



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Рубцовский индустриальный институт (филиал)
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова»

В.В. Борисовский

ЭЛЕКТРОСТАТИКА (теория и практика)

Учебное пособие

для студентов всех направлений очной и заочной форм обучения

Рубцовск 2014

УДК 530.1

Борисовский В.В. Электростатика (теория и практика): Учебное пособие для студентов всех направлений очной и заочной форм обучения/ Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2014.- 49 с.

Пособие представляет собой краткую теорию раздела физики – электростатику. Приведенные практические примеры из повседневной жизни, природы и техники рассматривают процессы взаимодействия зарядов и заряженных тел.

Рассмотрено и одобрено на заседании
НМС Рубцовского индустриального
института
Протокол № 8 от 20.11. 2014г.

Рецензент:

к.т.н., доцент С.А. Гончаров

© Рубцовский индустриальный институт, 2014

Содержание

Введение	4
I. Электростатика	6
1.1. Закон Кулона – основной закон электростатики	6
1.2. Электрическое поле. Напряженность электрического поля	6
1.3. Явление электрической индукции	9
1.4. Потенциал электростатического поля и разность потенциалов	9
1.5. Емкость проводника и конденсатора	11
1.6. Энергия электростатического поля	12
II. Вопросы и задачи	14
III. Подсказки	26
IV. Ответы	30

Введение

Слово «электричество» мы связываем с различными достижениями в современной технике: компьютерах, электродвигателях, электрогенераторах, светильниках, различной бытовой технике. Но электричество играет в нашей жизни гораздо более серьезную роль. Ведь согласно атомной теории строения вещества силы, действующие между атомами и молекулами, в результате чего возникают жидкости и твердые тела, - это электрические силы. Они также ответственны и за обмен веществ, происходящий в человеческом организме. Даже когда мы что-нибудь тянем или толкаем, это оказывается результатом действия электрических сил между молекулами руки и того предмета, на который мы воздействуем. И вообще, большинство сил, с которыми мы имеем дело, сегодня принято считать электрическими силами, действующими между атомами.

Электрические силы и явления известны с древних времен, но лишь в последние два столетия они были досконально изучены. Первое явление, связанное с электричеством, было обнаружено около двадцати пяти столетий назад греческим философом Фалесом Милетским (625-547 г. до н.э.). Он показал, что янтарь, потертый о шерсть, приобретает способность притягивать некоторые мелкие легкие предметы. На греческом языке янтарь – электрон, от этого слова и произошло название «электричество».

В начале XVII столетия английский физик У.Гильберт (1544-1603) на основании ряда опытов установил, что кроме янтаря свойство притягивать легкие предметы приобретают при трении и многие другие вещества (алмаз, сапфир, стекло, сера, смола, эбонит, каучук и другие). Несмотря на обилие различных веществ, обладающих такими свойствами, все они делятся на два вида, каждый из которых обусловлен наличием электрических зарядов: заряды, подобные возникающим на стекле, потертом о кожу, и заряды, подобные возникающим на янтаре, потертом о шерсть. Первые из них получили название положительных зарядов, а вторые – отрицательных.

При исследовании заряженных тел американский физик Р. Милликен (1868-1953) и русский физик А.Ф. Иоффе (1880-1960) доказали, что электрический заряд любого тела состоит из целого числа некоторых *элементарных электрических* зарядов, равных $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл (1 Кл – заряд, проходящий за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А). Наименьшей частицей, обладающей отрицательным элементарным зарядом, является *электрон*, масса которого равна $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг. Наименьшая устойчивая частица, обладающая положительным зарядом (равным заряду электрона), это *протон*. Масса протона в 1836 раз больше массы электрона: $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг. Элементарной частицей, не имеющей электрического заряда, является *нейтрон*, масса которого практически равна массе протона. Нейтроны и протоны входят в состав атомного ядра.

В общем случае любое тело, с точки зрения его заряда, состоит из протонов и электронов. Причем алгебраическая сумма положительных (протонов) и отрицательных (электронов) любой замкнутой системы (системы, не обменивающейся зарядами с внешними телами) остается величиной неизменной. Этот

закон сохранения заряда сформулировал английский физик М.Фарадей (1791-1867).

Заряженные частицы взаимодействуют друг с другом посредством **электрических полей**, окружающих эти заряды. Одноименные заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются. Понятие электрического поля впервые также было введено М.Фарадеем.

В данном пособии мы рассматриваем закономерности взаимодействия и условия равновесия электрических зарядов, неподвижных относительно инерциальной системы отсчета. Раздел физики, в котором рассматриваются эти свойства, называется «Электростатика».

I. Электростатика

В электростатике рассматриваются свойства и закономерности неподвижно распределенных электрических зарядов, а также явления, происходящие в телах под действием этих зарядов.

Количественные законы электрических взаимодействий наиболее просто выражаются для случая точечных зарядов. Точечным зарядом называется заряженное тело, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием до других заряженных тел.

1.1. Закон Кулона – основной закон электростатики

Французский физик Ш.Кулон (1736-1806) в 1785 г. установил закон взаимодействия электрических зарядов: два точечных заряда q_1 и q_2 в вакууме взаимодействуют с силой F , прямо пропорциональной произведению этих зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния r между ними

$$F_0 = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от единиц измерения (в СИ он равен $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Нм}^2}{\text{Кл}^2}$, $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}$ – электрическая постоянная).

Силы взаимодействия между электрическими зарядами, описываемые законом Кулона, называют электростатическими силами или кулоновскими силами. Силы взаимодействия зависят от среды, в которую помещены заряды. Для характеристики электрических свойств различных сред вводится величина **диэлектрической проницаемости среды** ϵ . Она показывает, во сколько раз в данной среде сила взаимодействия между точечными электрическими зарядами, находящимися на расстоянии r друг от друга, меньше, чем в вакууме при том же расстоянии:

$$\epsilon = \frac{F_0}{F}, \quad (2)$$

где F_0 – сила взаимодействия зарядов в вакууме, F – сила взаимодействия в диэлектрической среде.

С учетом диэлектрической проницаемости среды ϵ , в которую помещены заряды, и коэффициента пропорциональности k , закон Кулона будет иметь вид:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}. \quad (3)$$

2.2. Электрическое поле. Напряженность электрического поля

Взаимодействие зарядов происходит посредством электрических полей, окружающих эти заряды. Электрическое поле заряженного тела действует на электрические заряды с некоторой силой. Согласно идее М.Фарадея, электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый из них создает в окружающем пространстве электрическое поле. Поле одного заряда

действует на поле другого заряда и наоборот. По мере удаления от заряда поле ослабевает.

Электрическое поле неподвижных зарядов называется *электростатическим*. Электростатическое поле отдельного заряда можно обнаружить, если внести в это поле другой заряд, на который в соответствии с законом Кулона будет действовать определенная сила. Однако электростатическое поле первого заряда существует и в отсутствии второго заряда, хотя в этом случае оно никак себя не проявляет.

Исследовать электрическое поле можно с помощью пробного заряда – очень малого по размерам и несущего положительный заряд q_0 . Предполагается, что величина пробного заряда настолько мала, что он не искажает того поля, которое с его помощью изучается. Поместим в электрическое поле, созданное точечным зарядом q , пробный заряд q_0 . На этот заряд по закону Кулона будет действовать сила

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_0}{r^2}.$$

Если в одну и ту же точку поля помещать разные пробные заряды q'_0 , q''_0 и т.д., то на них будут действовать различные силы, пропорциональные этим зарядам. Отношение же F/q_0 для всех зарядов, вносимых в поле, будет одинаковым и будет зависеть лишь от заряда q и r , определяющих электрическое поле в данной точке. Поэтому данная величина, выражаемая формулой

$$E = F/q_0, \quad (4)$$

принята в качестве основной силовой характеристики электрического поля.

Эта величина E называется *напряженностью электрического поля*. Следовательно, напряженностью E в данной точке является векторная величина, равная отношению силы F , действующей на положительный пробный заряд q_0 , помещенный в данную точку электрического поля, к этому заряду. Направление вектора напряженности E совпадает с направлением силы F , действующей на пробный положительный заряд. Единицей напряженности электрического поля является В/м.

В случае, если на электрический заряд q действуют одновременно электрические поля нескольких зарядов, то результирующая сила равна геометрической сумме сил, действующих со стороны каждого поля в отдельности. Электрические поля подчиняются *принципу суперпозиции*: вектор напряженности в данной точке поля E равен геометрической сумме векторов напряженностей, создаваемых в этой точке каждым из зарядов в отдельности:

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{i=1}^n E_i. \quad (5)$$

Если известна напряженность E электрического поля в данной точке, то на помещенный в эту точку поля заряд q действует сила

$$F = q \cdot E. \quad (6)$$

Электростатическое поле можно изобразить графически с помощью линий напряженности (силовые линии электрического поля). Линиями напряженности называются линии, проведенные в поле так, что касательные к ним в любой точке поля совпадают по направлению с вектором напряженности.

Электрическое поле считается однородным, если напряженность поля одинакова по модулю и направлению в любой точке пространства. Графически такое поле изображается равноотстоящими друг от друга параллельными прямыми линиями.

Точечный заряд q создает неоднородное поле, напряженность которого равна

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{\epsilon \cdot r^2}, \quad (7)$$

где r – расстояние от заряда до точки, в которой определяется напряженность. По такой же формуле находится напряженность для равномерно заряженного металлического шара (сферы) радиусом R при условии, что $r \geq R$. Внутри шара напряженность электрического поля равна нулю.

С помощью силовых линий электрического поля можно определять не только направление поля, но и значение его напряженности E по числу линий на единицу поверхности, перпендикулярной к силовым линиям. Число силовых линий $d\Phi_E$, пронизывающих площадку dS , перпендикулярную к ним, определяет поток вектора напряженности электрического поля

$$d\Phi_E = E \cdot dS \cdot \cos\alpha, \quad (8)$$

где α – угол между направлением силовой линии и нормалью к поверхности dS .

Для определения потока Φ_E через любую замкнутую поверхность применяется теорема Остроградского-Гаусса. Математическая основа данной теоремы была разработана русским ученым М.В. Остроградским (1801-1862), а ее приложение к вопросам электростатики было дано немецким физиком К. Гауссом (1777-1855). Теорема Гаусса формулируется следующим образом: полный поток вектора напряженности через замкнутую поверхность произвольной формы численно равен алгебраической сумме электрических зарядов, заключенных внутри этой поверхности, поделенную на диэлектрическую проницаемость среды и вакуума, т.е.

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i, \quad (9)$$

где q_i – заряд, заключенный внутри поверхности, n – число зарядов.

Применяя формулу Гаусса, можно определить напряженность электрического поля для заряженных протяженных тел. Тонкая бесконечная (очень длинная) равномерно заряженная нить создает на расстоянии r напряженность

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\tau}{\epsilon \cdot r}, \quad (10)$$

где $\tau = dq/dl$ – *линейная плотность заряда*. По такой же формуле находится напряженность для равномерно заряженного по длине стержня (полый цилиндрической поверхности) радиусом R при условии, что $r \geq R$. Внутри стержня (цилиндрической поверхности) напряженность поля равна нулю.

В случае равномерно заряженной бесконечно большой плоскости возникает однородное электрическое поле. Векторы напряженности в этом случае перпендикулярны к плоскости в любой точке пространства, и величина напряженности определяется по формуле:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon}, \quad (11)$$

где $\sigma = dq/dl$ – *поверхностная плотность заряда*.

Напряженность электрического поля между двумя параллельными пластинами, заряженными равномерно равными по модулю разноименными зарядами при условии, что размеры пластин значительно превосходят расстояние d между ними, а объем между пластинами заполнен диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε (такую электротехническую систему называют плоским конденсатором), равна:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\varepsilon}. \quad (12)$$

За пределами пластин напряженность поля равна нулю.

1.3. Явление электрической индукции

При внесении незаряженного проводника в электрическое поле свободные носители заряда приходят в движение: положительные в направлении вектора напряженности поля E , отрицательные – в противоположную сторону. Электрическое поле, которое создают эти заряды, направлено в противоположную сторону внешнего поля. Следовательно, накапливание зарядов на противоположных концах проводника приводит к ослаблению в нем электрического поля. Перераспределение носителей заряда происходит до тех пор, пока напряженность поля внутри проводника не станет равной нулю. Индукционные (наведенные) на проводнике заряды распределяются по внешней поверхности проводника.

Явление, состоящее в электризации незаряженного проводника во внешнем электрическом поле путем разделения на этом проводнике уже имеющихся в нем в равных количествах положительных и отрицательных зарядов, называется *электростатической индукцией* или *электризацией через влияние*.

Индукционные (наведенные) в проводнике заряды исчезают, когда проводник удаляют из электрического поля. Для того, чтобы отделить положительные индуцированные заряды от отрицательных, необходимо разъединить разноименно заряженные части проводника до его удаления из электростатического поля.

1.4. Потенциал электрического поля и разность потенциалов

При сообщении телу заряда q совершается работа, которая идет на увеличение энергии электрического поля тела. Чем больший заряд сообщается телу, тем большей будет работа, идущая на его зарядку, а значит, тем большей будет и энергия электрического поля заряженного тела.

В свою очередь, заряд, внесенный в любую точку электрического поля из бесконечности, также обладает потенциальной энергией W , причем эта энергия будет тем больше, чем больше величина заряда. Физическая величина, равная отношению потенциальной энергии, которую приобретает единичный положи-

тельный заряд q_0 (пробный), если его перенести из бесконечности в данную точку пространства, к этому заряду, называется **потенциалом электрического поля**:

$$\varphi = \frac{W}{q_0}. \quad (13)$$

Потенциал является энергетической характеристикой поля; он численно равен работе, которую надо затратить против сил электрического поля при перенесении единичного заряда из бесконечности, где потенциальная энергия условно считается равной нулю, в данную точку поля.

Потенциал является скалярной величиной и для точки поля, создаваемого точечным зарядом или равномерно заряженным шаром (сферой), определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{W}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}, \quad (14)$$

где r – расстояние от точечного заряда до данной точки поля или расстояние (в случае заряженного шара радиусом R) от центра шара до данной точки при $r \geq R$.

Когда поле образовано несколькими произвольно расположенными зарядами q_1, q_2, \dots, q_n , то потенциал φ в данной точке равен алгебраической сумме потенциалов $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$, создаваемых каждым зарядом в отдельности, т.е.

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i. \quad (15)$$

Разностью потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi$ между двумя точками электрического поля является величина, измеряемая работой перемещения единичного положительного заряда из одной точки поля в другую. Разность потенциалов не зависит от выбора точки нулевого потенциала, как это имеет место при определении потенциала точки. Можно также отметить, что разность значений потенциала в начальной и конечной точках $\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi$ обозначают буквой U и называют **напряжением** $U = \varphi_1 - \varphi_2$. Единицей измерения потенциала, разности потенциалов и напряжения является вольт ($V = \text{Дж/Кл}$).

