

1. Электрическое поле

Электрическое поле — особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между электрически заряженными частицами.

Электрическое поле обладает определенными свойствами, главное из которых — действие на другие электрические заряды независимо от того, движутся они или нет.

Согласно теории дальнего действия все взаимодействия, в том числе и электромагнитные, распространяются с бесконечно большой скоростью, т.е. осуществляются мгновенно, непосредственно между электрическими зарядами, находящимися на расстоянии друг от друга.

Современная физика основывается на теории близкодействия, созданной работами английского физика Майкла Фарадея (1791— 1867) и завершенной английским физиком Джеймсом Клерком Максвеллом (1831-1879). Согласно этой теории электромагнитные поля распространяются в пространстве с конечной скоростью, равной скорости света ($c = 3 \cdot 10^8$ км/с), и взаимодействуют на электрически заряженные частицы или тела, находящиеся в пространстве. Таким образом, каждый электрический заряд создает в окружающем пространстве электрическое поле, причем поле одного заряда действует на другой заряд, и наоборот.

Электрическое поле описывается определенными силовыми (напряженность) и энергетическими (потенциал) характеристиками.

Электрическое поле неподвижных в данной системе отсчета электрически заряженных частиц или тел называется электростатическим. Оно не меняется во времени и является стационарным электрическим полем.

Электростатическое поле существует в пространстве, окружающем электрические заряды (создается только электрическими зарядами), и неразрывно с ними связано. В общем случае электрическое и электромагнитное поля изменяются с течением времени и являются поэтому переменными, или нестационарными, полями.

1.1. Напряженность электрического поля

Напряженность электрического поля — силовая характеристика поля, физическая величина, равная отношению силы, действующей на помещенный в данную точку поля точечный электрический заряд, к этому заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{|q|}$$

где E — напряженность электрического поля, F — сила, с которой поле действует на положительный точечный заряд, $|q|$ — величина заряда.

Напряженность электрического поля численно равна силе, действующей на неподвижный единичный положительный точечный заряд, который называют также пробным зарядом. Считается, что пробный заряд не искажает изучаемое поле и его собственное электрическое поле отсутствует.

Единица измерения напряженности электрического поля в СИ: 1 Н/Кл или 1 В/м, то есть $1 \text{ Н/Кл} = 1 \text{ В/м}$.

Например, напряженность в данной точке электрического поля равна 6 Н/Кл. Это означает, что в данной точке поля на пробный заряд (неподвижный точечный заряд в 1 Кл) действует сила в 6 ньютонов.

Напряженность поля — величина векторная. Направление вектора E совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, и противоположно направлению силы, действующей на отрицательный заряд. Вектор напряженности в любой точке электрического поля направлен вдоль прямой, соединяющей эту точку и заряд, причем если заряд положительный ($q > 0$), то вектор E направлен от заряда, а если заряд отрицательный ($q < 0$), то к заряду.



Сила, действующая на заряд, помещенный в электрическое поле с напряженностью E , равна: $F = qE$.

Если электрическое поле образовано несколькими точечными зарядами, то его вектор напряженности E в данной точке равен векторной сумме напряженностей полей, созданных в этой точке каждым зарядом в отдельности:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$

где n — число зарядов, создающих электрические поля. В этом состоит принцип суперпозиции (наложения) электрических полей (рис. 1).

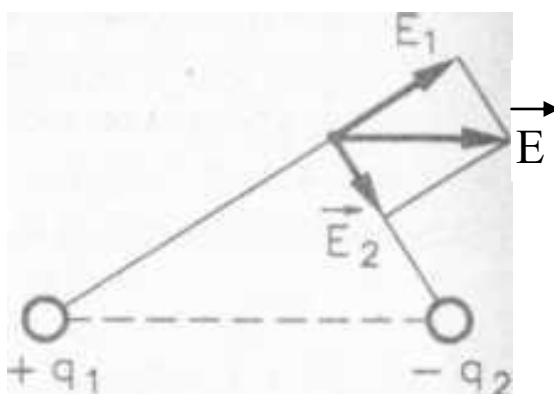


Рис. 1. Принцип суперпозиции электрических полей.

Если электрическое поле создано электрическими зарядами в однородном диэлектрике, то при заданном расположении электрических зарядов в пространстве напряженность электростатического поля в такой среде меньше, чем в вакууме:

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon}$$

где E_0 — напряженность электрического поля, создаваемого данной системой зарядов в вакууме; ε — диэлектрическая проницаемость среды.

Линиями напряженности электрического поля (силовыми линиями) называются непрерывные воображаемые линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора напряженности в этой точке электрического поля.

Метод силовых линий используют для графического изображения электростатического поля.

Линии напряженности электрического поля начинаются на положительных

электрических зарядах и заканчиваются на отрицательных электрических зарядах или уходят в бесконечность; они разомкнуты. Число линий напряженности (выходящих из заряда или входящих в него) пропорционально величине заряда, а также напряженности электрического поля. Вблизи заряженных тел, где напряженность поля больше, густота линий больше.

Линии напряженности нигде не пересекаются и непрерывны, так как в каждой точке поля его напряженность имеет определенное направление и единственное значение.

