2$. Следовательно, поле E_2 между пластинами *1–2* и *3–4* увеличится, так как оно определяется формулой

$$E_2 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{d} = \frac{\varphi_4 - \varphi_3}{d} = \frac{\mathscr{E}}{2d}.$$

Однако мы знаем (пVII.6), что электрическое поле, созданное зарядами, расположенными на поверхностях металлических пластин, пропорционально величине зарядов:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{Q}{2S\varepsilon\varepsilon_0}.$$

Поэтому поле в промежутках *1*–*2* и *3*–*4* может увеличиться только за счет увеличения зарядов на пластинах *1* и *4*, которые дополнительно притекают из источника ЭДС до тех пор, пока потенциалы пластин *2* и *3* не выравняются. Пластины *2* и *3* до замыкания были не заряжены, а после замыкания пластина *2* оказалась заряженной положительно, а пластина *3* — отрицательно.

Задача VII.11 Металлическому шару радиуса R_1 собщили заряд Q, а затем соединили его очень длинным и тонким проводом с металлическим незаряженным шаром радиуса R_2. Как распределится заряд между шарами?

Решение. После соединения шаров начнется перемещение заряда от шара с большим потенциалом к шару с меньшим потенциалом. Это перемещение будет происходить до тех пор, пока потенциалы шаров не выравняются. Конечный потенциал шаров определяется формулой (см.пVII.6)

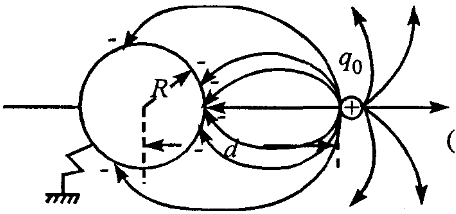
$$\varphi = k\frac{q_1}{R_1} = k\frac{q_2}{R_2},$$

где q_1 и q_2 установившиеся заряды шаров.

В силу закона сохранения заряда $q_1 + q_2 = Q$. Решая совместно эти два уравнения, получим

$$q_1 = \frac{QR_1}{R_1 + R_2}; \ \ q_2 = \frac{QR_2}{R_1 + R_2}.$$

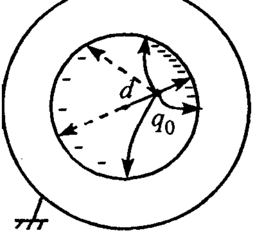
Задача VII.12 Точечный заряд q_0 находится на расстоянии d от центра заземленной проводящей сферы радиуса R. Определить полный заряд q, индуцированный на поверхности сферы. Рассмотреть два случая: $d > R$ и $d < R$ (*рис. VII.11, а, б*).



(а)

Рис. VII.11

Решение. Рассмотрим случай $d > R$. Так как сфера соединена с Землей, то ее потенциал, так же как и потенциал всех точек внутренней полости сферы, равен потенциалу Земли, т.е. равен нулю. Электрическое поле в любой точке пространства создается зарядом q_0 и зарядом q, индуцированным на поверхности сферы. При этом заряд q распределен неравномерно, но



(б)

Рис. VII.11

таким образом, чтобы результирующая напряженность поля внутри сферы стала равной нулю.

Потенциал в любой точке пространства представляет собой сумму потенциалов полей, создаваемых точечным зарядом q_0 и точечными зарядами Δq_i, на которые можно разбить распределенный по внешней поверхности сферы индуцированный заряд q. Тогда для точки, расположенной в центре сферы:

$$\varphi_0 = \sum k\frac{\Delta q_i}{R} + k\frac{q_0}{d} = 0$$ (так как сфера заземлена),

или $k\dfrac{q}{R} + k\dfrac{q_0}{d} = 0.$

Отсюда индуцированный заряд $q = -q_0 R/d$. Знак «$-$» означает тот факт, что индуцированный заряд всегда противоположного знака по сравнению с зарядом q_0. Из полученной формулы видно, что величина индуцированного заряда зависит от расстояния d. При удалении заряда q_0 в бесконечность индуцированный заряд стремится к нулю, при приближении к сфере заряда q_0 $(d \to R)$ величина индуцированного заряда стремится к q_0.