Работа, совершаемая электрическим полем при перемещении заряда q из точки с потенциалом φ_1 в точку с потенциалом φ_2 , не зависит от формы пути и определяется по формуле:

$$A = q \varphi_1 - \varphi_2 = qU. \quad (16)$$

Электрическое поле в каждой точке можно характеризовать или напряженностью, которая является **силовой характеристикой**, или потенциалом, являющимся **энергетической характеристикой**. Напряженность электрического поля точки связана с разностью потенциалов вдоль силовой линии поля, проходящей через эту точку. Если расстояние между точками с потенциалами φ_1 и φ_2 равно Δl , то при перемещении пробного заряда q_0 из одной точки поля в другую совершается работа $A = q_0 \varphi_1 - \varphi_2 = q_0 \Delta\varphi$. С другой стороны, работа против сил электрического поля может быть найдена по формуле $A = -F \Delta l = -E q_0 \Delta l$. Отсюда

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta l}. \quad (17)$$

Величина $\frac{\Delta\varphi}{\Delta l}$, характеризующая быстроту изменения потенциала в направлении силовой линии, называется *градиентом потенциала* и обозначается $grad\varphi$. Вектор напряженности E численно равен градиенту потенциала, но направлен в противоположную сторону – в сторону падения потенциала.

1.5. Электроемкость проводника и конденсатора

Заряд, сообщаемый телу, и потенциал взаимосвязаны между собой. Чем больший заряд сообщен телу, тем большим будет и потенциал тела $q = C\varphi$, где C – коэффициент пропорциональности, который называют электроемкостью. Следовательно, электроемкостью является величина, определяемая зарядом, который необходимо сообщить проводнику, чтобы изменить его потенциал на единицу:

$$C = q/\varphi. \quad (18)$$

Говоря об электроемкости проводника, считают, что все тела удалены от него на достаточно большие расстояния и практически не влияют на его электроемкость, тогда говорят, что проводник является уединенным. Электроемкость такого проводника зависит от его формы и размеров, но не зависит от материала. Измеряется электроемкость в фарадах. Фарад – это электроемкость такого проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда в один кулон 1 Кл. Фарад – очень большая величина, поэтому на практике пользуются микрофарадами (мкФ) и пикофарадами (пФ): $1\text{ мкФ} = 10^{-6}\text{ Ф}$ и $1\text{ пФ} = 10^{-12}\text{ Ф}$. Уединенные проводники обладают очень малой электроемкостью, так, например, Земля имеет емкость всего 710 мкФ.

Для накопления заметных по величине зарядов применяются конденсаторы. Конденсатор состоит из двух проводников (обкладок), разделенных диэлектриком, толщина которого d мала по сравнению с размерами обкладок. Наиболее распространенным является плоский конденсатор, состоящий из двух плоских металлических пластин площадью S каждая, расположенных параллельно на расстоянии d друг от друга и разделенных слоем изолятора с диэлектрической проницаемостью ε . Поле, создаваемое зарядами на пластинах, сосредоточено лишь между пластинами конденсатора. Во внешнем пространстве оно практически отсутствует, и на внешних телах, окружающих конденсатор, не возникают индуцированные заряды. Электроемкость плоского конденсатора вычисляется по формуле

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}. \quad (19)$$

Существуют и другие виды конденсаторов – сферический и цилиндрический. Сферический конденсатор представляет собой систему двух концентрических сфер. Цилиндрический конденсатор состоит из двух коаксиальных цилиндров. Пространство между сферами и цилиндрами, образующими обкладки конденсатора, заполнено диэлектриком.

Емкость сферического конденсатора определяется по формуле:

$$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}, \quad (20)$$

где R_1 и R_2 – радиусы внутренней и внешней обкладок.

Емкость цилиндрического конденсатора равна

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}, \quad (21)$$

где R_1 и R_2 – радиусы обкладок.

Конденсаторы можно соединять в батареи, емкость которых зависит от схемы соединения. При последовательном соединении конденсаторов емкость батареи можно определить по формуле

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{C_i}\right). \quad (22)$$

При параллельном соединении конденсаторов емкость батареи равна сумме емкостей отдельных конденсаторов

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i. \quad (23)$$

1.6. Энергия электростатического поля

Энергия электрического заряда q , находящегося в поле других зарядов с электрическим потенциалом φ в точке, где помещен заряд, измеряется произведением заряда q на величину потенциала:

$$W = q\varphi.$$

Энергия системы двух зарядов q_1 и q_2 измеряется работой, которую совершает сила электрического поля при удалении одного из этих зарядов в бесконечность. Если φ_{21} - потенциал поля первого заряда в точке, где находится второй заряд, и φ_{12} - потенциал поля второго заряда, где находится первый, то

$$W_{12} = q_1 \cdot \varphi_{12} = q_2 \cdot \varphi_{21} = \frac{1}{2} (q_1 \cdot \varphi_{12} + q_2 \cdot \varphi_{21}). \quad (24)$$

Для системы неподвижных точечных зарядов q_1, q_2, \dots, q_n

$$W_n = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \varphi_i, \quad (25)$$

где φ_i - потенциал, создаваемый всеми зарядами, кроме i -го, в точке, где находится заряд q_i .

Энергия электрического поля у проводника появляется при получении им заряда Δq

$$W = \varphi \Delta q = \frac{q}{C} \cdot \frac{q}{2} = \frac{q^2}{2C}. \quad (26)$$

Заряженный конденсатор обладает электростатической энергией, которая является энергией взаимодействия зарядов, находящихся на обкладках. Энергия заряженного конденсатора определяется работой, которая затрачивается на его зарядку, то есть на перемещение одного заряда с одной обкладки на другую для создания разности потенциалов. При разрядке конденсатора работа, совершаемая электрическим полем, обусловлена запасом энергии конденсатора. Работа при разрядке равна $A = -q\Delta\varphi = -q\frac{U}{2} = W$, где W – энергия электрического поля. Так как $q=CU$, то

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2}. \quad (27)$$

Учитывая емкость плоского конденсатора (19), получим

$$W = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U^2}{2d} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} Sd = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{E^2}{2} V,$$

где $V=Sd$ – внутренний объем конденсатора. Поле плоского конденсатора в единице объема является плотностью энергии, которая равна

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}. \quad (28)$$

Формула (28) справедлива и для электрических полей любой конфигурации.

II. Задачи и вопросы

1. **Притяжение зарядов.** Разноименно заряженные точечные тела притягиваются друг к другу, при этом при их сближении сила притяжения увеличивается (закон Кулона). А для какой системы двух разноименно заряженных тел при их сближении сила притяжения будет уменьшаться до нуля?

2. **Изменение взаимодействия между зарядами.** Положительный и отрицательный точечный заряды притягиваются друг к другу с некоторой силой. Как изменится эта сила, если поместить между зарядами эбонитовый шар? металлический шар?

3. **Заряд в центре заряженного кольца.** В центре равномерно заряженного кольца располагается точечный заряд противоположного знака. Заряд находится в состоянии устойчивого равновесия. Каков будет характер движения заряда, если ему сообщить начальную скорость вдоль оси кольца?

4. **Выполняется ли закон Кулона?** Если стеклянную палочку потереть о шелк, а эбонитовую – о мех, то в результате процесса электризации и стеклянная и эбонитовая палочки будут заряжаться. Стеклянная палочка накапливает положительные заряды, эбонитовая – отрицательные. Любую из заряженных палочек проносят вблизи мелких кусочков бумаги, которые начинают притягиваться к ней. Не противоречит ли этот опыт закону Кулона – ведь бумажки не заряжены?

Если провести аналогичный эксперимент с металлическими опилками, то они притягиваться не будут. Почему наэлектризованная стеклянная или эбонитовая палочка притягивает мелкие бумажки, но не притягивает металлические опилки?

5. **Незаряженный шарик в электрическом поле.** В электрическое поле поместили незаряженный шарик. Будет ли поле действовать на него с какой-то силой?

6. **Металлический шар в различных электрических полях.** Электрические поля (два неоднородных и одно однородное) изображены с помощью силовых линий (рис.1, а,б,в). Как будет вести себя положительно заряженный металлический шар, подвешенный на непроводящей нити, в каждом из электрических полей, изображенных на рис.1? Как будет вести себя в этих же полях шар, если его зарядить отрицательно? И последний вариант – как будет вести себя в этих полях незаряженный шар?

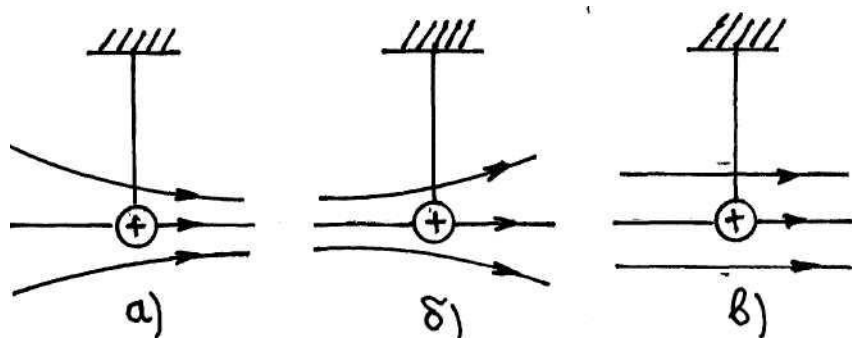


Рис. 1

7. **Когда сила взаимодействия между шарами больше?** Два одинаковых проводящих шара имеют одинаковые заряды. Расстояние между шарами меньше их диаметров; шары не находятся в контакте. В каком случае сила взаимодействия между шарами (по модулю) больше – когда они заряжены одноименно или разноименно? Казалось бы, на первый взгляд, сила взаимодействия должна быть одинаковой, но шар – это не точечный заряд.

8. **Взаимодействие между плоскостью и точечным зарядом.** На расстоянии r от проводящей незаряженной плоскости большого размера находится точечный положительный заряд. Будут ли взаимодействовать заряд и плоскость? Если да, то с какой силой?

9. **Заряд пластины при облучении.** При облучении поверхности металлической пластины рентгеновскими лучами она заряжается. Каков знак этого заряда?

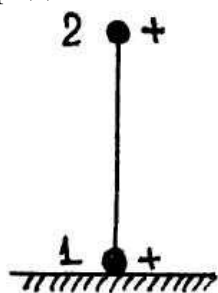


Рис. 2

10. **Упругое соударение заряженных шаров.** На упругий металлический шарик 1, имеющий положительный заряд и закрепленный неподвижно (рис.2), начинает падать с некоторой высоты с начальной скоростью, равной нулю, такой же шарик 2, и после упругого центрального соударения шарик 1 подскакивает вверх. Как высоко поднимется шарик 2, если он несет на себе такой же положительный заряд, как шарик 1? На какую высоту поднимется шарик 2 после упругого соударения, если он будет не заряжен?

11. **Почему не заряжается проводник?** Два проводника удалены на большое расстояние от других тел. Один проводник был заряжен, а другой проводник не заряжен, но, когда их соединили металлической проволокой, заряды не стали перетекать с одного проводника на другой. Для каких проводников будет выполняться это условие?

12. **Как передать весь заряд одного проводника другому?** Каким образом заряженный проводник может отдать весь свой заряд другому изолированному проводнику? Какая форма должна быть у этого изолированного проводника?

13. **Заряд полой проводящей сферы.** Внутри полой проводящей незаряженной сферы был помещен небольшой заряженный шарик, после чего сфера была на короткое время соединена с землей, а затем шарик удален из сферы. Шарик со сферой не соприкасался. Какой заряд будет иметь сфера после этих операций, где и как будет распределен этот заряд? Где и какое будет существовать электростатическое поле?

14. **Электростатические эффекты зимой.** Различные электростатические эффекты лучше получаются зимой, чем летом. Почему так происходит?

15. **Какой заряд на удаленном шаре?** Одинаковые металлические шары 1 и 2 находятся на большом расстоянии друг от друга. Шары заряжены положительно. Незаряженный металлический шарик 3 во много раз меньше шаров 1 и 2 и удален от них на значительное расстояние. Шарик 3 соединили очень тонкой проволокой с шаром 1, при этом шарик 3 приобрел заряд q_1 . Затем всю систему тел привели в исходное первоначальное состояние, и после этого шарик 3

соединили такой же проволочкой с шаром 2. В этом случае на шарик 3 перешел заряд q_2 . Какой заряд приобретет шарик 3, если из исходного состояния его соединить проволочкой с шарами 1 и 2 одновременно?

16. **Электрический ток не идет.** В электрическом поле потенциал точки А выше потенциала точки В. Однако если поместить в это поле проводник АВ, то ток по нему идти не будет. Почему?

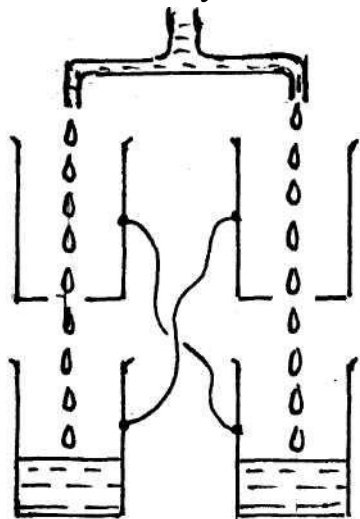


Рис. 3

17. **Капельница Кельвина.** Устройство, которое получило название капельница Кельвина, состоит из двух пар жестяных банок. В каждой паре одна банка в центре дна имеет отверстие, в другую банку капает вода (рис.3) через отверстие в верхней банке. Опыт в капельнице Кельвина проводится следующим образом. Вода капает сквозь две жестяные банки, которые соединены проводами, как показано на рис.3. Через некоторое время одна пара банок заряжается положительно, а другая – отрицательно. Почему? Прибор как будто симметричен. Почему же банки заряжаются по-разному? Как объяснить, почему начинается накопление зарядов?

18. **Свечение клейкой ленты.** Если вы станете отматывать клейкую ленту с катушки в темной комнате, то увидите, что линия, по которой лента отрывается от рулона, слабо светится. Чем вызвано это свечение? Имеет ли оно какой-то определенный цвет? Если да, то почему?

19. **Заряд в душевой.** При принятии душа разбрызгивающаяся вода создает в помещении отрицательный заряд. Напряженность электростатического поля при этом может достигать 800 В/м. Аналогичные отрицательные поля обнаруживаются вблизи естественных водопадов. А когда нефтяные танкеры моют мощными брандспойтами, могут возникнуть электростатические поля напряженностью до 300 кВ/м. Почему возникают эти поля? Применительно к супертанкерам, во время мойки этих судов иногда происходили крупные взрывы.

20. **Пленка для заворачивания продуктов.** Если некоторые тонкие прочные пленки для пищевых продуктов натянуть на горлышко банки и потянуть вниз, то пленка останется натянутой и герметично закроет сосуд. Она как бы «прилипает» к горлышку сосуда. Почему это происходит?

21. **Заряженный лист, свернутый в цилиндр.** Заряженный проводник в виде тонкого прямоугольного листа свернули в цилиндр. Изменилась ли напряженность электрического поля у поверхности проводника?

22. **Напряженность и потенциал одноименных зарядов.** Два равных одноименных точечных заряда находятся на некотором расстоянии друг от друга. Как изменяются напряженность и потенциал электрического поля вдоль оси, проходящей через середину прямой, соединяющей заряды, в направлении, перпендикулярном к этой прямой?

23. **Работа в электрическом поле заряженного шара и плоскости.** Между проводящими шаром и пластинкой приложена разность потенциалов

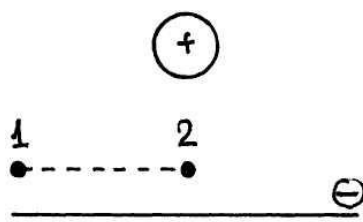


Рис. 4.