Распределение линий напряженности вокруг уединенных положительных (а) и отрицательных (б) точечных зарядов показано ниже:

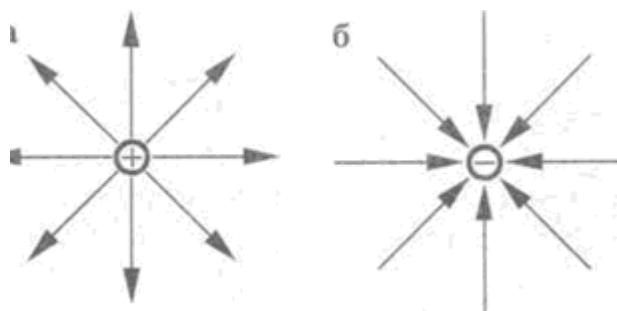


Рисунок 2.

В первом случае силовые линии заканчиваются в бесконечности, а во втором — начинаются на бесконечности. Ниже изображены электростатические поля двух одноименных (а) и разноименных (б) зарядов. Напомним, что одноименно заряженные тела отталкиваются, а разноименно заряженные — притягиваются.

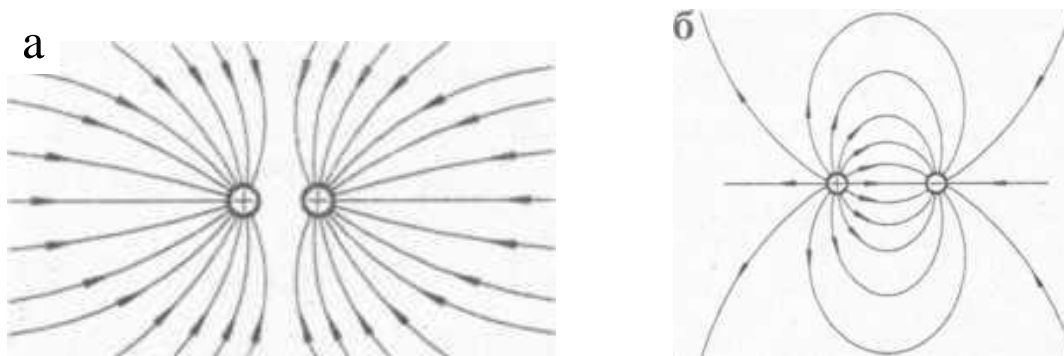


Рис.

1.2. Однородное электрическое поле

Электрическое поле, напряженность которого одинакова по модулю и направлению во всех точках пространства, называется *однородным электрическим полем*.

Приблизительно однородным можно считать электрическое поле в ограниченной области пространства, когда напряженность электрического поля внутри этой области меняется незначительно. Например, электростатическое поле равномерно заряженной бесконечной плоскости и поле между двумя разноименно заряженными плоскими металлическими пластинами, т.е. поле плоского конденсатора вдали от краев пластин. Линии напряженности электрического поля перпендикулярны поверхности пластин.

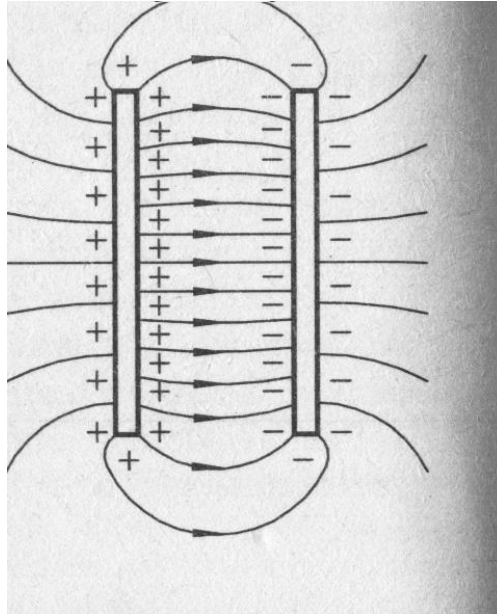


Рис.4.

В однородном электрическом поле линии напряженности параллельны друг другу. Если напряженность поля во всех точках пространства не одинакова по модулю и направлению, то электрическое поле называется неоднородным. Силовые линии в этом случае не параллельны. Например, поле точечного заряда.

Модуль напряженности электростатического поля, создаваемого точечным зарядом q_0 в некоторой точке, равен:

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

где $k = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0}$ - коэффициент пропорциональности, ϵ_0 — электрическая постоянная, ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, r — расстояние от заряда q_0 до данной точки поля.

Это выражение можно получить, применяя закон Кулона и определение понятия напряженности поля.

Если в некоторую точку поля поместить точечный заряд q , то на него будет действовать поле заряда q_0 с силой (кулоновской силой), равной:

$$F = k \cdot \frac{|q| \cdot |q_0|}{r^2}$$

Модуль напряженности по определению равен:

$$E = \frac{F}{|q|} = k \cdot \frac{|q_0|}{r^2}.$$

Из этого выражения видно, что напряженность электростатического поля точечного заряда прямо пропорциональна заряду, создающему это поле, и обратно пропорциональна квадрату расстояния r от заряда до данной точки поля. Она не зависит от заряда q , помещенного в данную точку поля. Вектор напряженности направлен вдоль

прямой, соединяющей заряд q_0 и данную точку поля, к заряду, если $q_0 < 0$, и от заряда, если $q_0 > 0$.