Рассмотрим случай $d < R$.

В этом случае вне сферы поле равно нулю. Внутри сферы поле есть — оно создается зарядом q_0, а индуцированные заряды расположены неравномерно на внутренней поверхности сферы.

Определим величину этого заряда. Ее легко определить, если воспользоваться картиной силовых линий. Силовые линии электростатического поля всегда начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных, а число силовых линий однозначно связано с величиной заряда. Так как вне сферы поля нет, то нет и силовых линий. Следовательно, все силовые линии начались на заряде q_0 и окончились на индуцированных зарядах q. Откуда следует, что полный заряд $q_0 + q = 0$. Следовательно, $q = -q_0$. Величина индуцированного заряда q не зависит от расположения заряда q_0 внутри сферы. При перемещении заряда q_0 внутри сферы меняется лишь распределение индуцированного заряда на внутренней поверхности сферы.

Задача VII.13 Два электрона находятся на бесконечно большом расстоянии друг от друга. Один из них вначале покоится, а другой движется со скоростью $\vec{v}_0$, направленной к центру первого. На какое наименьшее расстояние они сблизятся (излучением электромагнитной энергии пренебречь)?

Решение. Электростатическое взаимодействие двух электронов тормозит движущийся электрон и ускоряет ранее покоящийся. В начальный момент потенциальная энергия взаимодействия системы из двух электронов равна нулю, а кинетическая энергия $E_K = \dfrac{mv_0^2}{2}$. В любой момент времени полная энергия электронов складывается из потенциальной энергии взаимодействия зарядов и их кинетической энергии, т. е. закон сохранения полной энергии имеет вид

$$\frac{mv_0^2}{2} = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{mv_2^2}{2} + \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r},$$

где v_1 и v_2 – скорости электронов, m – их масса, r – расстояние между зарядами, e – заряд электрона.

Кроме того, для электронов необходимо записать закон сохранения импульса

$$mv_0 = mv_1 + mv_2.$$

Наибольшее сближение электронов происходит тогда, когда их скорости станут одинаковыми (в этом случае скорость первого электрона относительно второго равна нулю, т. е. относительно второго электрона он останавливается). Из закона сохранения импульса следует, что в этот момент $v_1 = v_2 = {}^{v_0}\!/_2$, а закон сохранения энергии для этого момента запишется так:

$$\frac{mv_0^2}{2} = 2\frac{m}{2}\left(\frac{v_0}{2}\right)^2 + \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_{\min}},$$

отсюда $r_{\min} = \dfrac{e^2}{\pi\varepsilon_0 m v_0^2}$.

Задача VII.14 Металлический шар радиуса R, имеющий заряд q_0, помещен внутри диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε (*рис. VII.12*). Определить величину и знак поляризационного заряда $q_п$ и плотность его распределения.