(на шаре – плюс, на пластине – минус). Размеры пластины весьма велики по сравнению с расстоянием между шаром и пластинкой (рис.4). Точечный положительный заряд перемещается из точки 1 в точку 2 параллельно пластине. Совершается ли при этом работа?

24. **Какой знак зарядов?** На рис.5 представлены распределения потенциала между двумя точечными зарядами, равными по модулю. Определите знаки зарядов в каждом из четырех случаев.

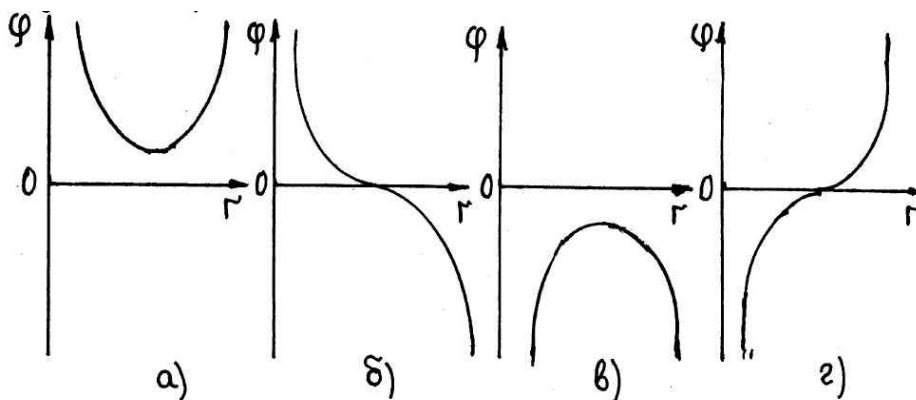


Рис. 5

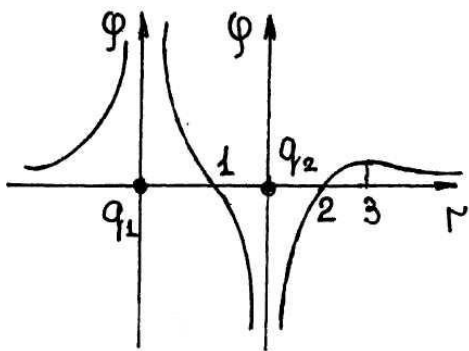


Рис. 6

25. **Какой заряд больше?** Два точечных заряда q_1 и q_2 расположены на некотором расстоянии друг от друга. Кривые на рис.6 показывают распределение потенциала вдоль линии, проходящей через заряды. В какой (или каких) из отмеченных точек напряженность поля равна нулю? Какие знаки у зарядов q_1 и q_2 и какой из них по модулю больше?

26. **Напряженность в плоском конденсаторе.** Заряженный плоский конденсатор движется относительно некоторой системы координат со скоростью V , направленной параллельно пластинам конденсатора (рис.7). Во сколько раз в этом случае напряженность поля между пластинами в этой системе координат отличается от ее значения в системе, относительно которой конденсатор неподвижен?

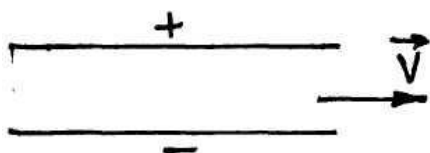


Рис. 7

27. **Нет разности потенциалов или есть?** Всегда ли между проводником, заряженным положительно, и проводником, заряженным отрицательно,

имеется разность потенциалов? Если не всегда, то в каком случае это может быть?

28. **Напряженность электрического диполя.** Электрическим диполем называется система двух одинаковых по величине разноименных точечных зарядов $+q$ и $-q$, расстояние l между которыми много меньше расстояния до тех точек, в которых определяется поле системы. Какова напряженность электрического поля в точке, которая одинаково удалена на расстояние r от зарядов, образующих электрический диполь? Расстояние r много больше l .

29. **Напряженность диполя зависит от расстояния между зарядами.** Не производя вычислений, покажите, что напряженность поля электрического диполя тем меньше, чем меньше расстояние между зарядами, образующими диполь.

30. **Силовые линии электростатического поля.** Иногда говорят, что силовая линия электростатического поля – это линия, по которой будет двигаться легкий электрический заряд в электростатическом поле. Правильно ли это?

31. **Движение заряда вдоль силовой линии.** При рассмотрении вопроса о том, что такое силовая линия электрического поля (см. «Силовые линии электрического поля»), было показано, что заряженная частица не может двигаться вдоль силовой линии. И все-таки, в каком случае заряженная частица в электрическом поле движется вдоль силовых линий?

32. **Возможны ли такие электрические поля?** Возможно ли такое электростатическое поле, вектор напряженности которого во всех точках поля имеет одинаковое направление, а перпендикулярно к этому направлению изменяет свою величину по линейному закону (рис.8)?

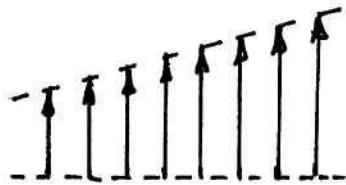


Рис. 8.

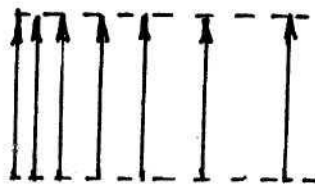


Рис 9.

Может ли существовать в вакууме электрическое поле, изображенное с помощью силовых линий на рис.9?

Может ли существовать в вакууме электрическое поле, изображенное с помощью силовых линий на рис.9?

33. **Свечение неоновой палочки.** Если потереть баллон неоновой лампочки шелковой тряпкой, то можно заметить, что она начинает на короткое время светиться. Как объяснить это явление?

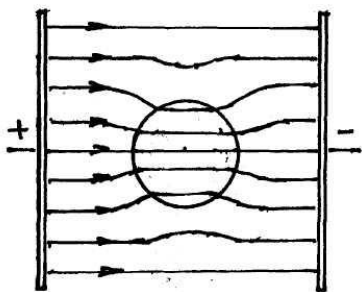


Рис. 10

34. **Диэлектрическая проницаемость жидкости и твердого диэлектрика.** Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено жидким диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 . Силовые линии в жидкости имеют вид, показанный на рис.10. Какая из диэлектрических проницаемостей больше?

35. **Силовые линии заряда и сферы.** Точечный заряд $-q$ помещен в центр полой металлической сферы, которая несет на себе заряд $+2q$. Изобразите с помощью силовых линий результирующее электрическое поле.

36. **Зарядится ли проводник?** Полый медный шар, имеющий небольшое отверстие, заряжен положительно. Как известно, на внутренней поверхности этого шара заряды отсутствуют. Зарядится ли металлический шар, находящийся за пределами полого медного шара, если соединить его проволокой с внутренней поверхностью полого шара?

37. **Заряды перетекают с незаряженного проводника на заряженный.** Два металлических шара одинакового размера находятся на некотором расстоянии друг от друга. Один шар заряжен, а другой нет. Когда шары соединили проволокой, заряды стали перетекать с незаряженного шара на заряженный. В каком случае такое возможно?

38. **Почему появляется электрическое поле?** В некоторой области пространства электрическое поле отсутствовало, но, когда туда поместили заряженный шарик, возникло электрическое поле, действующее на этот шарик с какой-то силой. Почему оно появилось?

39. **Наэлектризовать два шара зарядами разного знака.** Имеется положительно заряженный шар. Как с помощью этого шара, не уменьшая находящийся на нем заряд, зарядить два других шара – один положительно, другой – отрицательно?

40. **Полая металлическая сфера и заряд.** Если на некотором расстоянии от заряженного шарика повесить тонкую полоску бумаги, то она начинает притягиваться к шару. Как изменится сила притяжения, если окружить заряженный шарик металлической полой сферой? Как изменится сила притяжения, если окружить металлической сферой бумажку?

41. **Притяжение мелких бумажек.** Стеклянная палочка, потертая о шелк, электризуется, то есть накапливается заряд; заряды, подобные возникающим на стекле, получили название **положительных зарядов**, и заряды, подобные появляющимся на янтаре, получили название **отрицательных зарядов**.

Если наэлектризованную стеклянную палочку приблизить к маленькой бумажке, то бумажка вначале притягивается к палочке, а затем отталкивается. Как объяснить такую ситуацию?

42. **Почему один проводник заряжается, а другой нет?** Взяли два проводника, один из которых заряжают, а во втором пытаются получить индукционный заряд. Оказалось, если заряжать один проводник, во втором возникают индукционные заряды. Если же заряжать второй проводник, то на первом проводнике индукционные заряды не возникают. В каком случае возможна такая ситуация?

43. **Две пластинки и разноименные точечные заряды.** Между двумя разноименными одинаковыми по величине точечными зарядами, перпендикулярно к линии, их соединяющей, помещают два достаточно большие, плотно прилегающие друг к другу металлические пластинки (рис.11). Что будет происходить с пластинками, если их оставить свободными?

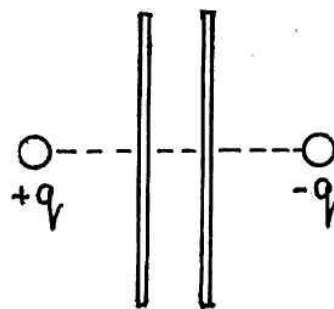


Рис. 11

44. **Металлический шарик посередине между двумя разноименными зарядами.** Посередине между двумя равными по модулю и противоположными по знаку зарядами находится незаряженный металлический шарик (рис.12). Если его сместить в сторону одного из зарядов, то останется ли он на том месте, куда его поместили, или будет двигаться в каком-то направлении?

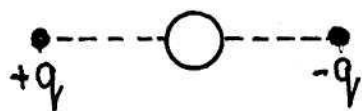


Рис. 12

по знаку зарядами находится незаряженный металлический шарик (рис.12). Если его сместить в сторону одного из зарядов, то останется ли он на том месте, куда его поместили, или будет двигаться в каком-то направлении?

45. **Проводящий шарик на нити между вертикальными пластинами.** Между вертикально расположенными пластинами плоского конденсатора висит на длинной тонкой нити незаряженный металлический шарик, причем к одной пластине он приближен ближе, чем к другой (рис.13). Как должен вести себя этот шарик?

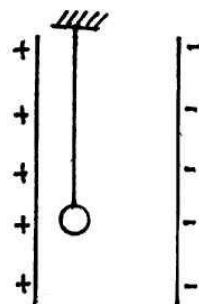


Рис. 13.

46. **Птицы на высоковольтном проводе.** Почему птицы слетают с провода высокого напряжения, когда включают напряжение?

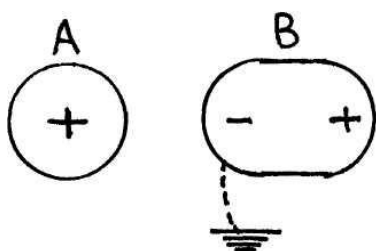


Рис. 14.

47. **Зарядить проводник положительным зарядом при заземлении.** Положительно заряженный шар А индуцировал заряды на незаряженном проводнике В (рис.14). После этого проводник В соединили с землей, как показано на рис.14 пунктиром. Можно ли таким путем зарядить проводник В положительно?

48. **Разноименные заряды на концах стеклянной и медной палочек.** Можно ли на концах стеклянной и медной палочек получить одновременно два разноименных заряда?

49. **Заряженный и незаряженный проводники соединены проводом.** Если два проводника, один из которых заряжен, а другой нет, соединить проволокой, то заряды станут перетекать с одного на другой. А в каком случае, не прибегая к помощи других проводников, можно добиться того, чтобы перетекание не происходило?

50. **Мелкие бумажки не притягиваются к клеммам батареи.** Наэлектризованная эбонитовая или стеклянная палочка притягивает мелкие кусочки бумаги. Почему же кусочки бумаги не притягиваются к клеммам аккумулятора или батарейки карманного фонаря?

51. **Соединение струй фонтана.** С помощью резиновой трубки, надетой на водопроводный кран, устраивают фонтан так, чтобы струя была направлена под углом к вертикали. К ниспадающей части струи подносится наэлектризованная палочка. При этом рассыпающаяся на сноп брызг струя начинает вновь слипаться. Объясните это явление.

52. **По ковру ходить опасно!** Иногда вас может «ударить током», если вы просто пройдете по ковру или поерзаете на сиденье автомобиля. Очевидно, при этом каким-то образом накапливается заряд. Можете ли вы более подробно

объяснить, что именно происходит? Почему, например, вас «бьет током», когда вы идете по ковру, но ничего не случается, если вы стоите на нем? Почему эти эффекты зависят от времени года?

53. **Электризация проволочных изгородей при снегопаде.** Поражения электрическим зарядом могут быть связаны с песчаными и снежными бурями. Известны случаи, когда в результате снежной бури проволочные изгороди накапливали заряд такой силы, что при прикосновении к ним человек или животное могут быть буквально сбиты с ног; иногда из изгородей в ближайшие заземленные предметы летят искры. Каким образом падающий снег электризует изгороди?

54. **Просеивание сахара.** При просеивании сахарной пудры с ней происходит следующее: сначала она сыплется прямо вниз, но постепенно все большая ее часть стала разлетаться в стороны. Почему это произошло?

55. **Цепи на бензовозах.** Почему к бензовозам раньше (60-е, 70-е годы) прикрепляли цепи, которые волочились по земле? Следует ли приделывать такую цепь или проводящую резиновую ленту к легковому автомобилю, да и к самому бензовозу?

56. **Движение заряда без изменения энергии.** Когда перенос электрического заряда из одной точки в другую под действием сил электрического поля не сопровождается изменением кинетической энергии?

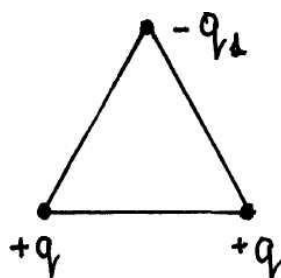


Рис. 15

57. **Энергия взаимодействия зарядов равна нулю.** Три точечных заряда расположены в вершинах равностороннего треугольника. Два из них одноименные и равные друг другу положительные заряды (рис.15). Знак третьего заряда отрицательный. Каким должен быть третий заряд, чтобы полная энергия взаимодействия зарядов была равна нулю?

58. **Энергия конденсатора, отключенного от источника.** Из заряженного и отключенного от источника напряжения конденсатора удален диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ϵ , ранее заполнявший все пространство между пластинами. Как надо изменить расстояние между пластинами, чтобы энергия конденсатора осталась неизменной? Как объяснить происшедшее изменение энергии конденсатора?

59. **Энергия конденсатора, подключенного к источнику напряжения.** Конденсатор, между пластинами которого находится диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ϵ , присоединен к источнику постоянного напряжения. Как изменится энергия конденсатора, если из него удалить диэлектрик? Объясните, за счет чего изменится энергия.

60. **Уровень жидкого диэлектрика между вертикальными пластинами конденсатора.** Заряженный и отключенный от источника напряжения плоский конденсатор с вертикальными стенками погружают в жидкий диэлектрик. Как при этом меняется уровень диэлектрика между пластинами?

61. **Уровень жидкого диэлектрика в неотключенном от источника конденсаторе.** Плоский конденсатор с вертикально расположенными пластинами, присоединенный к источнику напряжения, погружают в жидкий диэлек-

трик. Как изменится уровень диэлектрика между пластинами и как объяснить происходящее изменение энергии конденсатора?