Поле, создаваемое сферой, равномерно заряженной по поверхности, внутри нее равно нулю $E = 0$, при $r < R$, где r — расстояние до центра сферы, R — радиус сферы. Вне сферы при $r \geq R$ электрическое поле совпадает с полем точечного заряда (равного заряду сферы), находящегося в центре сферы.

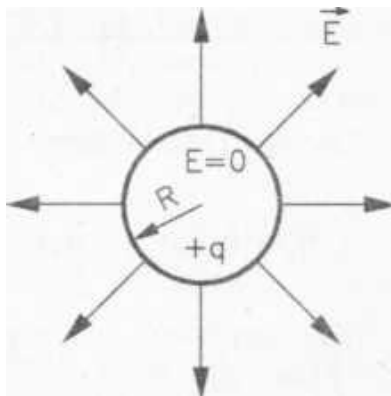


Рисунок 5.

Модуль напряженности в этом случае равен: $E = \frac{F}{|q|} = k \cdot \frac{|q_0|}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{|q_0|}{r^2}$.

Силовые линии (линии напряженности) электрического поля направлены в этом случае вдоль продолжений радиусов сферы. Аналогично определяется напряженность заряженного проводящего шара радиуса R .

Равномерно заряженная бесконечная плоскость создает однородное электростатическое поле с каждой стороны от нее. Линии напряженности перпендикулярны плоскости и направлены от нее, если плоскость заряжена положительно, а если отрицательно, то к ней.

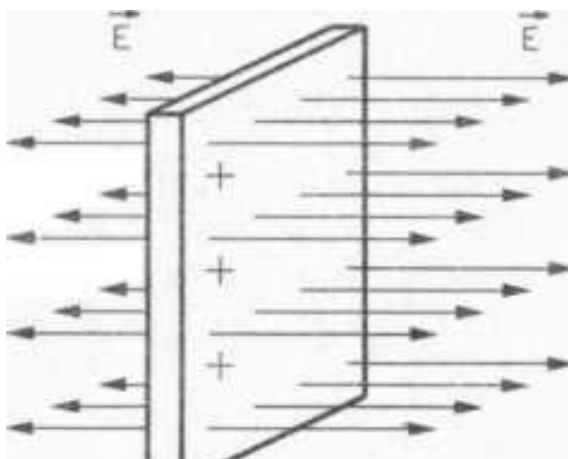


Рис. 6.

Напряженность электростатического поля бесконечной плоскости определяется поверхностной плотностью заряда σ — отношением электрического заряда q к

площади поверхности S , по которой он распределен: $\sigma = \frac{q}{S}$.

Единицей измерения поверхностной плотности заряда в СИ является Кл/м².

Модуль вектора напряженности бесконечной равномерно заряженной плоскости определяется формулой:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0} \quad \text{или} \quad E = 2k\pi\sigma.$$

Напряженность электростатического поля в некоторой точке будет такой же, как напряженность поля бесконечной плоскости в том случае, когда форма равномерно заряженной поверхности близка к плоскости и расстояние от этой плоскости до данной точки значительно меньше размеров поверхности, а также расстояния до края этой заряженной поверхности.

1. Работа сил электростатического поля

При перемещении заряда в электрическом поле силы поля совершают работу. В электростатическом поле работа перемещения заряда между двумя точками не зависит от формы траектории, соединяющей эти точки, а зависит лишь от положения начальной и конечной точек. Если траектория замкнута, то работа сил равна нулю.

Поле, работа сил которого по любой замкнутой траектории равна нулю, называется *потенциальным*, или *консервативным*.

Рассмотрим перемещение положительного заряда q из точки 1 в точку 2, находящегося в однородном электростатическом поле. Однородное поле создается вертикально расположенными металлическими пластинами, имеющими заряды противоположного знака. Это поле действует на заряд q с постоянной силой, модуль которой равен: $F = qE$, где E — напряженность однородного электростатического поля.

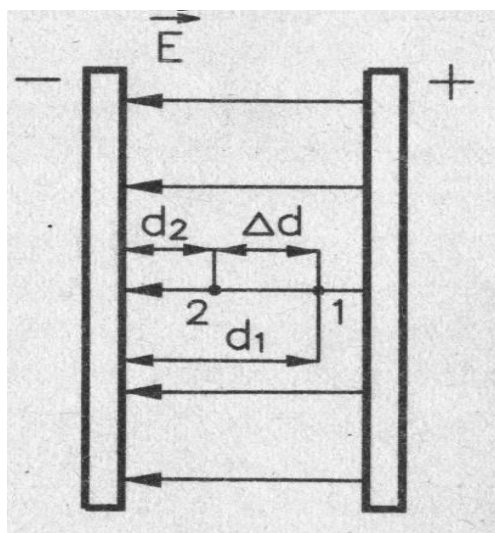


Рис. 7.