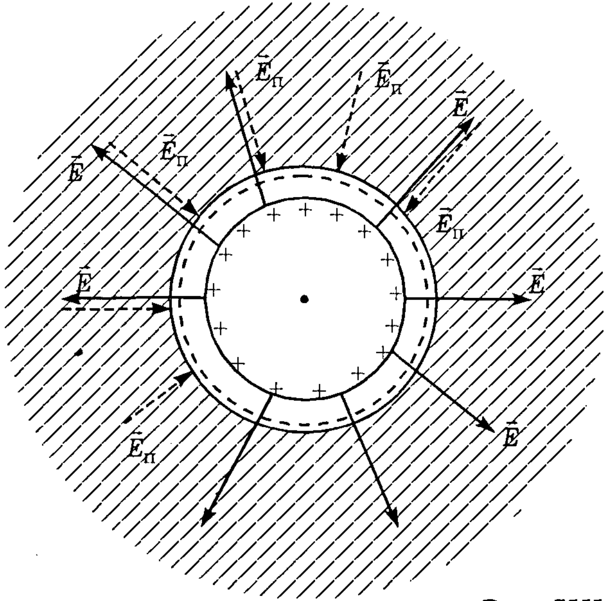


Рис. VII.12

Решение. При отсутствии диэлектрика поле, создаваемое заряженным шаром, в любой точке вне шара определяется по формуле (пVII.5)

$$E = k\frac{q_0}{r^2},$$

где $k = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}$.

Если же шар окружен безграничным диэлектриком, то результатирующее поле внутри диэлектрика

$$E_р = k\frac{q_0}{\varepsilon r^2}.$$

Уменьшение напряженности электрического поля при погружении заряженного шара или любого заряженного тела в диэлектрик объясняется появлением поляризационных зарядов $q_п$, выступающих на границе диэлектрика у поверхности заряженного шара. Именно поле этих поляризационных зарядов $\left(\vec{E}_п\right)$ приводит к уменьшению поля в диэлектрике (*рис.VII.12*). Вычислим поле, созданное поляризационными зарядами:

$$E_р = E - E_п, \text{ или } E_п = E - E_р = k\frac{q_0}{r^2}\frac{(\varepsilon - 1)}{\varepsilon}. \quad (1)$$

Поляризационные заряды расположены равномерно по поверхности сферы, окружающей шар, поэтому поле этих зарядов $E_п$ можно определить еще и по формуле

$$E_п = k\frac{q_п}{r^2}. \quad (2)$$

Приравнивая выражения (1) и (2), получим, что поляризационный заряд

$$q_п = \frac{(\varepsilon - 1)}{\varepsilon}q_0.$$

Поверхностная плотность поляризационных зарядов

$$\sigma_п = \frac{q_п}{S} = \frac{q_п}{4\pi R^2} = \frac{(\varepsilon - 1)q_0}{\varepsilon 4\pi R^2} = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}\sigma_0,$$

где σ_0 – плотность зарядов на шаре. Отсюда

$$\sigma_п = \frac{(\varepsilon - 1)}{\varepsilon}\frac{q_0}{4\pi R^2}.$$

Задача VII.15 В заряженном плоском конденсаторе, отсоединенном от источника, напряженность электростатического поля равна E_0. Половину пространства между пластинами конденсатора заполнили жидким диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε (*рис. VII.13, а*). Чему стала равной напряженность E электростатического поля в пространстве между пластинами, свободном от диэлектрика?

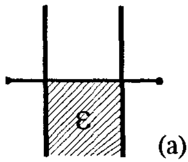


Рис. VII.13

Решение. Вначале на пластинах конденсатора находился заряд $Q = C_0U_0 = C_0E_0d$, где C_0 – емкость пустого конденсатора, d – расстояние между пластинами, E_0 – напряженность электростатического поля в конденсаторе.

Когда половину конденсатора заполнили диэлектриком, то его можно рассматривать как два параллельно включенных конденсатора C_1 и C_2 (*рис. VII.13*, б), так как пластины металлические и каждая из них имеет всегда один и тот же потенциал. Полная емкость конденсатора после заполнения диэлектриком

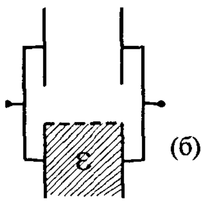


Рис. VII.13

$$C = C_1 + C_2 = \frac{C_0}{2} + \frac{\varepsilon C_0}{2} = \frac{C_0}{2}(1 + \varepsilon).$$

При отключенном источнике заряд на пластинах сохраняется, однако он может перераспределяться в пределах одной металлической пластины.