62. **Пьезоэлектрический кристалл.** Пьезоэлектрик – кристаллический диэлектрик с хорошо выраженным пьезоэлектрическим эффектом, который заключается в том, что при деформации на противоположных гранях кристалла появляются электрические заряды разного знака. Обратный пьезоэлектрический эффект состоит в деформации этих же кристаллов под действием внешнего электрического поля.

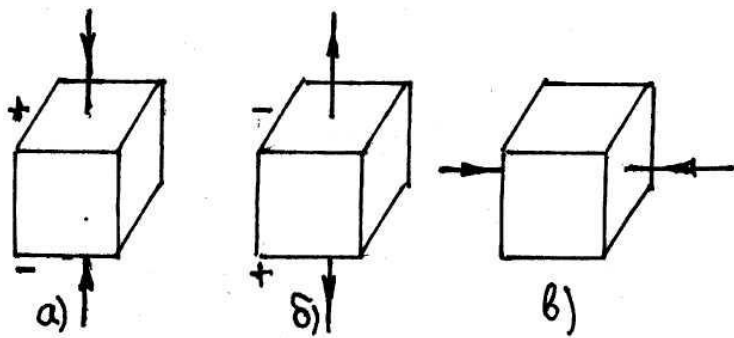


Рис. 16.

Из пьезоэлектрического кристалла вырезан кубик. При деформации сжатия на нем возникают заряды: на верхней грани – положительный, на нижней – отрицательный (рис.16,а). При деформации растяжения знаки зарядов меняются (рис.16,б). Заряды каких знаков возникнут на этих

гранях, если деформация сжатия кубика будет под действием поперечных сил (рис.16,в)?

63. **Емкость двух металлических шаров, находящихся на большом расстоянии.** Два металлических шара одинакового радиуса находятся на расстоянии друг от друга, много большем их радиуса. Какова емкость системы, образованной этими двумя шарами?

64. **Движение зарядов в электрическом поле конденсатора.** Протон и α -частица, двигаясь с одинаковыми скоростями, влетают в плоский заряженный конденсатор параллельно пластинам. Как различаются отклонения частиц электрическим полем конденсатора?

65. **Энергия конденсатора увеличивается.** Плоский конденсатор емкостью C_1 , в котором в качестве диэлектрика использована тонкая пластина с диэлектрической проницаемостью ϵ , заряжен до разности потенциалов U_1 .

Энергия конденсатора равна $W_1 = \frac{C_1 U_1^2}{2}$. После удаления пластины емкость конденсатора уменьшилась в ϵ раз и стала $W_2 = \frac{W_1}{\epsilon}$. Поскольку заряд на конденсаторе остался неизменным, разность потенциалов между его обкладками возросла во столько раз, во сколько уменьшилась емкость ($q=CU$), то есть $U_2 = \epsilon U_1$. Тогда энергия конденсатора после удаления диэлектрика стала равна $W_2 = \frac{C_2 U_2^2}{2} = \frac{C_1 \epsilon^2 U_1^2}{2} = \frac{C_1 U_1^2}{2} \epsilon^2$. Следовательно, энергия конденсатора возросла в ϵ^2 раз.

За счет чего же произошло увеличение энергии? Ведь конденсатор не был подключен к источнику тока.

66. **Как заряжать конденсатор?** Источник постоянного тока, имеющий ЭДС, равную \mathcal{E} , состоит из n последовательно соединенных одинаковых элементов. Как нужно заряжать конденсатор емкостью C , чтобы потери энергии

составляли наименьшую возможную долю запасенной конденсатором энергии? Какая это доля?

67. Электроемкость пластин конденсатора, удаленных на большое расстояние. Электроемкость плоского воздушного конденсатора уменьшается при увеличении расстояния между его обкладками. Уменьшается ли емкость конденсатора до нуля, если увеличить расстояние между обкладками до бесконечности?

68. Сила притяжения пластин конденсатора. Пластины заряженного конденсатора притягиваются друг к другу, так как они несут на себе разноименные заряды. Изменится ли эта сила притяжения, если ввести в конденсатор пластинку из диэлектрика, не прилегающую к пластинкам конденсатора?

69. Заземленный сферический конденсатор. Конденсатор – устройство, состоящее из двух электродов (обкладок), разделенных слоем диэлектрика, и предназначенное для накопления электрических зарядов. Способность конденсатора накапливать заряды характеризуется электроемкостью (или просто емкостью). Чтобы на емкость конденсатора не оказывали влияние окружающие тела, обкладкам придают такую форму, чтобы поле, создаваемое накопленными зарядами, было сосредоточено в узком зазоре между обкладками конденсатора. Этому условию удовлетворяют: 1) две плоские пластины; 2) два коаксиальных цилиндра; 3) две концентрические сферы. Поэтому в зависимости от формы обкладок конденсаторы делятся на плоские, цилиндрические и сферические.

На практике используются в основном плоские конденсаторы, состоящие из двух параллельных металлических пластин, расстояние между которыми много меньше их линейных размеров. Обычно такой конденсатор состоит из двух полос алюминиевой фольги, изолированных друг от друга специальной промасленной бумагой и свернутых в рулон. Полоски фольги (обкладки конденсатора) по отношению к изолирующей бумаге смещены по продольной оси в разные стороны, и после свертывания торцы рулона являются выводами обкладок. Одна полоса фольги соединена с корпусом конденсатора, другая – с его выводом.

Цилиндрический конденсатор используется только для учебных целей, и то очень редко. Что касается шарового конденсатора, то он вообще не применяется и имеет только чисто теоретическое значение, так как очень труден в изготовлении и имеет очень маленькую емкость. Попробуем разобраться, что будет происходить с емкостью сферического конденсатора, если соединить с землей одну из его обкладок. Один раз соединяется с землей внешняя сфера, другой раз – внутренняя. Будет ли одинакова емкость сферического конденсатора в этих двух случаях?

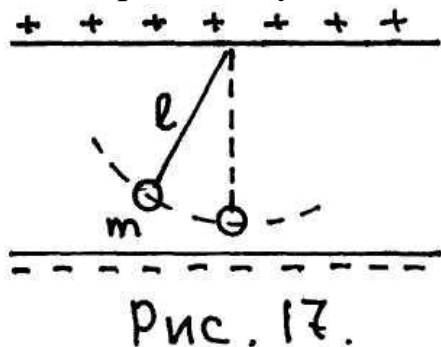
70. Зарядка конденсатора от аккумулятора. Конденсатор подключен к аккумулятору. Если раздвигать пластины конденсатора, то необходимо преодолеть силы электростатического притяжения между его пластинами и, следовательно, совершать положительную работу. На что идет эта работа? Что происходит с энергией конденсатора?

71. Работа при увеличении расстояния между пластинами конденсатора. Пластины плоского воздушного конденсатора раздвигаются на некото-

рое расстояние один раз, будучи все время подключенными к источнику напряжения, другой раз – отключенными от этого источника сразу же после первоначальной зарядки. В обоих случаях раздвижение происходит на одинаковое расстояние.

В каком из этих двух случаев нужно затратить на раздвигание пластин большую работу?

72. **Колебание математического маятника между обкладками конденсатора.** Между обкладками большого плоского воздушного конденсатора,

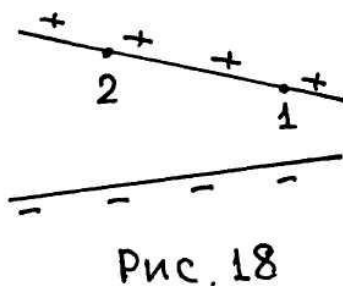


расположенными горизонтально, подвешен на нити длиной l маленький металлический шарик массой m (рис.17). Этот шарик при выведении его из положения равновесия будет совершать колебательные движения, то есть является математическим маятником. Верхняя пластина конденсатора заряжена положительно, нижняя – отрицательно.

Как изменится период колебаний маятника, если на шарик поместить: а) положительный заряд; б) отрицательный заряд?

73. **Рубильник с конденсатором.** В электрических цепях высокого напряжения для отключения нагрузки применяются рубильники. При размыкании рубильника наблюдается искрение, иногда очень сильное. Если же параллельно рубильнику подключить конденсатор, то искрение при размыкании рубильника прекращается. Почему?

74. **Тонкая металлическая пластинка между обкладками конденсатора.** В воздушный зазор между обкладками плоского конденсатора введена незаряженная очень тонкая металлическая пластинка. Металлическая пластинка расположена параллельно обкладкам конденсатора. Изменится ли емкость плоского конденсатора после введения в него металлической пластины?



Изменится ли емкость плоского конденсатора после введения в него металлической пластины?

75. **Конденсатор с непараллельными пластинами.** Конденсатор представляет собой две непараллельные пластины. В какой из точек – 1 или 2 – после зарядки такого конденсатора поверхностная плотность заряда больше (рис.18)?

76. **Перемещение заряда из одного конденсатора в другой.** Два конденсатора с разными расстояниями между пластинами соединены параллельно и присоединены к источнику напряжения. Из конденсатора А из точки 1, расположенной посередине между пластинами, переносится точечный положительный заряд q в конденсатор В в точку 2, находящуюся от отрицательной пластины на расстоянии, равном половине расстояния между пластинами конденсатора А (рис.19). Совершается ли при этом работа?



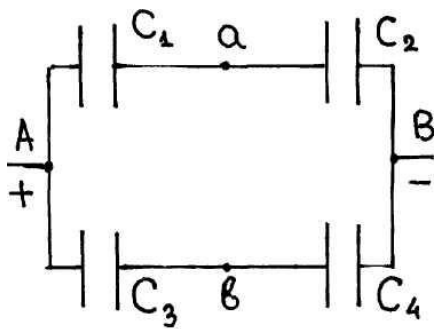


Рис. 20

77. *Разность потенциалов равна нулю.* Четыре конденсатора C_1 , C_2 , C_3 и C_4 соединены так, как показано на рис.20. Между точками А и В приложена разность потенциалов. Каким должно быть соотношение между емкостями конденсаторов, чтобы разность потенциалов между точками a и b была равна нулю?

78. *На каком конденсаторе больше напряжение?* Два конденсатора с одинаковыми линейными размерами, один из которых воздушный, а другой заполнен диэлектриком, соединены последовательно и присоединены к источнику напряжения. К какому конденсатору приложено большее напряжение?

79. *Проводящий резиновый шар.* Шар из проводящей резины помещен на изолированную подставку. Зарядив шар, соединяют его с электрометром. При этом стрелка электрометра отклоняется на некоторый угол. Увеличивая размеры шара, можно заметить уменьшение угла отклонения стрелки электрометра, хотя заряд шара не меняется. Следует ли из результатов, что потенциал проводника, заряженного одним и тем же зарядом, может принимать различные значения?

80. *Напряженность электрического поля конденсатора.* Обкладки плоского воздушного конденсатора присоединены к аккумулятору? Уменьшится ли напряженность электрического поля в этом конденсаторе, если его поместить в непроводящую жидкость?

III. Подсказки

1. При рассмотрении силы взаимодействия между заряженным кольцом и шариком необходимо учесть то, что сила – величина векторная.
2. На эбонитовом шаре в результате поляризации в электрическом поле разноименных зарядов с одной стороны шара появится отрицательный заряд, с другой – положительный.
3. При достаточно большой скорости заряд улетит в бесконечность, при малых скоростях будет колебаться.
4. В результате электрической индукции на бумажке появляются заряды и она притягивается к наэлектризованной палочке, но сила притяжения небольшая.
5. На незаряженном шарике в электрическом поле появляются индуцированные заряды.
6. На заряженное тело в электрическом поле действует кулоновская сила. В незаряженном теле кулоновская сила действует на индуцированные заряды.
7. Заряды на поверхности шаров из-за взаимного влияния распределяются неравномерно.
8. На пластинке образуется индуцированный заряд, который притягивает точечный заряд.
9. Положительные и отрицательные заряды металла имеют так называемую металлическую связь, при которой положительные ионы образуют кристаллическую решетку, а отрицательные электроны свободно перемещаются по решетке.
10. Выполняется закон сохранения энергии, а также закон сохранения заряда.
11. Избыточные заряды распределяются по поверхности проводника.
12. Избыточные заряды на полой металлической сфере располагаются на внешней поверхности.
13. С одной стороны наблюдается явление электростатической индукции, а с другой – заземление способствует стеканию заряда.
14. Электростатические эффекты зависят от влажности воздуха.
15. Переход зарядов с одного проводника на другой зависит от емкости и разности потенциалов.
16. В проводнике происходит в первый момент движение зарядов.
17. Банки имеют разный отрицательный заряд за счет облучения. Накопление заряда происходит за счет поляризации капли.
18. При электростатической индукции на клейкой ленте липкий слой и чистая сторона приобретают разные заряды.
19. Большие капли при падении заряжаются положительно, а маленькие капельки – отрицательно.
20. В пленке образуется статическое электричество.
21. При любой форме проводника все избыточные заряды скапливаются на внешней поверхности.

22. Потенциал электрического поля, создаваемого несколькими зарядами, является алгебраической суммой, а напряженность – геометрической.
23. Поле, создаваемое шаром и пластиной, неоднородное.
24. Потенциал в любой точке является алгебраической суммой потенциалов поля каждого заряда. Положительный потенциал у положительного заряда.
25. Напряженность поля равна нулю в точке, где $\frac{d\varphi}{dr} = 0$. Потенциал положительного и отрицательного зарядов имеют тот же знак.
26. Напряженность увеличивается только при движении со скоростью, соизмеримой со скоростью света.
27. Два проводника в поле заряженного тела могут иметь одинаковый потенциал при соединении их проволочкой.
- 28, 29. Напряженность электрического поля в любой точке является векторной суммой напряженностей поля каждого заряда.
30. С направлением касательной к силовой линии электрического поля совпадает ускорение заряда, а не его скорость.
31. Однородное электрическое поле изображается в виде параллельных силовых линий, находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга.
32. Необходимо определить работу при перемещении заряда в электрическом поле по замкнутому контуру.
33. Свечение газа (неона) происходит в электростатическом поле.
34. Напряженность электрического поля определяется плотностью силовых линий.
35. Поток вектора напряженности электрического поля пропорционален числу зарядов в замкнутой поверхности.
36. У полого шара потенциалы внутренней и внешней поверхности одинаковы.
37. Избыточные заряды располагаются по поверхности проводника.
38. Заряженный шарик в проводнике индуцирует возникновение электрических зарядов.
39. Рассмотреть явление электростатической индукции.
40. Металлическая сфера не изменяет действия заряженного шарика на бумажку, а сфера вокруг бумажки приведет к отсутствию действия на нее заряда.
41. При электростатической индукции на бумажке появится заряд, и она будет притягиваться, при передаче на бумажку заряда при контакте будет отталкиваться.
42. Избыточные заряды распределяются на поверхности проводника, а внутри проводника напряженность электрического поля равна нулю.
43. Точечный заряд индуцирует на проводящей пластинке заряды.
44. Электрическое поле зарядов наводит на металлическом шаре заряды противоположных знаков.
45. При электростатической индукции на шарике с разных сторон наводятся противоположные заряды.