Работа, совершаемая полем при перемещении заряда по линии напряженности поля на расстояние $\Delta d = d_1 - d_2$, положительна и равна:

$$A = F \cdot \Delta d = qE(d_1 - d_2)$$

где d_1 и d_2 — расстояния от начальной и конечной точек до отрицательно заряженной пластины.

Если начальная и конечная точки траектории заряда не лежат на одной силовой линии, то работу поля по перемещению заряда можно определить следующим образом:

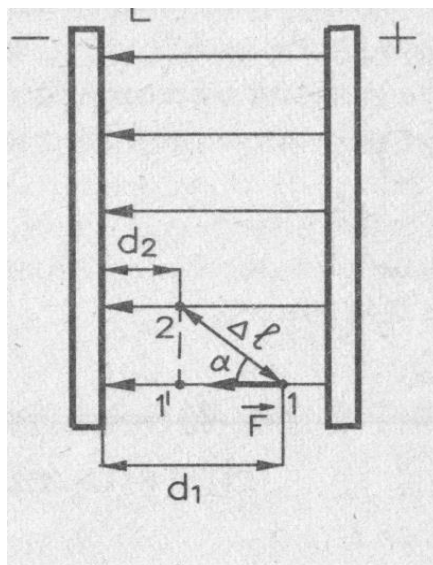


Рис. 8.

$$A = F \cdot \Delta l \cdot \cos \alpha$$

где α — угол между направлениями векторов E и перемещения заряда Δl . Из рисунка видно, что $\Delta l \cdot \cos \alpha = d_1 - d_2 = \Delta d$.

Поэтому $A = qE \cdot \Delta d$.

При перемещении заряда перпендикулярно силовым линиям работа силой поля не совершается ($A = 0$).

В общем случае работа при перемещении заряда между двумя произвольными точками электростатического поля равна сумме элементарных работ на прямолинейных участках траектории:

$$A = \sum_i A_i = qE \sum_i \Delta d_i$$

Например, работа при перемещении положительного заряда в однородном поле между точками 1 и 2 равна сумме работ на участках пути $1 \rightarrow 1'$ и $1' \rightarrow 2$:

$$A = A_{1 \rightarrow 1'} + A_{1' \rightarrow 2} = qE \Delta d, \text{ т.к. } A_{1' \rightarrow 2} = 0.$$

Если одноименные заряды удаляются друг от друга, то работа электростатических сил отталкивания положительна, и отрицательна, если эти заряды сближаются. Работа электростатических сил притяжения разноименных зарядов положительна, если заряды сближаются, и отрицательна, если они удаляются друг от друга.

Поскольку работа, совершаемая электростатическими силами при перемещении электрического заряда в электростатическом поле, не зависит от формы траектории движения тела, то она равна изменению потенциальной энергии тела, взятому с противоположным знаком:

$$A = -\Delta W_p = -(W_{p2} - W_{p1})$$

где $W_p = qEd$ — потенциальная энергия в однородном электростатическом поле; W_{p1} и

W_{p2} — потенциальная энергия заряда в начальной и конечной точках его траектории.

Потенциальная энергия приближения разноименных зарядов отрицательна и возрастает до нуля, если один из зарядов удаляется от другого на очень большое расстояние ($r \rightarrow \infty$). При сближении одноименных зарядов потенциальная энергия отталкивания положительна и увеличивается. Физический смысл имеет разность значений потенциальной энергии, определяемая работой поля при перемещении заряда из начального положения в конечное.

1.4. Потенциал и разность потенциалов

Потенциал (от латинского *potentia* — возможность, сила) — энергетическая характеристика электростатического поля.

Потенциалом φ электростатического поля в данной точке называется скалярная величина, равная отношению потенциальной энергии взаимодействия заряда с полем к этому заряду:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}$$

где $W_p = qEd$ — потенциальная энергия заряда в однородном электростатическом поле, q — заряд поля, E — напряженность поля, d — расстояние между точками поля.

Потенциал определяет потенциальную энергию заряда q в данной точке поля и не зависит от величины этого заряда.

$$\varphi = \frac{W_p}{q} = \frac{qEd}{q} = Ed$$

Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле равна: $W_p = q \cdot \varphi$.

Величина потенциала в данной точке зависит от выбора нулевого уровня для отсчета потенциала, т.е. от выбора точки с нулевым потенциалом. Точка с нулевым потенциалом может быть выбрана произвольно. Обычно принимают нулевой уровень отсчета потенциала в бесконечно удаленной точке; иногда выбирают равным нулю потенциал поверхности Земли.

Работу потенциального поля, например, электростатического поля (каждая его точка характеризуется некоторым потенциалом), по перемещению заряда q можно выразить через изменение потенциальной энергии:

$$A = -(W_{p2} - W_{p1}) = -q(\varphi_2 - \varphi_1) = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Здесь $U = \varphi_1 - \varphi_2$ — разность потенциалов, т.е. разность потенциалов начальной и конечной точек траектории заряда. Изменение потенциала равно:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -U$$

В случае потенциального поля разность потенциалов совпадает с электрическим напряжением (работой произвольного электрического поля по перемещению единичного положительного заряда из одной точки в другую).