Новая разность потенциалов будет определяться по формуле

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{2Q}{C_0(1+\varepsilon)} = \frac{2C_0E_0d}{C_0(1+\varepsilon)} = \frac{2E_0d}{1+\varepsilon}.$$

Искомая напряженность поля внутри конденсатора

$$E = \frac{U}{d} = \frac{2E_0}{1+\varepsilon}.$$

Следует отметить, что заряд на пластинах верхней половины конденсатора, не заполненной диэлектриком:

$$q_1 = \frac{C_0}{2}U = \frac{C_0E_0d}{1+\varepsilon}.$$

Заряд же на пластинах нижней половины конденсатора, заполненной диэлектриком:

$$q_2 = \frac{C_0E_0d\varepsilon}{1+\varepsilon}.$$

Таким образом, при заполнении диэлектриком часть заряда переместилась с верхней половины пластин на нижнюю, хотя полный заряд

$$Q = q_1 + q_2 = \frac{C_0E_0d}{1+\varepsilon} + \frac{C_0E_0d\varepsilon}{1+\varepsilon} = C_0E_0d$$

остался прежним.

Задача VII.16 Плоский конденсатор емкости C зарядили до разности потенциалов U_0 и отключили от источника ЭДС. Затем пространство между пластинами заполнили жидким диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε. В другой раз тот же конденсатор оставили подключенным к источнику ЭДС $\mathcal{E} = U_0$ (*рис. VII.14*). Определить заряды на пластинах конденсатора и напряженность поля в нем в обоих случаях.

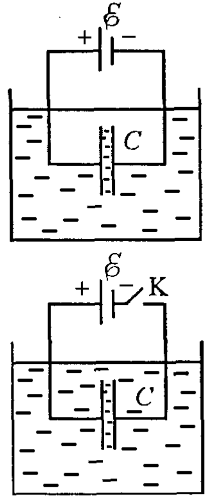


Рис. VII.14

Решение. Рассмотрим первый случай: заряженный конденсатор отключили от источника. В этом случае заряд на пластинах остается неизменным, однако емкость при заполнении диэлектриком увеличивается в ε раз. Следовательно, согласно формуле $Q = CU$ разность потенциалов на обкладках конденсатора должна уменьшиться в ε раз. Напряженность поля в конденсаторе $E = U/d$ также должна уменьшится в ε раз.

Во втором случае конденсатор не отключен, разность потенциалов на обкладках конденсатора не меняется и равна U_0, а емкость увеличивается в ε раз. Следовательно, заряд на конденсаторе увеличится в ε раз, т. е. $Q' = \varepsilon C U_0$.

Увеличение заряда на обкладках происходит за счет притекания дополнительного заряда из источника ЭДС. Напряженность поля E в конденсаторе при заполнении диэлектриком не меняется, так как не меняется разность потенциалов на его обкладках:

$$E = \frac{U_0}{d}.$$

Задача VII.17 Сферический воздушный конденсатор состоит из двух проводящих концентрических сфер с радиусами a и b (*рис. VII.15*). Определить емкость сферического конденсатора.

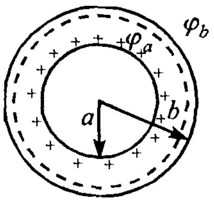


Рис. VII.15

Решение. Пусть на одной обкладке сферического конденсатора (на сфере радиуса a) помещен заряд $+Q$, а на другой (на сфере радиуса b) – заряд $-Q$.