46. На перьях птицы при включении напряжения возникает электростатический заряд.
47. При заземлении проводника часть положительных зарядов стекает на землю.
48. На стеклянной полочке заряды появляются при электризации, а на медной – при электростатической индукции.
49. Заряженный полый проводник соединяем проволокой с проводником внутри полости.
50. Вблизи клемм аккумулятора очень слабое электрическое поле.
51. Капли воды электризуются и начинают притягиваться друг к другу.
52. При трении некоторых пар материалов может произойти переход электронов с одного тела на другое.
53. Частицы снега передают электроны металлическим предметам.
54. При падении сахарная пудра электризуется.
55. Электризация на бензовозах и автомобилях возникает, но никакой опасности не представляет.
56. Перемещение заряда из одной точки эквипотенциальной поверхности в другую происходит без изменения энергии.
57. Энергия взаимодействия определяется взаимодействием каждого заряда с остальными.
- 58, 59. Энергия конденсатора зависит от ёмкости конденсатора, которая, в свою очередь, зависит от площади пластин, расстояния между ними и диэлектрической проницаемости диэлектрика между пластинами.
60. Смотри ответ к задаче 58.
61. Смотри ответ к задаче 59.
62. При деформации сжатия в поперечном направлении в продольном направлении возникает растяжение.
63. При последовательном включении двух одинаковых конденсаторов общая ёмкость уменьшается в два раза.
64. В направлении силовых линий электрического поля заряженная частица движется с ускорением, которое зависит от величины заряда и массы частицы.
65. Совершается работа по удалению диэлектрика из конденсатора.
66. Заряжать конденсатор следует последовательно, сначала от одного источника, затем от двух и так далее.
67. Любые два тела, находящиеся на любом расстоянии друг от друга, являются конденсатором.
68. В зазоре между диэлектриком и пластинкой конденсатора поле не меняется.
69. Ёмкость сферического конденсатора зависит от того, какая сфера заземлена.
70. Происходит уменьшение заряда на пластинах конденсатора.
71. Работа зависит от действия сил взаимодействия между зарядами на пластинах.

72. Действие кулоновской силы на заряженный шарик будет изменять ускорение, действующее на шарик.

73. Увеличение ёмкости приводит к исчезновению искрения.

74. Пластина между обкладками конденсатора приводит к возникновению двух последовательно включенных конденсаторов.

75. Поверхностная плотность заряда пропорциональна напряжённости электрического поля.

76. У точки 1 в конденсаторе А и у точки 2 в конденсаторе В неодинаковые потенциалы.

77, 78. При последовательном включении конденсаторов заряды на них будут одинаковыми.

79. Электромметр определяет потенциал поверхности проводника.

80. Если конденсатор подключен к аккумулятору, напряжение на пластинах не меняется.

IV. Ответы

1. Если взять заряженное кольцо и маленький шарик с противоположным зарядом, помещённый в центр кольца, то сила, действующая со стороны кольца на шарик, будет равна нулю. Дело в том, что при делении кольца на равные элементарные участки любая пара участков с противоположных сторон будет действовать на шарик с результирующей силой, равной нулю. Так как система по отношению к шарика симметричная, то сила, действующая на шарик, естественно, будет равна нулю. Если удалять шарик вдоль оси кольца, то сила притяжения будет увеличиваться и на некотором расстоянии от центра кольца достигнет максимального значения. При дальнейшем удалении шарика сила притяжения начнёт уменьшаться и в бесконечности станет равна нулю. Таким образом, если маленький заряженный шарик будет двигаться по оси кольца из точки, где сила притяжения имеет максимальное значение, в центр кольца, то сила притяжения при сближении будет уменьшаться и в центре кольца станет равной нулю.

2. Эбонитовый шарик, который является диэлектриком, помещенный между положительным и отрицательным точечными зарядами, силу притяжения между ними увеличит. Обозначим рассматриваемые заряды через q_1 (положительный) и q_2 (отрицательный) (рис. 21). В результате процесса поляризации правая часть шара будет иметь положительный заряд q_3 , а левая - отрицательный заряд q_4 такой же величины.

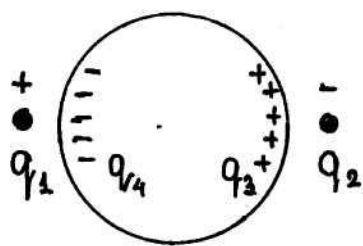


Рис. 21.

Поэтому, например, на заряд q_2 будут действовать три силы: сила F_1 со стороны заряда q_1 , сила F_3 со стороны заряда q_3 и сила F_4 со стороны заряда q_4 . Так как силы F_1 и F_3 совпадают по направлению, F_4 направлена в противоположную сторону, то результирующая сила равна $R = F_1 + F_3 - F_4$. Но поскольку заряд q_2 ближе к заряду q_3 , чем к заряду q_4 , то F_1 будет больше F_4 , и поэтому равнодействующая сила будет

больше силы F_1 , то есть эбонитовый шар силу взаимодействия между разнотипными заряженными точечными телами увеличивает. Аналогично и металлический шар будет увеличивать силу взаимодействия.

3. Если точечный заряд находится в центре заряженного противоположным знаком кольца, то он находится в равновесии и обладает потенциальной энергией электрического поля, которое создает ему кольцо. При сообщении начальной скорости заряду вдоль оси кольца, характер его движения будет зависеть от величины скорости. Если скорость заряда будет такой, что его кинетическая энергия станет больше потенциальной энергии заряда в центре кольца, то заряд улетит в бесконечность. При меньшей скорости, когда кинетическая энергия заряда будет меньше его потенциальной энергии в центре кольца, заряд будет совершать периодическое колебательное движение вдоль оси кольца.

4. Под действием электрического поля наэлектризованной палочки в мелких обрезках бумажек происходит разделение зарядов, и обрезки начинают притягиваться за счет кулоновских сил, так как заряд противоположного знака

бумажки будет ближе к наэлектризованной палочке. Таким образом, никакого противоречия закону Кулона нет, учитывая то, что происходит взаимодействие между зарядами на палочке и зарядами бумажек.

Под действием электрического поля заряженной палочки в металлических опилках также происходит разделение зарядов, и на опилки действуют кулоновские силы притяжения, но эти притяжения меньше силы тяжести. Так как кулоновские силы меньше сил тяжести, то создаётся впечатление, что кулоновские силы притяжения на металлические опилки не действуют.

5. Если электрическое поле однородно, то на шарик поле действовать не будет. Если же поле неоднородно, то будет действовать с силой, направленной в ту сторону, где напряжённость поля больше (см. ответ «Металлический шар в различных электрических полях»).

6. На положительный заряд в электрическом поле действует сила, совпадающая по направлению с напряжённостью электрического поля. Если электрическое поле изображено силовыми линиями (рис. 1), то направление силовых линий совпадает с направлением напряжённости. Следовательно, положительно заряженный шар во всех электрических полях будет двигаться по направлению силовых линий, в нашем случае – вправо. Очевидно, что отрицательно заряженный шар будет двигаться в сторону, противоположную направлению силовых линий, в нашем случае – влево.

Если незаряженный металлический шар поместить в электрическое поле, то свободные электроны внутри шара начнут перемещаться против направления поля. С противоположной стороны шара останется нескомпенсированный положительный заряд (рис.22). Движение зарядов будет происходить до тех пор, пока внутреннее поле, созданное сместившимися зарядами, не скомпенсирует внешнее электрическое поле, то есть внутри металлического шара напряженность поля будет равна нулю.

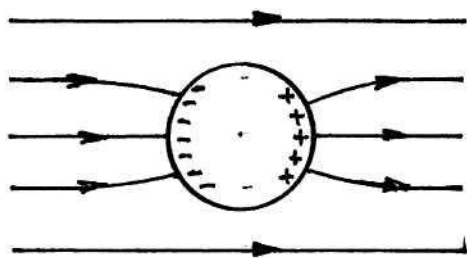


Рис. 22.

Таким образом, на незаряженном металлическом шаре в электрическом поле с одной стороны будет появляться отрицательный заряд, с другой - положительный, равные по величине. На эти заряды будут действовать силы, на положительный заряд по направлению силовых линий, на отрицательный – в противоположную сторону. При изображении электрического поля с помощью силовых линий напряженность электрического поля определяется по густоте силовых линий: чем гуще силовые линии, тем больше напряженность и, соответственно, тем больше сила, действующая на заряд.

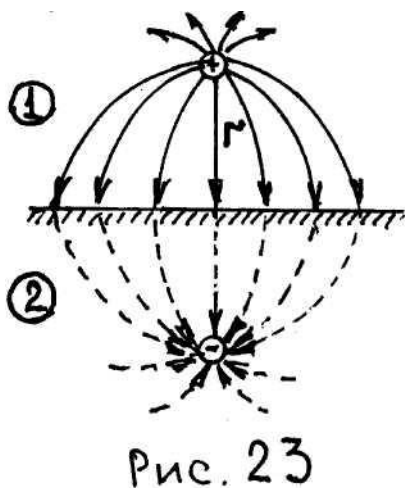
Следовательно, в электрическом поле, изображенном на рис.1,а, на положительный заряд в шаре будет действовать сила больше, чем на отрицательный, и шар будет двигаться вправо. В поле на рис.1,б шар будет двигаться влево. В случае электрического поля однородного (рис.1,в) шар будет оставаться в покое.

Кстати, шар из диэлектрика будет вести себя точно так же, как и металлический шар, так как в результате поляризации одна сторона шара будет заря-

жена положительно, другая – отрицательно, только величина зарядов будет меньше при одинаковой силе электрического поля.

7. Если расстояние между шарами невелико, заряды на их поверхности будут распределены неравномерно. Взаимное влияние шаров приводит к тому, что повышенная поверхностная плотность зарядов возникает в случае одноименных зарядов на удаленных друг от друга участках шаров, и в случае разноименных зарядов – на участках, близких друг к другу. Поэтому расстояние между «центрами тяжести» зарядов при одноименных зарядах больше, чем при разноименных, и, соответственно, сила притяжения разноименно заряженных шаров будет больше, чем сила отталкивания (по модулю) одноименно заряженных шаров.

8. Под действием электрического поля точечного положительного заряда $+q$ в незаряженной проводящей плоскости появляются индуцированные заряды. На ближней к заряду $+q$ поверхности пластины образуется отрицательный поверхностный заряд $-q$ (на этой поверхности заканчиваются все силовые линии, выходящие из заряда $+q$). Поэтому пластина притягивает заряд. Чтобы найти силу притяжения, рассмотрим электростатические поля над пластинкой, где расположен заряд $+q$ (область 1 на рис.23), и с противоположной стороны пластинки (область 2 на рис.23). Электростатическое поле не проникает внутрь проводника (область 2). Это означает, что поле заряда $+q$ и индуцированного заряда пластины компенсируют друг друга во всей области 2. Следовательно, поле индуцированного заряда в области 2 совпадает с полем заряда $-q$, расположенного симметрично заряду $+q$ относительно поверхности пластинки. Это поле действует на заряд $+q$ с силой $F = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0(2r)^2}$. Используемый здесь метод называется методом электрического изображения.



Электростатическое поле не проникает внутрь проводника (область 2). Это означает, что поле заряда $+q$ и индуцированного заряда пластины компенсируют друг друга во всей области 2. Следовательно, поле индуцированного заряда в области 2 совпадает с полем заряда $-q$, расположенного симметрично заряду $+q$ относительно поверхности пластинки.

Это поле действует на заряд $+q$ с силой $F = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0(2r)^2}$. Используемый здесь метод называется методом электрического изображения.

9. При сближении атомов металлов происходит образование кристаллической структуры, в узлах которой находятся положительно заряженные ионы, а электроны начинают свободно перемещаться по этой кристаллической структуре. Отрицательно заряженный «электронный газ» удерживает положительно заряженные ионы металла на определённых расстояниях друг от друга. Такая связь называется металлической.

При облучении металла рентгеновскими лучами или другими видами излучения свободные электроны получают избыточную энергию, которой становится достаточно, чтобы преодолеть силы связи и удалиться с поверхности металла. В металлической пластине остаётся некомпенсированный положительный заряд, то есть металлическая пластина при облучении заряжается положительно.

10. Металлический заряженный шарик 2 (рис. 2), находящийся на высоте H над заряженным металлическим шариком 1, обладает потенциальной энергией поля силы тяжести и электростатического поля. При падении шарика 2 по-

тенциальная энергия переходит в кинетическую, и при упругом центральном ударе шариков скорость шарика 2 меняется по направлению на противоположное, но не меняется по величине (шарик 1 жестко закреплён). Так как при упругом ударе не изменилась величина скорости, то не изменилась и кинетическая энергия шарика 2. По закону сохранения энергии шарик должен подняться на ту же величину, с которой он начал падение; наличие зарядов не изменяет результатов соударения.

Если незаряженный металлический шарик 2 находится на высоте H над заряженным шариком 1, то потенциальная энергия поля силы тяжести шарика 2 при падении переходит в кинетическую. В момент столкновения заряды с шарика 1 частично переходят на шарик 2. И теперь шарик 2, обладая кинетической энергией поля упругого удара, будет подниматься на большую высоту, чем та, с которой он падал, так как будет добавляться энергия за счёт электростатического отталкивания одноимённых зарядов.

11. Заряды при соединении проволочкой заряженного и незаряженного проводников перетекать не будут в том случае, если заряженный проводник полый, а незаряженный проводник находится внутри этой полости. В этом случае заряды у полого проводника будут распределены по внешней поверхности, а внутри проводника напряжённость электрического поля равна нулю, поэтому на незаряженный проводник, находящийся внутри полости, заряды перетекать не будут.

12. В незаряженном проводнике заряды отрицательных электронов компенсируются положительным зарядом протонов. Но, если проводник заряжен, баланс нарушается. Допустим, что проводник заряжен отрицательно, то есть в нём есть избыток электронов. Так как электроны могут свободно двигаться, то они, отталкиваясь друг от друга, разойдутся на максимально возможное расстояние и расположатся на поверхности проводника. Оставшиеся внутри электроны сбалансируют положительные заряды, и напряжённость поля внутри проводника будет равна нулю.

Если проводник заряжен положительно, то положительные заряды будут располагаться на поверхности, а внутри напряжённость также будет равна нулю из-за компенсации положительных и отрицательных зарядов. Так как внутри проводника суммарный заряд равен нулю, то ничего не изменится, если внутреннюю часть проводника удалить, оставив лишь тонкую оболочку. В оставшейся полости напряжённость поля равна нулю, хотя она и окружена заряженным проводником.

Таким образом, если заряженный проводник ввести внутрь другого полого изолированного проводника и прикоснуться заряженным проводником к его внутренней стенке, то заряд целиком перейдет на внешнюю поверхность этого второго проводника.

13. Заряженный шарик, помещённый внутрь полой проводящей сферы, индуцирует на внутренней поверхности заряд, равный по величине, но противоположный по знаку заряд шарика. На внешней поверхности сферы появится заряд такой же величины и того же знака, что и заряд шарика. Если сферу на короткое время соединить с землёй, то заряд с внешней части сферы уйдёт на

землю, а на внутренней части останется. После этого заряженный шарик сразу же удаляется из сферы и заряд, оставшийся на внутренней поверхности, перейдет на внешнюю поверхность сферы и по величине будет точно таким же, как заряд шарика.

Напряжённость поля внутри сферы будет равна нулю. Вне сферы будет существовать электрическое поле, подобное полю, если бы заряд сферы был помещён в центре сферы.

14. Обычно влажность воздуха зимой ниже, чем летом, особенно внутри отапливаемых помещений. А повышенная влажность благоприятствует стеканию зарядов. Поэтому электростатические эффекты лучше наблюдаются зимой.