Разность потенциалов (напряжение) между двумя точками равна отношению работы по перемещению заряда из начальной точки в конечную к этому заряду:

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

В СИ разность потенциалов измеряется в вольтах, как и напряжение: $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$. Например, напряжение (разность потенциалов) в осветительной сети равно 220 В . Это означает, что при перемещении положительного заряда в 1 Кл из одной точки в другую (от одного контакта розетки к другому) электрическое поле совершает работу в 220 Дж .

Практическое значение имеет не потенциал в точке, а изменение потенциалов, которое не зависит от выбора нулевого отсчета потенциала и от траектории движения заряда.

Потенциал точечного заряда (при условии, что $\varphi \rightarrow 0$, $r \rightarrow \infty$, т.е. потенциал бесконечно удаленной от заряда точки поля равен нулю):

$$\varphi = k \frac{q}{r},$$

где $k = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0}$, r — расстояние от источника поля до данной точки; ϵ_0 — электрическая постоянная, ϵ — диэлектрическая проницаемость среды. Для вакуума ($\epsilon = 1$) $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$

Потенциал поля положительного заряда ($q > 0$) положителен ($\varphi > 0$), в случае отрицательного заряда ($q < 0$) и потенциал также отрицателен ($\varphi < 0$).

Если принять, что конечная точка траектории заряда находится в бесконечности, то $W_{p2} = 0$ и соответственно $\varphi_2 = 0$. Тогда работа поля по перемещению заряда из начальной точки траектории в бесконечность равна:

$$A' = W_{p1} = q\varphi_1 \quad \text{откуда} \quad \varphi_1 = \frac{A'}{q}.$$

Следовательно, потенциал электростатического поля численно равен работе электростатических сил по перемещению единичного положительного заряда из данной точки поля в бесконечность. Например, когда единичный положительный заряд, отталкиваясь также от положительного заряда, удаляется в бесконечность.

Потенциал электростатического поля также равен работе внешних сил, совершаемой против электростатического поля по перемещению единичного положительного заряда из бесконечности в данную точку. Например, когда единичный положительный заряд переносится из бесконечности в данную точку поля, преодолевая отталкивание другого положительного заряда.

Поле равномерно заряженного шара радиусом R на его поверхности и вне шара совпадает с полем точечного заряда, помещенного в центре шара, поэтому и потенциал поля шара можно определить по формуле потенциала поля точечного заряда. Внутри шара потенциал поля постоянен и равен:

$$\varphi = k \frac{q}{R} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q}{R},$$

где q — заряд шара, равномерно распределенный по его поверхности; R — радиус шара.

(Напряженность поля внутри шара равна нулю $E = 0$).

Если в некоторой точке пространства поле образовано несколькими точечными зарядами, то потенциал поля в данной точке определяется согласно принципу суперпозиции алгебраической суммой потенциалов полей, создаваемых в этой точке каждым зарядом в отдельности:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i$$

где n — число точечных зарядов, создающих поля.

Потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов:

$$W_p = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r}$$

где q_1 — заряд, создающий поле; q_2 — заряд, помещенный в электрическое поле заряда q_1 .

Если заряды q_1 и q_2 имеют одинаковые знаки, то потенциальная энергия их взаимодействия положительна. Чем меньше расстояние между зарядами, тем больше их потенциальная энергия взаимодействия, т.к. работа кулоновских сил при отталкивании зарядов друг от друга тоже больше. Если заряды имеют противоположные знаки, то энергия отрицательна и при $r \rightarrow \infty$ достигает максимального значения, равного нулю, т.к. чем больше расстояние между зарядами, тем большую работу совершают силы при сближении зарядов.

1.5. Эквипотенциальные поверхности

Электростатическое поле имеет две характеристики: силовую — напряженность E и энергетическую — разность потенциалов $U = \varphi_1 - \varphi_2$. Между ними существует определенная зависимость.

Потенциал электростатического поля вблизи любой точки изменяется наиболее быстро в направлении силовой линии. Допустим, что заряд q перемещается в однородном электростатическом поле вдоль линии напряженности из точки 1 в точку 2.

На заряд действует сила, модуль которой равен $F = qE$. Электрическое поле совершает работу по перемещению заряда на участке $1 \rightarrow 2$:

$$A = q \cdot E \cdot \Delta d$$

где Δd — расстояние между начальной и конечной точками траектории заряда.

Эту работу можно выразить через разность потенциалов между точками 1 и 2, которые связаны вектором перемещения:

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

Приравнявая выражения для работы, найдем модуль вектора напряженности

поля:
$$E = \frac{U}{\Delta d}.$$

Из этого выражения следует, что чем меньше меняется потенциал на расстоянии Δd , тем меньше напряженность электростатического поля. Напряженность поля равна

нулю ($E = 0$), если потенциал не меняется ($U = 0$, $\varphi_1 = \varphi_2$).

При перемещении положительного заряда вдоль силовой линии электростатическое поле совершает положительную **работу** $A > 0$, поэтому потенциал φ_1 больше потенциала φ_2 . Это значит, что вектор напряженности электрического поля направлен в **сторону убывания** потенциала.