В этом случае потенциал внешней заряженной сферы (относительно бесконечно удаленной точки) определяется как алгебраическая сумма потенциалов, созданных зарядами на внутренней и внешней сферических поверхностях, т. е.

$$\varphi_b = -\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 b} + \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 b} = 0.$$

Потенциал внутренней сферы

$$\varphi_a = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 a} - \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 b} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right).$$

Разность потенциалов между обкладками сферического конденсатора

$$\Delta\varphi = \varphi_b - \varphi_a = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right) - 0 = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\frac{(b-a)}{ab}.$$

Таким образом, емкость сферического конденсатора

$$C = \frac{Q}{\Delta\varphi} = \frac{4\pi\varepsilon_0 ab}{b-a}.$$

Эта формула позволяет провести некоторые предельные переходы. Например, если $b >> a$, т. е. внешняя сфера удалена, то $C = 4\pi\varepsilon_0 a$, т. е. емкость конденсатора равна емкости уединенного шара. Следовательно, уединенный шар можно рассматривать как конденсатор, у которого роль внешних обкладок играют удаленные предметы.

Если же сферические поверхности находятся близко друг к другу, так что расстояние между ними $d = (b - a)$ намного меньше среднего радиуса сфер, т. е. $d << r$, то $C = \frac{4\pi\varepsilon_0 r^2}{d} = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$. Таким образом, емкость сферического конденсатора, у которого расстояние между пластинами намного меньше радиуса сфер, можно вычислять по формуле плоского кондесатора.

Задача VII.18 Определить емкость батареи конденсаторов, изображенной на *рис. VII.16, а*. Емкость каждого конденсатора C_0.

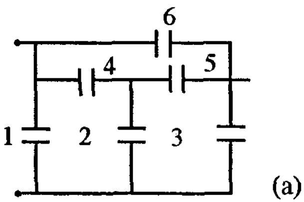


Рис. 7.16

Решение. Схема будет выглядеть проще, если ее изобразить по-другому (*рис. VII.16*, б). Из этого рисунка видно, что потенциалы точек A и B одинаковы, а это означает, что конденсатор C_5 всегда не заряжен, так как разность потенциалов между его обкладками равна нулю. Поэтому точки А и В можно соединить либо коротким проводом (эквипотенциаль-

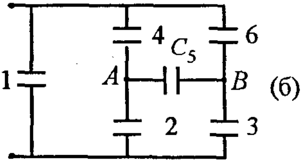
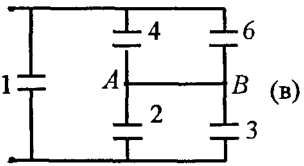


Рис. VII.16

ной поверхностью), и от этого в схеме ничего не изменится, либо конденсатор C_5 вовсе выбросить. И тот и другой случай изображены на *рис. VII.16, в, г.*



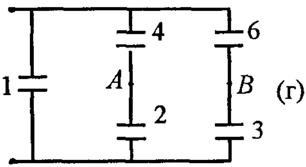


Рис. VII.16

Полная емкость схемы (в) и (г) равна:

$$\text{в) } C = C_0 + \frac{2C_0 2C_0}{2C_0 + 2C_0} = C_0 + C_0 = 2C_0;$$

$$\text{г) } C = C_0 + 2\frac{C_0 C_0}{C_0 + C_0} = 2C_0.$$

Следует отметить, что в задачах подобного рода всегда нужно искать точки равного потенциала, что позволяет существенно упростить задачу.

Задача VII.19 Определить разность потенциалов между точками A и B в схеме, изображенной на *рис. VII.17*. Все элементы схемы заданы.

Решение. Конденсаторы заряжаются от источника ЭДС до некоторых напряжений U_1, U_2, U_3, U_4, при этом

$$U_1 = \frac{q_1}{C_1}; \qquad U_2 = \frac{q_2}{C_2}; \qquad U_3 = \frac{q_3}{C_3}; \qquad U_4 = \frac{q_4}{C_4}.$$

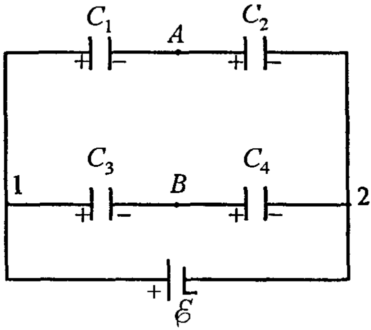


Рис. VII.17

Так как конденсаторы C_1 и C_2 включены последовательно, то заряды на их обкладках одинаковые, т. е. $q_1 = q_2$, аналогично $q_3 = q_4$.