15. Пусть потенциал шара 1 равен φ_1 , а потенциал шара 2 равен φ_2 . Так как шарик 3 значительно меньше шаров 1 и 2, то, соединив его с шаром 1 или 2, мы практически не меняем потенциал этого шара. Поэтому, если у шарика 3 ёмкость равна C , то заряд, который он приобрёл от шара 1, равен $q_1 = C\varphi_1$, а от шара 2 – $q_2 = C\varphi_2$.

Если соединить шарик 3 с шарами 1 и 2 одновременно, то потенциал этих шаров станет равным $\varphi = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2)$, так как шары 1 и 2 одинаковы, а шарик 3 очень мал. Следовательно, заряд, приобретённый шариком 3, равен

$$q = C\varphi = \frac{1}{2}C(\varphi_1 + \varphi_2) = \frac{1}{2}C\varphi_1 + \frac{1}{2}C\varphi_2 = \frac{1}{2}q_1 + \frac{1}{2}q_2.$$

Таким образом, заряд, приобретённый шариком 3 от двух шаров 1 и 2 одновременно, равен $q = \frac{1}{2}q_1 + \frac{1}{2}q_2$.

16. Потенциал точки А выше потенциала точки В лишь до тех пор, пока в поле не внесён проводник АВ. После внесения этого проводника в нём начнется перемещение зарядов, благодаря чему конец В заряжается положительно, а конец А – отрицательно. В результате в проводнике образуется поле, направленное противоположно первоначальному. Складываясь, эти поля уничтожают друг друга. Следовательно, можно сказать, что ток наблюдается только в первый момент, а затем исчезает.

17. Прибор необходимо отрегулировать так, чтобы вытекающие из трубок струйки разбивались на капли примерно на уровне верхних банок. Вначале, когда включают воду, одна банка имеет чуть больший отрицательный заряд, чем другая. Какая именно из банок имеет больший заряд, определяется чистой случайностью, так как изначальный заряд банок обусловлен космическим излучением или естественной радиоактивностью (см. «Заряд пластины при облучении»). Допустим для определённости, что больший отрицательный заряд имеет нижняя левая банка (рис. 3). Тогда, поскольку банки соединены крест-накрест между собой проводами, верхняя правая банка будет также иметь больший отрицательный заряд, чем верхняя левая. Правая струйка, проходя через верхнюю правую банку, поляризуется. Если капли образуются именно на уровне этой банки, то они заряжаются положительно, так как отрицательный заряд отталкивается отрицательно заряженной банкой вверх по струйке. Далее эти положительно заряженные капли падают в нижнюю правую банку, и её положительный заряд возрастает. Несмотря на то, что начальная разность потенциалов

между банками ничтожна, в некоторых самодельных капельницах Кельвина удаётся получить разность потенциалов до 15 кВ.

18. Происходит разделение зарядов при сматывании клейкой ленты с рулона. Липкий слой приобретает заряд, знак которого противоположен знаку заряда на чистой стороне ленты. Свечение – это электрический разряд между разделяемыми поверхностями клейкой ленты.

19. Почему при появлении в воде капля происходит разделение зарядов, пока окончательно не выяснено. Однако ещё в XIX веке было доказано, что более крупные капли в брызгах воды имеют положительный заряд, а капли поменьше – отрицательный. Поскольку большие капли оседают быстрее, в воздухе остаются отрицательно заряженные маленькие капельки, которые создают довольно значительное электрическое поле.

20. Слипание плёнки и её прилипание к горлышку сосуда обусловлено статическим электричеством. Если в слое плёнки, непосредственно прилегающем к металлической стенке, имеется избыток электронов, то этот слой отталкивает электроны металла. Таким образом, прилегающий к плёнке участок металла становится положительно заряженным и притягивает плёнку. Поскольку плёнка – плохой проводник, её статический заряд не уходит в металл. В результате она прилипает к металлу. Статический заряд плёнки неизбежно возникает в процессе изготовления. Разделение зарядов может происходить и при разматывании рулона: чем быстрее тянуть плёнку, тем сильнее она электризуется (см. «Свечение клейкой ленты»). Во влажном воздухе заряд быстро уходит с плёнки, и она не слипается; по той же причине плёнка не прилипает к горлышку мокрого сосуда.

21. Тонкий проводящий заряженный лист имеет заряды, распределённые по верхней и нижней поверхности. Эти заряды создают электрические поля с двух сторон листа с одинаковым значением напряженности электрического поля. После сворачивания листа в форме цилиндра все электрические заряды скапливаются на внешней поверхности цилиндрического проводника, а на внутренней стороне заряды отсутствуют. Поэтому внутри цилиндра напряжённость электрического поля стала равной нулю, а на внешней поверхности увеличилась.

22. Так как потенциалы складываются алгебраически, то в точке, лежащей посередине между зарядами на прямой, соединяющей эти заряды, потенциал будет иметь максимальное значение. По мере удаления от середины промежутка между зарядами на r , потенциал непрерывно убывает с ростом r одинаково, на обе стороны от линии, соединяющей заряды. При этом на больших расстояниях ($r \gg a$, где a – расстояние между зарядами) потенциал изменяется по тому же закону, что и потенциал точечного заряда, равного $2q$ (q – величина заряда одного точечного заряда). В бесконечности потенциал равен нулю. Напряжённость электрического поля в точке, лежащей посередине между зарядами, будет равна нулю (геометрическая сумма). Затем по мере удаления от середины промежутка между зарядами в перпендикулярном направлении напряжённость поля увеличивается и достигает максимума при $r = \frac{a}{2}$. После дости-

жения максимума дальнейшего увеличения r приводит к уменьшению напряжённости поля, и в бесконечности она равна нулю.

23. Все эквипотенциальные поверхности электрического поля между шаром и пластиной обращены выпуклостью в сторону пластины. Поэтому на любой прямой, параллельной пластине, точки, более удаленные от шара, имеют потенциал ниже ($\varphi_1 > \varphi_2 > \varphi_3 > \varphi_4$), чем более близкие точки (рис.24). Следовательно, перенос заряда происходит из точки с более низким (точка 1) в точку с более высоким (точка 2) потенциалом. В этом случае необходимо совершить работу против сил электрического поля.

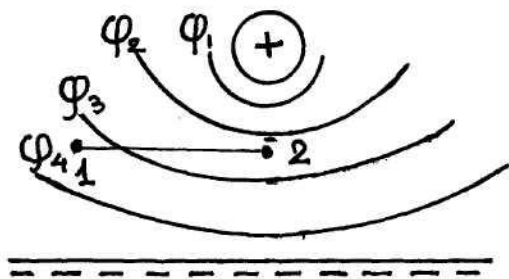


Рис. 24

24. Потенциал в каждой точке представляет собой алгебраическую сумму потенциалов поля каждого заряда. Для точечного заряда потенциал на расстоянии r (предполагаем потенциал в бесконечности равным нулю)

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

При одинаковых по знаку зарядах модуль потенциала в точке, удаленной от одного заряда на расстояние r ,

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{l-r} \right),$$

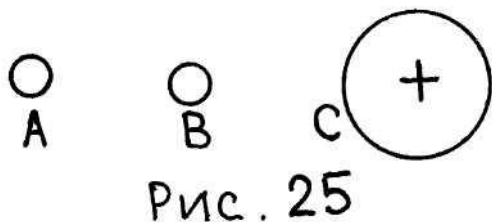
где l – расстояние между зарядами. Знак потенциала совпадает со знаком заряда. Таким образом, в случае, показанном на рис.5,а, оба заряда положительные, а в случае, показанном на рис.5,в, – отрицательные. При разноименных зарядах потенциал в точке, расположенной посередине между зарядами, равен нулю. Положительный потенциал ближе к положительному заряду слева в случае, показанном на рис.5,б, и справа в случае, показанном на рис.5,в.

25. Напряжённость поля равна нулю только в одной точке 3, так как формула $E = -\frac{d\varphi}{dr} = 0$ только в точке 3. Так как вблизи заряда q_2 потенциал отрицательный, а вблизи q_1 – положительный, то заряды q_2 и q_1 соответственно отрицательный и положительный. Потенциал в каждой точке представляет собой алгебраическую сумму потенциалов каждого заряда. Потенциал справа от заряда q_2 (для исключения наиболее близкой для него области) положительный. Это значит, что во всей остальной области справа от q_2 потенциал заряда q_1 по модулю больше, чем потенциал заряда q_2 . Соответственно по модулю больше и сам заряд q_1 .

26. Если скорость движения плоского конденсатора много меньше скорости света, то напряжённость останется неизменной. Если же скорость движения конденсатора соизмерима со скоростью света, то напряжённость поля конденсатора поменяется. Действительно, если l_0 – длина пластин конденсатора в системе, относительно которой он покоится, то в системе, относительно которой он движется со скоростью V , его длина $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$, где c – скорость света.

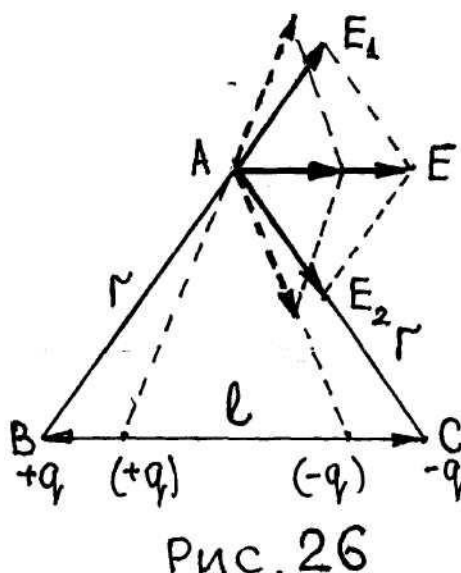
Поскольку поперечные размеры пластины не меняются, в таком же отношении находится и площадь пластин. Так как заряд конденсатора сохраняется постоянным, то увеличивается поверхностная плотность заряда, а следовательно, и напряжённость поля $E = \frac{E_0}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

27. Если два проводника находятся в электрическом поле, созданном другими телами, то разности потенциалов может и не быть. Пусть, например, незаряженные металлические шары А и В находятся в поле положительно заряженного шара С (рис.25). Если соединить шары А и В тонкой проволокой, то шар А зарядится положительно, а шар В – отрицательно, причем потенциалы их будут одинаковыми. Убрав теперь проволоку, получим два разноименно заряженных проводника, между которыми нет разности потенциалов.



зарядится положительно, а шар В – отрицательно, причем потенциалы их будут одинаковыми. Убрав теперь проволоку, получим два разноименно заряженных проводника, между которыми нет разности потенциалов.

28. Напряженность электрического поля в точке А, находящейся на расстоянии r от зарядов $+q$ и $-q$ диполя, равна $E_1 = E_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$. Результирующая напряженность является геометрической суммой $E = E_1 + E_2$ (рис.26). Из подобия треугольников имеем $\frac{E}{E_1} = \frac{l}{r}$, и тогда результирующая напряженность в точке А равна $E = \frac{ql}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^3}$.



29. То, что результирующая напряженность электрического поля диполя будет тем меньше, чем меньше расстояние между зарядами, легко увидеть на рис.26.

30. Высказывание о том, что заряженная частица должно двигаться вдоль силовой линии, неправильное. На электрический заряд действует сила, равная напряженности поля, умноженной на величину заряда. Заряд получит ускорение, направленное по касательной к силовой линии. Но если силовые линии кривые, а не прямые, то с направлением силовой линии совпадает ускорение, но не скорость заряда. Поэтому электрический заряд не может двигаться вдоль силовой линии.

31. В электрическом поле на заряд действует сила и заряд получает ускорение, направленное по касательной к силовой линии. Если силовые линии электрического поля прямые, то с направлением вектора ускорения совпадает вектор скорости, и тогда заряд будет двигаться вдоль силовой линии электрического поля. Силовые линии в виде прямых будут в случае однородного электрического поля и в случае уединенных точечных зарядов.

32. Электрическое поле является потенциальным полем, в котором работа при перемещении заряда по любому замкнутому контуру равна нулю. Рассмотрим контур 1234 (рис.27), по которому в электрическом поле, представленном в

условии задачи, перемещается заряд. При перемещении заряда по участкам 12 и 34 работа совершаться не будет, так как сила, действующая на заряд, перпендикулярна к перемещению, а при перемещении заряда по участкам 23 и 41 работы будут противоположны по знаку и различны по величине, так как напряженности поля, а значит, и действующие на заряды силы различны по величине, а перемещения равны между собой. Поэтому сумма всех работ по перемещению заряда по контуру 1234 не будет равна нулю, следовательно, такое электрическое поле невозможно.

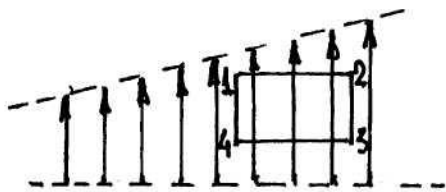


Рис. 27

Аналогично можно доказать, что электрическое поле, изображенное с помощью силовых линий на рис.9, также существовать не может, так как напряженность определяется плотностью силовых линий, а она в различных точках поля неодинакова.

33. Для свечения газа в неоновой лампочке необходимо создать в ней электрическое поле. В результате трения происходит электризация и на стеклянном баллоне неоновой лампы возникают электрические заряды, поле которых вызывает кратковременное свечение лампы.

34. Линии вектора напряженности электрического поля при приближении к твердому диэлектрику сгущаются, что свидетельствует о том, что на его поверхности существует повышенная плотность связанных зарядов и больше напряженность поля. Так как напряженность поля обратно пропорциональна диэлектрической проницаемости, то $\epsilon_2 < \epsilon_1$.

35. Точечный отрицательный заряд находится в центре заряженной металлической сферы.

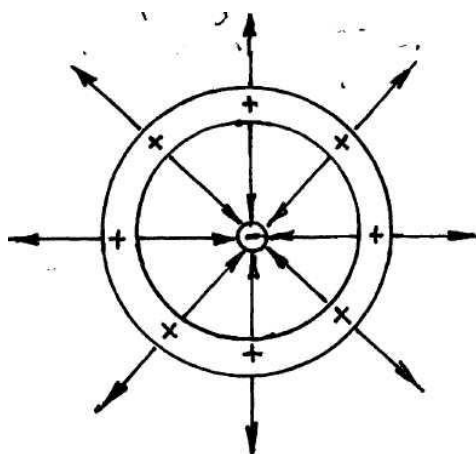


Рис. 28

Заряженная сфера внутри имеет напряженность электрического поля, равную нулю. Поэтому силовые линии отрицательного заряда внутри сферы направлены к заряду (рис.28) и напряженность определяется по формуле для точечного заряда $-q$. Вне сферы, заряд которой равен $+2q$, число силовых линий и напряженность электрического поля определяется суммарным зарядом, т.е. $+q$. Следовательно, число силовых линий будет такое же, как внутри сферы, но направлены они от сферы перпендикулярно поверхности (рис.28).

36. Шар зарядится. Действительно, если бы металлический шар был соединен проволокой не с внутренней поверхностью полого медного шара, а с наружной, то он приобрел бы положительный заряд. Но медный шар является проводником, и поэтому потенциал его внутренней поверхности такой же, как наружной. Следовательно, металлический шар зарядится и тогда, когда он соединен с внутренней поверхностью медного шара.