Для неоднородного поля это соотношение между напряжением и напряженностью несправедливо, но любое электростатическое поле в малой области пространства можно считать однородным.

Напряженность в произвольной точке электростатического поля равна:

$$E = - \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta l} = - \frac{d\varphi}{dl}$$

где Δl — расстояние по силовой линии между точками 1 и 2, $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$.

Величину $\frac{d\varphi}{dl}$ называют градиентом потенциала. Знак минус в этой формуле показывает зависимость направления вектора напряженности от распределения потенциала поля.

Единицей напряженности электрического поля в СИ является вольт на метр [В/м]. Если разность потенциалов между двумя точками на расстоянии 1 м в однородном электрическом поле равна 1 В, то напряженность поля равна единице. Напряженность поля измеряется также в ньютонах на кулон [Н/Кл]. Покажем равенство этих единиц измерений.

$$1 \frac{В}{м} = 1 \frac{Дж}{Кл} \cdot \frac{1}{м} = \frac{Н \cdot м}{Кл} \cdot \frac{1}{м} = 1 \cdot \frac{Н}{Кл}$$

Наряду с картиной силовых линий (линий напряженности) электрического поля графически можно представить распределение потенциала поля в виде эквипотенциальных поверхностей.

Эквипотенциальной поверхностью называют геометрическое место точек электростатического поля с одинаковыми потенциалами.

Эквипотенциальные поверхности называют также *поверхностями равного потенциала*. При любом перемещении заряда на одной эквипотенциальной поверхности работа сил поля равна нулю и силовые линии поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям. В каждой точке этой поверхности вектор напряженности направлен в сторону убывания потенциала. Таким образом, при переходе с одной эквипотенциальной поверхности на другую потенциал электростатического поля изменяется, но разности потенциалов между любыми двумя соседними эквипотенциальными поверхностями остаются одинаковыми. В тех областях поля, где потенциал изменяется быстрее от точки к точке, эквипотенциальные поверхности расположены гуще. Вокруг любого источника электростатического поля можно провести бесконечное множество эквипотенциальных поверхностей.

Эквипотенциальными поверхностями поля точечного заряда являются сферы с центром в точке нахождения заряда, а однородного поля — плоскости, перпендикулярные направлению напряженности поля.

На рис. 9 показаны эквипотенциальные поверхности различных электрических

полей.

Примером эквипотенциальной поверхности является поверхность любого проводника в электростатическом поле. Все точки внутри объема проводника имеют одинаковый потенциал, так как напряженность электростатического поля внутри проводника равна нулю и, следовательно, равна нулю разность потенциалов между любыми точками проводника.