Если конденсаторы C_1 и C_2 заменить одним конденсатором $C = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}$, то заряд q_1 на его обкладках определяется легко (аналогично определяется и заряд q_3):

$$q_1 = \mathcal{E}\frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}, \quad q_3 = q_4 = \mathcal{E}\frac{C_3C_4}{C_3 + C_4}.$$

В электростатике работа по замкнутому контуру равна нулю. Выберем контур $1AB1$. При обходе контура важно правильно определить полярность обкладок конденсатора, так как при движении от большего потенциала к меньшему падение напряжения следует брать со знаком «+», а при движении от меньшего потенциала к большему — со знаком «−»:

$$U_1 + U_{AB} - U_3 = 0, \text{ или } U_{AB} = U_3 - U_1.$$

Так как $U_3 = \dfrac{q_3}{C_3}$, а $U_1 = \dfrac{q_1}{C_1}$, то, подставляя величину зарядов q_3 и q_1, получим

$$U_{AB} = \frac{\mathcal{E} C_3 C_4}{C_3(C_3 + C_4)} - \frac{\mathcal{E} C_1 C_2}{C_1(C_1 + C_2)} = \frac{\mathcal{E}(C_1 C_4 - C_2 C_3)}{(C_1 + C_2)(C_3 + C_4)}.$$

Можно было бы выбрать и контур $AB2A$. В этом случае

$$U_{AB} + U_4 - U_2 = 0 \text{ и } U_{AB} = U_2 - U_3.$$

Вычисления попробуйте проделать сами. Ответ получите в обоих случаях одинаковый.

Задача VII.20 В схеме, изображенной на *рис.VII.18*, потенциалы точек *1*, *2*, *3* равны φ_1, φ_2, φ_3 соответственно. Емкости конденсаторов C_1, C_2, C_3. Определить потенциал точки 0.

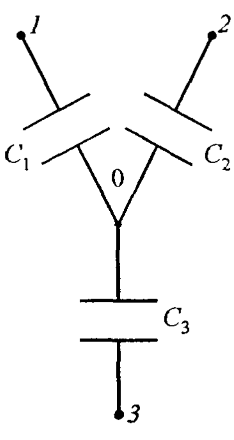


Рис. VII.18

Решение. Обозначим потенциал точки 0 через φ. Сумма зарядов всех обкладок конденсаторов, подсоединенных к точке 0, всегда остается постоянной и равной нулю, так как до зарядки конденсаторов на всех пластинах заряд отсутствовал. Вычислим величины этих зарядов.

$$Q_1 = C_1(\varphi_1 - \varphi);\ \ Q_2 = C_2(\varphi_2 - \varphi);\ \ Q_3 = C_3(\varphi_3 - \varphi).$$

Тогда $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$, или

$$C_1(\varphi_1 - \varphi) + C_2(\varphi_2 - \varphi) + C_3(\varphi_3 - \varphi) = 0,$$

откуда $\varphi = \dfrac{C_1\varphi_1 + C_2\varphi_2 + C_3\varphi_3}{C_1 + C_2 + C_3}$.

VIII. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

пVIII.1 Электрический ток – *это направленное движение электрических зарядов.*

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = qn\overline{v}S,$$

где q – заряд одной частицы, n – концентрация частиц, $\overline{v}$ – средняя скорость движения частиц, S – площадь поперечного сечения проводника.

пVIII.2 *Электродвижущая сила* $\mathcal{E}$ *(ЭДС) равна работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда.*

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$

пVIII.3 Закон Ома для участка цепи:

$$I = \frac{U}{R},$$

где U – разность потенциалов на концах участка цепи, R – сопротивление участка.