Механизм этого процесса таков. Электроны, находящиеся на металлическом шаре, и в проводнике, соединяющем шары, будут притягиваться к поло-

жительным зарядам медного шара и сначала перейдут на его внутреннюю поверхность, а затем на наружную. В результате металлический шар приобретет положительный заряд.

37. С незаряженного металлического шара заряды могут перетекать на заряженный в электростатическом поле, созданном другими телами. Пусть, например, шар А заряжен отрицательно, а шар В не заряжен, но находится вблизи отрицательно заряженного шара С (рис.29). Если заряд шара А очень мал, то после соединения шаров А и В проволокой отрицательные заряды станут перетекать с незаряженного шара В на заряженный шар А. При этом отрицательный заряд шара А будет увеличиваться, если заряд шара С будет в несколько раз больше заряда шара А. Если слова «заряды стали перетекать» понимать буквально, то можно дать более простой ответ. Пусть металлический шар А заряжен положительно, а металлический шар В не заряжен. Если соединить их проволокой, то формально можно считать, что положительные заряды будут перетекать с шара А на шар В. Однако в действительности дело обстоит иначе: электроны будут перетекать с незаряженного шара В на заряженный шар А.

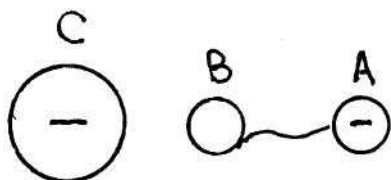


Рис. 29.

Если шар А заряжен положительно, а металлический шар В не заряжен. Если соединить их проволокой, то формально можно считать, что положительные заряды будут перетекать с шара А на шар В. Однако в действительности дело обстоит иначе: электроны будут перетекать с незаряженного шара В на заряженный шар А.

38. Если заряженный шарик поместить в пространство, где отсутствовало электрическое поле, вблизи незаряженного проводника, то в проводнике появятся индуцированные заряды, вокруг которых будет возникать электрическое поле.

39. Положительно заряженный шар создаёт вокруг себя электрическое поле. Если в это поле внести проводник, то свободные электроны, которые имеются в проводнике, начнут притягиваться к шару и перемещаться к одному концу проводника, на другом же конце окажется недостаток электронов. Поэтому на концах проводника возникнут заряды разных знаков.

При удалении заряженного шара на заряды в проводнике перестают действовать внешние силы, заряды «перемешиваются», нейтрализуются, и весь проводник становится нейтральным. Если же проводник разделяется на две части до того, как шар будет удалён, то заряды уже не смогут «перемешаться», и обе разделённые части проводника останутся заряженными, причём заряды на них будут противоположных знаков. Следовательно, близость заряженного тела влияет на электрическое состояние другого тела. Рассмотренное явление называется электростатической индукцией, или электризацией через влияние.

С помощью положительно заряженного шара А, не уменьшая заряда, можно зарядить два других шара, один – положительно, другой – отрицательно, следующим образом. Положительно заряженный шар А и два других проводящих шара В и С располагаются на одной прямой (рис.30). Шары В и С приводят в соприкосновение друг с другом. В результате электрической индукции шар В будет иметь отрицательный заряд,

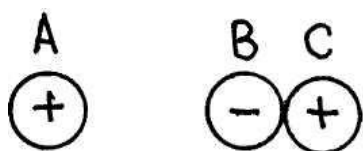


Рис. 30

С помощью положительно заряженного шара А, не уменьшая заряда, можно зарядить два других шара, один – положительно, другой – отрицательно, следующим образом. Положительно заряженный шар А и два других проводящих шара В и С располагаются на одной прямой (рис.30). Шары В и С приводят в соприкосновение друг с другом. В результате электрической индукции шар В будет иметь отрицательный заряд,

В результате электрической индукции шар В будет иметь отрицательный заряд,

а шар С – положительный. Затем, не убирая шар А, шары В и С удаляют друг от друга, и на них остаются заряды противоположного знака.

Можно то же самое осуществить, если шар А будет иметь отрицательный заряд.

40. Если окружить заряженный шарик concentрической металлической сферой, то на внутренней поверхности сферы появится индуцированный заряд, равный по величине, но противоположный по знаку заряду шарика; вследствие этого на внешней поверхности сферы появится заряд такой же величины и того же знака, что и заряд шарика. Он создает во внешнем пространстве такое же электрическое поле, какое создал бы шарик. И шарик, и металлическая сфера действуют, как на заряд, сосредоточенный в точке, находящейся в центре шарика, поэтому сила, действующая на бумажку, не изменится. Если окружить сферой бумажку, сила притяжения обратится в нуль, так как заряд появится на поверхности металлической сферы. Металлическая сфера будет притягиваться к шарика, а бумажка нет.

41. Стеклянная палочка, потертая о шелк, в результате электризации приобретает положительный заряд. При приближении к маленькой бумажке заряженной стеклянной палочки под действием электрического поля палочки в бумажке происходит разделение зарядов, отрицательные заряды в бумажке притягиваются ближе к стеклянной палочке, а положительные перемещаются на противоположную сторону бумажки. Так как отрицательные заряды будут находиться в бумажке ближе к стеклянной палочке, то на них будет действовать большая сила притяжения, чем сила отталкивания, действующая на положительные заряды, которые находятся дальше от палочки. Таким образом, маленькая бумажка начнет притягиваться к заряженной стеклянной палочке до тех пор, пока не придет в соприкосновение.

В момент соприкосновения на бумажку перейдет часть положительных зарядов со стеклянной палочки и бумажка начнет отталкиваться от палочки.

42. Если взять два проводника в виде concentрических полых шаров (рис.31), то при зарядке внутреннего шара на внешнем будут появляться индуцированные заряды. Пусть внутренний шар заряжен положительно, тогда на внутренней поверхности внешнего шара появятся отрицательные заряды, на внешней – положительные.

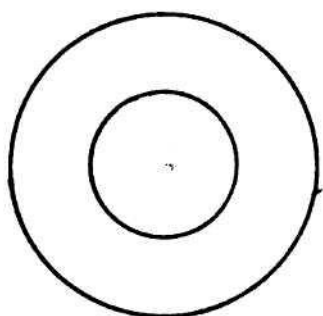


Рис. 31.

При зарядке внешнего шара все заряды будут распределяться на внешней поверхности этого шара. Внутри шара напряженность электрического поля будет равна нулю. Поэтому на внутреннем шаре индуцированные заряды возникать не будут. Следует заметить, что форма проводников не обязательно должна быть шаровой.

Важно, чтобы один полый проводник находился внутри другого полого проводника.

43. Если на некотором расстоянии r от большой металлической пластинки поместить точечный заряд $+q$, то на поверхности этой пластинки будут индуцироваться заряды. И со стороны электрическое поле будет являться суммар-

ным полем заряда $+q$ и индуцированных зарядов на поверхности пластинки. Поле же индуцированных зарядов на противоположной стороне пластинки будет эквивалентно полю точечного заряда $-q$, помещённого на расстояние r симметрично заряду $+q$ (см. «Взаимодействие между плоскостью и точечным зарядом»).

Таким образом, сила, действующая на точечный заряд $+q$ со стороны индуцированных на поверхности металла зарядов, равна той силе, с которой действовал бы на него заряд $-q$, расположенный по другую сторону от границы металлической пластинки симметрично заряду $+q$. Эта сила, разумеется, приводит к притяжению заряда и пластинки. Аналогичное рассуждение можно привести и для заряда $-q$.

Итак, если с двух сторон плотно прилегающих металлических пластин поместить заряды, то пластинки начнут расходиться за счёт взаимодействия точечных зарядов с зарядами, индуцированными на каждой пластинке.

44. Электрическое поле, создаваемое зарядами, в котором находится проводящий шарик, наводит в нём заряды противоположных знаков, располагающиеся на противоположных сторонах шарика в равных количествах (см. «Металлический шар в различных электрических полях»). После смещения шарик окажется в неоднородном электрическом поле, под действием которого он начнёт двигаться по направлению к тому заряду, к которому он был смещён.

Таким образом, равновесие шарика в средней точке между зарядами является неустойчивым.

45. В результате явления электростатической индукции металлический шарик приобретает, с одной стороны, положительный заряд, а другой - отрицательный, превращаясь тем самым в диполь (совокупность двух одинаковых по абсолютному значению и противоположных по знаку электрических зарядов, расстояние между которыми много меньше, чем расстояние до рассматриваемых точек электрического поля). На первый взгляд может показаться, что так как диполь расположен вдоль силовых линий поля, а поле конденсатора однородное, то на шарик не действуют никакие силы (см. ответ «Металлический шар в различных электрических полях»). Однако такое заключение ошибочно. Наличие шарика искажает электрическое поле. Плотность зарядов, а следовательно, напряжённость поля на пластинах в точках, лежащих на прямой перпендикулярно пластинам и проходящих через центр шарика, увеличивается. Диполь окажется в неоднородном поле и будет притягиваться к той пластине, к которой он расположен ближе. Если нить позволит ему прикоснуться к пластине, то он потеряет заряд, противоположный заряду пластины. Став одноимённо заряженным, он отталкивается от неё и будет двигаться к противоположной пластине. Достигнув её (если позволит нить), он изменит заряд на противоположный и станет двигаться к первой пластине и т.д.

46. При включении высокого напряжения на перьях птицы возникает статический электрический заряд, из-за наличия которого перья птицы расходятся, как расходятся кисти бумажного султана, соединённого с электрической машиной. Это действие статического заряда и побуждает птицу улететь.

47. Зарядить положительно проводник, используя электростатическую индукцию, создаваемую положительным зарядом, и применяя заземление, нельзя. Действительно, если бы с землёй была соединена не левая половина проводника В (рис. 14), а правая, то он зарядился бы отрицательно. Но все точки проводника имеют один и тот же потенциал. Следовательно, он зарядится отрицательно и в случае соединения с землёй и левой половины проводника.

48. Стеклянную палочку одновременно зарядить на концах разноимённо очень легко, используя электризацию. Достаточно один её конец потереть, например, мехом, чтобы получить на ней отрицательный заряд, а другой – кожей, чтобы получить положительный. Что касается медной палочки, то она – проводник, поэтому разноимённые заряды в ней должны мгновенно нейтрализоваться. Здесь необходимо поступить следующим образом. Наэлектризованную стеклянную палочку, потёртую о кожу, подносят к медной палочке, укреплённой на изоляторе. Тогда на её ближайшем к стеклянной палочке конце возбуждается отрицательный заряд, а на противоположном конце – положительный под влиянием индукции.

49. Если заряженный проводник соединить проволокой с незаряженным проводником, то заряды будут перетекать с заряженного проводника на незаряженный. Если же заряженный проводник будет полый и внутри него будет находиться незаряженный проводник, то при соединении его проволокой с заряженным полым проводником заряды перетекать не будут, так как внутри полости напряжённость электрического поля равна нулю.

50. Бумажки к наэлектризованной палочке притягиваются при появлении заряда в результате электростатической индукции. Мелкие бумажки не будут притягиваться к клеммам аккумулятора или батарее карманного фонаря, так как вблизи клемм слишком слабое электрическое поле.

51. При поднесении к струе воды распавшейся на капли наэлектризованной палочки наблюдается электризация капель. Близлежащие и отдалённые от наэлектризованной палочки капли электризуются под её влиянием разноимённо и, притягиваясь, снова сливаются в струю.

52. Когда два материала (скажем, подошва туфель и ковёр, стеклянная палочка и мех или янтарь и шелк) соприкасаются, электроны из одного из них переходят через поверхностный энергетический барьер в другой. Если, например, стекло соприкасается с мехом, электроны переходят с поверхности стекла на поверхность меха. Поскольку ни тот, ни другой из этих материалов не являются хорошим проводником, электроны могут переходить с одной поверхности на другую лишь в тех точках, где материалы плотно соприкасаются. Таким образом, чем больше поверхность контакта между материалами, тем больше будет переходить электронов. При трении одной поверхности о другую площадь контакта значительно возрастает, благодаря чему достигается переход большого числа электронов. Материал, который теряет электроны, заряжается положительно, материал, который принимает их, заряжается отрицательно. Если воздух влажный, избыточный заряд быстро переходит с материала на взвешенные в воздухе капельки воды. Уменьшению заряда могут способствовать также частицы дыма. Если же такого разряда не происходит, то при обычном контакте

двух материалов может возникнуть весьма значительная разность потенциалов. Если, например, перед тем, как выйти из машины, вы поёрзаете на сиденье, то потенциал вашего тела может оказаться на 15 В выше потенциала земли.

53. Электризация проволочных изгородей, самолётов и других металлических объектов под действием быстро летящего снега также объясняется переносом электронов (см. «По ковру ходить опасно»). Частицы снега отдают электроны металлическим предметам, и те приобретают отрицательный заряд.

54. При просеивании сахарная пудра в результате электризации заряжается. Поскольку падающие крупинки сахара имеют заряд одинакового знака, они отталкиваются друг от друга, и часть сахара отлетает вбок.

55. Шины, соприкасающиеся с дорогой, приобретают при электризации отрицательный заряд. Так как шины вращаются и поэтому заряжаются довольно равномерно, создаваемое ими электрическое поле будет отталкивать электроны металлических рам и кузова. В результате металлические части автомобиля, близкие к шине, окажутся заряженными положительно. Между какой-либо из этих частей автомобиля и оказавшимся по соседству заземлённым или противоположно заряженным предметом может проскочить искра. В большинстве случаев эта искра не опасна. Однако в бензовозе такая искра может воспламенить пары бензина. Раньше к бензовозам прикрепляли волочащиеся по земле цепи, полагая, что они снимают с машины электрический заряд. Действительно, часть электронов стекла бы по этим цепям в землю, но автомобиль не становился бы при этом электрически нейтральным. Напротив, он приобретал положительный заряд, и искры всё равно могли возникнуть. Поэтому в настоящее время никаких цепей на бензовозах и автомобилях не ставят.

56. Кинетическая энергия электрического заряда не меняется при перемещении из одной точки электрического поля в другую, если эти точки находятся на поверхности с одинаковым потенциалом (эквипотенциальные поверхности). Так как энергия электрического заряда равна сумме кинетической и потенциальной энергии, а при перемещении потенциальная энергия не поменялась, то не изменилась и кинетическая энергия заряда.

57. Полная энергия складывается из энергий взаимодействия каждого заряда с остальными:

$$W = \frac{q^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} - 2 \frac{qq_1}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}.$$

Так как по условию задачи, $W = 0$, то

$$q_1 = \frac{q}{2}.$$

58. Энергия конденсатора, отключенного от источника, определяется величиной заряда q и ёмкостью конденсатора C :

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

Так как ёмкость плоского конденсатора равна:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d},$$

где S – площадь пластин конденсатора, ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика, ε_0 – электрическая постоянная, d – расстояние между пластинами, то энергия конденсатора может быть записана в виде:

$$W = \frac{q^2 d}{\varepsilon \varepsilon_0 S}$$

Из последней формулы видно, что если из конденсатора убрать диэлектрик, то для того, чтобы энергия конденсатора осталась неизменной, следует уменьшить расстояние d между пластинами в ε раз.

После удаления диэлектрика, но до изменения расстояния между пластинами, энергия конденсатора увеличилась. Это увеличение происходит за счёт работы, которую необходимо совершить для удаления диэлектрика. Эта работа производится против сил взаимного притяжения свободных зарядов на обкладках конденсатора и связанных зарядов на поверхности диэлектрика.