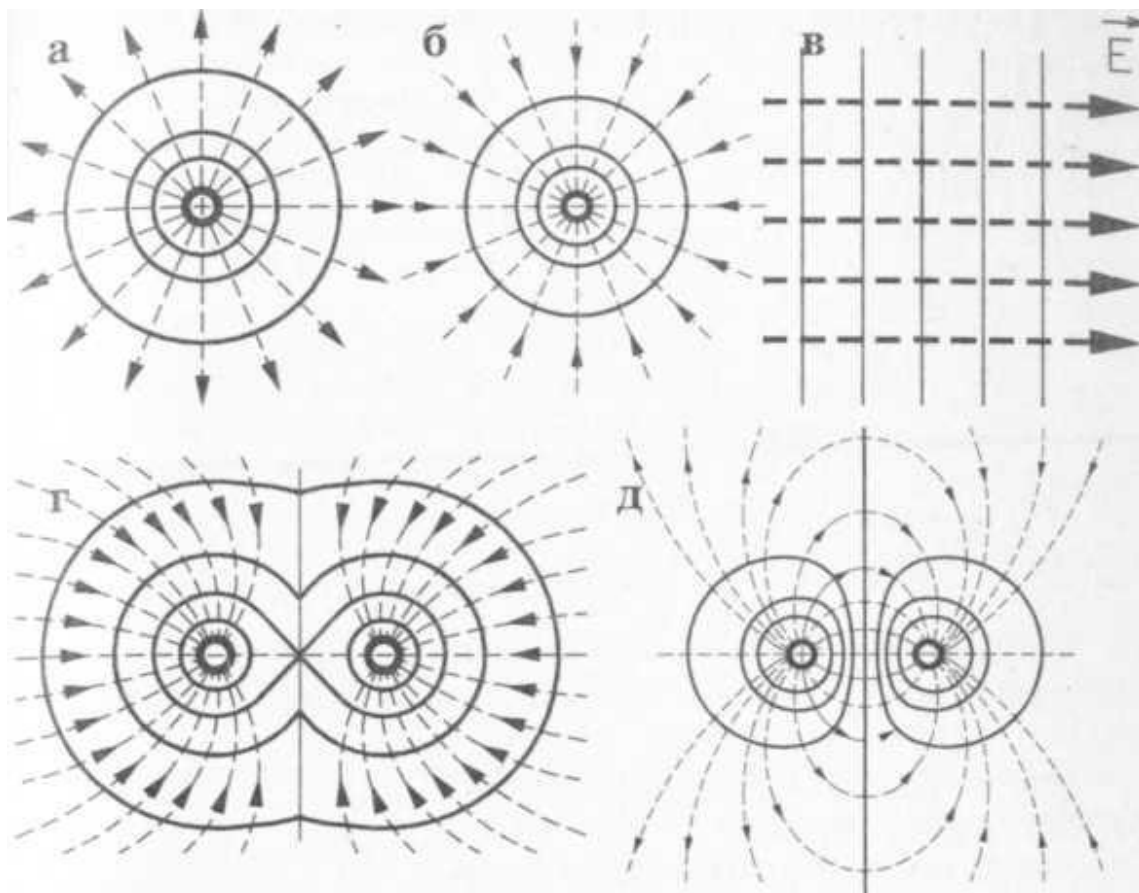


Рис. 9. Эквипотенциальные поверхности полей: положительного (а) и отрицательного (б) точечных зарядов; однородного поля (в); двух одноименных зарядов (г); диполя — двух разноименных зарядов (д). Пунктирами показаны силовые линии этих полей.

1.6. Проводники в электрическом поле

Проводниками называют тела, в которых может происходить упорядоченное перемещение электрических зарядов. Проводниками являются в первую очередь металлы (проводники I рода), электролиты — водные растворы солей, кислот (проводники II рода), ионизированные газы.

В металлах всегда имеются свободные носители зарядов — электроны. При образовании металла электроны внешних оболочек взаимодействующих друг с другом атомов отщепляются от своих атомов и становятся свободными (коллективизированными) электронами, которые также называют электронами проводимости металла. Таким образом, положительно заряженные ионы металлов, расположенные в узлах кристаллической решетки, оказываются окруженными свободными электронами, которые участвуют в тепловом движении и могут

перемещаться **по** металлу в любом направлении.

Рассмотрим незаряженную пластинку-проводник. Внутри проводника электростатического поля нет из-за наличия в проводнике свободных электронов ($E_0 = 0$). Хотя отдельные частицы (положительные ионы и электроны) и создают в проводнике микроскопические поля, но эти поля взаимно компенсируют друг друга (рис.10,а).

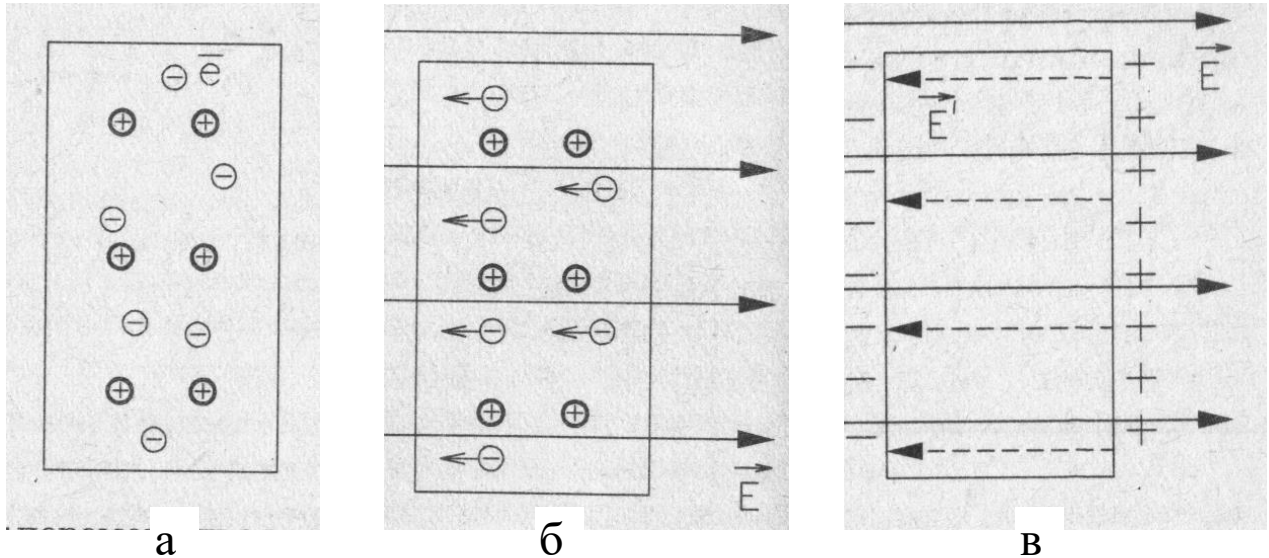


Рисунок 10

Поместим эту пластинку во внешнее электростатическое поле напряженностью E . Под действием этого поля свободные электроны проводника будут перемещаться вдоль силовых линий в направлении, противоположном напряженности поля (рис. 10,б).

При внесении пластины в поле в ней возникает электрический ток. За ничтожно малое время заряды перераспределяются в проводнике, и левая часть - пластины зарядится отрицательно (избыток электронов), а правая — положительно (недостаток электронов). Заряды, появляющиеся на поверхности проводника, создают внутри него свое внутреннее электрическое поле, вектор напряженности которого \vec{E} направлен противоположно вектору напряженности внешнего поля \vec{E} (рис. 10,в).