59. Поскольку напряжение на конденсаторе при включенном источнике тока остаётся постоянным, его энергия $W = \frac{CU^2}{2}$ убывает, так как с удалением диэлектрика в ε раз уменьшается ёмкость конденсатора. Часть энергии, запасённой в конденсаторе, может при этом расходоваться на нагревание соединительных проводов, часть может перейти в источник тока. Необходимо при этом иметь в виду, что удаление диэлектрика требует совершения механической работы, которую следует включить в общий энергетический баланс. Полезно для сравнения рассмотреть обратный процесс – введение диэлектрика в конденсатор. Так как в этом случае ёмкость конденсатора растёт, то растёт его энергия. Этот рост обеспечивается источником тока, сообщаемого конденсатору необходимый заряд в процессе роста его ёмкости.

60. Ответ на поставленный вопрос в задаче связан с вопросом 58. Ответ может быть получен исходя из общей формулы для энергии заряженного конденсатора:

$$W = \frac{q^2}{2C}$$

При введении диэлектрика в конденсатор ёмкость последнего увеличивается, а следовательно, при неизменном заряде на пластинах уменьшается его энергия. Таким образом, при втягивании жидкого диэлектрика в промежуток между пластинами система «конденсатор – диэлектрик» переходит в состояние с меньшей энергией. Это происходит до тех пор, пока уменьшение энергии не компенсируется увеличением потенциальной энергии в поле тяготения слоя диэлектрика между пластинами. Поскольку после подъёма диэлектрика ёмкость конденсатора увеличивается, разность потенциалов между пластинами уменьшается.

Уменьшится и напряжённость поля, которая одинакова в заполненной и незаполненной диэлектриком частях конденсатора. Смещение в части, заполненной диэлектриком, окажется в ε раз больше, чем в незаполненной.

61. Так как конденсатор подключен к источнику напряжения, то в общий баланс энергии следует включить и источник тока, который при введении диэлектрика расходует часть своей энергии на увеличение энергии конденсатора.

Поэтому в этом случае жидкий диэлектрик должен втягиваться в конденсатор. Влияние поля конденсатора на диэлектрик также можно учесть, рассматривая поляризацию диэлектрика, в результате которой каждый элемент объема диэлектрика становится диполем и втягивается в поле, существующее у края конденсатора. Напряженность этого поля выше, чем в диэлектрике на некотором расстоянии от пластин.

62. При деформации сжатия в поперечном направлении в кубике в продольном направлении возникает деформация растяжения, в результате чего на верхней грани возникает отрицательный заряд, а на нижней – положительный, как на рис.16,б.

63. Если шары удалены на большое расстояние друг от друга, то можно считать, что наличие одного шара не влияет на заряд и потенциал другого. Допустим, что шары заряжены одинаковыми, но противоположными по знаку зарядами и находятся в воздухе, тогда потенциал положительного заряда равен $\varphi_1 = \frac{kq}{r}$, а емкость $C_1 = \frac{q}{\varphi_1} = \frac{r}{k}$. Потенциал отрицательного заряда $\varphi_2 = -\frac{kq}{r}$, а емкость второго шара $C_2 = -\frac{r}{k}$. Разность потенциалов между двумя шарами $\varphi_1 - \varphi_2 = k \cdot \frac{2q}{r}$, и, следовательно, емкость системы двух шаров $C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{qr}{k \cdot 2q} = \frac{r}{2k}$, то есть емкость этой системы вдвое меньше, чем емкость уединенного шара.

Чтобы понять смысл полученного результата, рассмотрим переход от случая уединенного шара к случаю двух удаленных шаров. Емкость уединенного шара будем считать как взаимную емкость этого шара и охватывающей его сферы очень большого радиуса (при этом заряд сферы должен быть равен по величине и противоположен по знаку заряду шара). Вторым шар с зарядом, равным по величине и противоположным по знаку заряду первого, поместим внутрь сферы, и тогда общий заряд на сфере станет равным нулю (за счет электростатической индукции). Так как сфера очень велика, то шары внутри нее можно удалить друг от друга на такое большое расстояние, что поле одного не будет влиять на поле другого. Тогда взаимную емкость между шарами можно рассматривать как емкость, получившуюся в результате последовательного включения двух емкостей: 1) взаимной емкости первого шара и большой сферы; 2) взаимной емкости второго шара и той же большой сферы. Как и в случае последовательного включения двух конденсаторов, здесь есть не соединенные между собой одна обкладка одного конденсатора и одна другого (два шара) и две соединенные между собой обкладки, общий заряд которых равен нулю (эти две соединенные обкладки в нашем случае слились в одну сферу). А общая емкость двух одинаковых конденсаторов, включенных последовательно, как известно, вдвое меньше емкости каждого из конденсаторов.

64. В заряженном конденсаторе возникает однородное электрическое поле, силовые линии которого направлены перпендикулярно пластинам. В этом направлении на заряженную частицу со стороны электрического поля действует сила, которая заставляет частицу двигаться с ускорением $a = \frac{qE}{m}$, где E –

напряженность электрического поля, q – заряд частицы, m – масса частицы. Смещение частицы, которое зависит от ускорения, будет определяться величиной заряда и массой α -частицы – это ядро гелия, которое имеет заряд в два раза больше, чем протон, а массу в четыре раза больше массы протона. Следовательно, отклонение протона в направлении, перпендикулярном к пластинам конденсатора, будет в два раза больше, чем у α -частицы.

65. На сторонах диэлектрической пластинки, обращенных к обкладкам конденсатора, образуются вследствие поляризации диэлектрика связанные с ним заряды, противоположные по знаку зарядам на обкладках. При удалении диэлектрика совершается работа против сил кулоновского притяжения разноименных зарядов. Эта работа идет на увеличение энергии конденсатора.

66. Для того, чтобы зарядить конденсатор от последовательно соединенных одинаковых элементов с наименьшими потерями энергии, необходимо поступать следующим образом. Сначала конденсатор заряжают от одного элемента, затем от двух последовательно соединенных элементов, затем от трех и т.д. При таком способе зарядки потери энергии составят $1/n$ долю запасенной энергии.

67. Формула емкости плоского воздушного конденсатора $C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$, где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, S – площадь пластин, d – расстояние между пластинами, верна лишь при небольших значениях d , и поэтому ею нельзя пользоваться при увеличении d до бесконечности.

Если обкладки плоского конденсатора находятся бесконечно далеко друг от друга, то электроемкость двух обкладок можно найти следующим образом. Пластинам сообщают заряды $+q$ и $-q$, и они приобретут потенциалы $\varphi_1 = \frac{q}{C}$, $\varphi_2 = -\frac{q}{C}$, где C – емкость одной обкладки, рассматриваемой как уединенный проводник. Следовательно, емкость двух обкладок, образующих конденсатор, равна

$$C_0 = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{\frac{q}{C} - (-\frac{q}{C})} = \frac{1}{2} C.$$

Так как емкость одной обкладки не равна нулю, то и емкость двух обкладок, находящихся на большом расстоянии друг от друга, не равна нулю.

68. Поляризационные заряды, образующиеся на обеих сторонах диэлектрической пластинки, имеют одинаковую величину и противоположные знаки, и поэтому они создают поля в зазорах между пластинкой и обкладками конденсатора. Выводя пластинку из диэлектрика, мы ослабляем поле в пространстве, занятом диэлектриком, но не изменяем поля в зазорах между диэлектриком и пластинами конденсатора. Следовательно, силы, действующие на пластины конденсатора, при этом не изменятся.

69. В зависимости от того, какая сфера будет заземлена, внутренняя или внешняя, емкость сферического конденсатора будет различна. При соединении с землей внешней сферы заряды в ней будут располагаться только с внутренней стороны. При соединении с землей внутренней сферы заряды на большой сфере будут расположены с обеих сторон (рис.32), и емкость всего конденсатора нужно рассматривать как емкость системы двух параллельно соединенных кон-

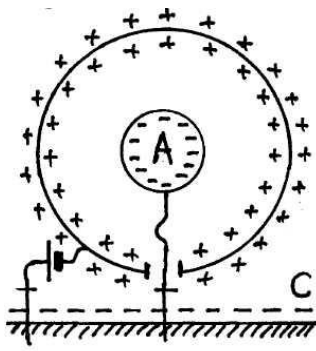


Рис. 32

денсаторов, с обкладками сферы внутренней и внешней и внешняя сфера и земля. Таким образом, во втором случае емкость будет больше.

70. Если конденсатор подключен к аккумулятору, то работа по раздвижению пластин конденсатора идет на увеличение энергии аккумулятора, то есть происходит своеобразная зарядка аккумулятора. Действительно, поскольку пластины конденсатора все время остаются присоединенными к клеммам конденсатора, разность потенциалов, приложенная к ним, остается постоянной, следовательно, увеличение расстояния между пластинами приводит к уменьшению электроемкости и заряда на них. Происходит частичный разряд конденсатора, в цепи появляется ток, вследствие чего аккумулятор заряжается.

При раздвижении пластин конденсатора энергия электрического поля W в конденсаторе уменьшается. В самом деле, $W = \frac{1}{2}CU^2$, и если разность потенциалов U постоянна, а емкость C уменьшается, то W также уменьшается. Освободившаяся энергия конденсатора также идет на зарядку аккумулятора. Таким образом, на увеличение энергии аккумулятора идет вся работа, затраченная на раздвижение пластин, и часть энергии, запасенной в конденсаторе.

71. В случае, когда при раздвигании пластин конденсатора разность потенциалов остается неизменной, электроемкость, а следовательно, и заряд на пластинах уменьшается. Это приведет к постепенному уменьшению силы взаимодействия.

В случае, когда после зарядки, при той же разности потенциалов, источник напряжения отключают, то при раздвижении пластин заряд на них остается постоянным. Следовательно, сила взаимодействия пластин сохранит начальное значение во все время раздвигания пластин.

Поэтому при одинаковом перемещении пластин работа во втором случае будет больше.

72. Если металлический незаряженный шарик, подвешенный на нити между обкладками заряженного конденсатора, колеблется, то период колебаний такого маятника определяется по формуле $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, где g – ускорение, обусловленное силой тяжести. Если на шарик поместить положительный заряд q и верхняя пластина будет заряжена положительно, то в вертикальном направлении на шарик кроме силы тяжести $P=mg$ будет действовать кулоновская сила отталкивания от верхней пластины, равная $F=qE$, где E – напряженность электрического поля конденсатора. За счет действия этой добавочной силы изменится ускорение падения шарика в конденсаторе. Величина этого ускорения определится из уравнения $ma=mg+qE$, и оно будет равно $a = g + \frac{q}{m}E$. Подставляя это ускорение в формулу периода колебаний маятника, найдем $T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g + \frac{q}{m}E}}$. Из полученной формулы видим, что период колебаний уменьшается.

Если на шарик поместить отрицательный заряд, то ускорение уменьшится, а период колебаний маятника увеличится.

73. Контакты рубильника обладают очень малой емкостью, поэтому напряжение между ними при размыкании быстро возрастает, достигает значений, при которых происходит пробой с искрением. При параллельном подключении к контактам рубильника конденсатора общая емкость увеличивается, напряжение между контактами нарастает медленно и пробой не наступает, искрение не происходит.

74. Емкость плоского воздушного конденсатора $C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$, где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, S – площадь обкладок конденсатора, d – расстояние между обкладками. Если параллельно между обкладками поместить тонкую заряженную пластину, то она разделит конденсатор на два последовательно включенных конденсатора. У одного конденсатора расстояние между обкладками равно x , у другого – $(d-x)$. Тогда емкость последовательно включенных конденсаторов будет определяться по формуле $\frac{1}{C_x} = \frac{x}{\epsilon_0 S} + \frac{d-x}{\epsilon_0 S} = \frac{d}{\epsilon_0 S}$, то есть $C_x = \frac{\epsilon_0 S}{d}$. Таким образом, введение металлической пластины в воздушный конденсатор его емкость не изменяет.

75. Так как каждая пластина, будучи проводником, обладает во всех точках одинаковым потенциалом, а напряженность поля взята с обратным знаком градиенту потенциала $E = -\frac{d\varphi}{dl}$, то в том месте, где пластины ближе друг к другу, напряженность поля больше. В то же время напряженность поля у поверхности связана с местной поверхностной плотностью заряда соотношением $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}$, где σ – поверхностная плотность заряда, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды (диэлектрика). Поэтому поверхностная плотность заряда в точке 1 больше, чем в точке 2 (рис.18).

76. Точка 1 имеет положительный потенциал φ_1 относительно отрицательно заряженной пластины (рис.19). Он равен половине разности потенциалов между пластинами конденсатора А. Поскольку точка 2 находится ближе к отрицательной пластине, ее потенциал φ_2 ниже, чем потенциал точки 1. При переносе положительного заряда из точки 1 с более высоким потенциалом в точку 2 с более низким потенциалом электрическое поле совершает работу, равную произведению переносимого заряда q на разность потенциалов между точками 1 и 2:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) > 0.$$

Отсюда следует, что работа по перемещению будет положительной.

77. При последовательном включении конденсаторов C_1 и C_2 заряд на этих конденсаторах будет одинаков, и тогда между разностью потенциалов и емкостью каждого из конденсаторов выполняется соотношение

$$C_1 U_1 = C_2 U_2. \quad (1)$$

Аналогичное соотношение будет записано для конденсаторов C_3 и C_4 :

$$C_3 U_3 = C_4 U_4. \quad (2)$$

Для того, чтобы между точками а и в отсутствовала разность потенциалов, необходимо, чтобы осуществлялись равенства $U_1=U_2$ и $U_3=U_4$. Разделив почленно равенство (1) на равенство (2) и сокращая на равные разности потенциалов, получим $C_1/C_3=C_2/C_4$.

Следует заметить, что если между точками А и В приложено постоянное напряжение, а конденсаторы обладают некоторой утечкой (т.е. их сопротивление не бесконечно велико), то распределение потенциала между конденсаторами такое же, как в мостике Уитсона, т.е. оно пропорционально сопротивлениям.

78. При последовательном соединении заряды на конденсаторах одинаковы. Так как эти заряды равны $q = C_1 U_1 = C_2 U_2$, то напряжения на конденсаторах обратно пропорциональны их емкостям. Поэтому к конденсатору с диэлектриком приложено напряжение во столько раз меньше, чем к воздушному, во сколько диэлектрическая проницаемость больше единицы.

79. По углу отклонения стрелки электрометра судят о потенциале шара, который определяется формулой

$$\varphi = \frac{q}{C},$$

где φ – потенциал проводника, q – заряд, C – емкость, которая равна для шара $C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r$ (ε_0 – электрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость среды, r – радиус шара). В данном же случае радиус шара увеличивается, соответственно, увеличивается емкость и уменьшается потенциал при неизменном заряде. Таким образом, угол отклонения стрелки становится меньше.

80. Если конденсатор присоединен к аккумулятору, то разность потенциалов между обкладками конденсатора не изменяется. Поэтому не изменяется и напряженность поля.

Борисовский Василий Васильевич

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Учебное пособие для студентов всех направлений
очной и заочной форм обучения

Редактор Е.Ф. Изотова

Подписано к печати 04.12.14. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 3,06. Тираж 50 экз. Зак. 141327. Рег. № 131.

Отпечатано в ИТО Рубцовского индустриального института
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6.