Так как поле электронов накладывается на внешнее поле и компенсирует его, — то напряженность результирующего поля внутри пластины становится равной нулю ($|\vec{E}| = |\vec{E}'| \Rightarrow |\vec{E}| - |\vec{E}'| = 0$) и перемещение зарядов в проводнике прекратится. Следовательно, электростатического поля внутри проводника нет (при равновесии зарядов). Явление разделения разноименных зарядов (перераспределения зарядов) в проводнике, помещенном в электростатическом поле, называется **электростатической индукцией**.

Так как напряженность поля внутри проводника равна нулю, то потенциалы всех точек внутри проводника одинаковы. Поскольку

$$E = \frac{U}{d} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = 0 \Rightarrow \varphi_1 - \varphi_2 = 0 \Rightarrow \varphi_1 = \varphi_2$$

где d — расстояние между двумя любыми точками внутри проводника.

При этом силовые линии перпендикулярны поверхности проводника. Поэтому поверхность заряженного проводника является эквипотенциальной поверхностью. Как показывает опыт, заряды располагаются не во всем объеме наэлектризованного проводника, а только на его внешней поверхности.

Это можно проверить с помощью металлической сетки, с обеих сторон которой наклеены листочки папиросной бумаги.

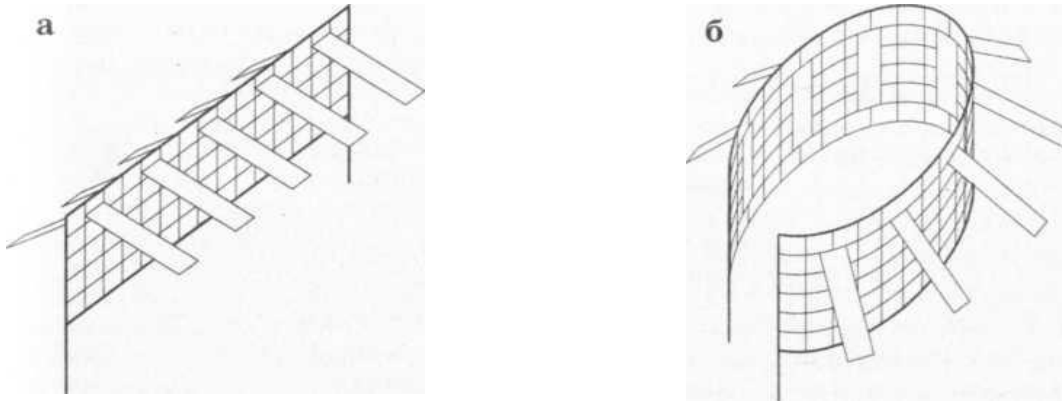


Рис. 11

Если сообщить сетке заряд, то листочки разойдутся с обеих сторон сетки на некоторый угол, так как перетекший на них заряд будет отталкиваться от одноименного заряда сетки (рис. 11,а). Но если теперь согнуть сетку в кольцо, то с внутренней стороны кольца листочки опадут, а с внешней разойдутся еще больше (рис. 11,б). Следовательно, все заряды перешли на внешнюю поверхность сетки.

Если внутри проводника имеется полость, то независимо от поля вне проводника и заряда самого проводника в этой полости напряженность электростатического поля также равна нулю. Внутренняя полость в проводнике защищена (экранирована) от внешних электростатических полей.

На всех этих свойствах проводника основана электростатическая защита. Если нужно защитить чувствительные к электрическому полю приборы, то их помещают в металлические футляры, сквозь стенки которых внешнее поле не проникает.

Заряды на поверхности проводника распределяются неравномерно: наибольший заряд сосредоточен на выпуклостях и особенно на остриях проводника. Имеющий острие проводник быстро теряет заряд, так как заряды «стекают» с острия в воздух. Этот факт можно подтвердить, поднося пламя свечи к острию заряженного проводника. Пламя свечи отклонится в сторону. На острие шара образуется настолько большая плотность зарядов, что окружающий воздух ионизируется. Ионы противоположного знака притягиваются острием и нейтрализуют его заряд.

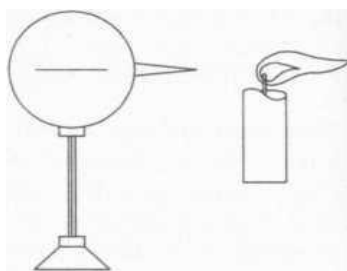


Рисунок 12

Решите следующие задачи

1.4. Чему равен заряд заземленной металлической сферы радиусом $R=30$ см, если на расстоянии $\alpha = 60$ см от ее центра находится точечный заряд $q = 4,0 \cdot 10^{-11}$ Кл?

1.7. По всему объему шара радиусом R равномерно распределен заряд $+Q$. Найти напряженность электрического поля как функцию расстояния от центра шара и построить график зависимости $E(x)$.

1.11. Два точечных заряда q_1 и q_2 расположены на расстоянии l_0 друг от друга. Найти напряженность электрического поля в точке, находящейся на расстоянии l_1 от заряда q_1 и l_2 от заряда q_2 . Рассмотреть случаи разноименных и одноименных зарядов.