Электростатика

В электростатике рассматривается взаимодействие неподвижных электрически заряженных частиц и действие электрических полей на внесенные в них заряженные тела.

Количественной мерой взаимодействия заряженных тел является *электрический заряд* q. Заряд — скалярная алгебраическая величина, т. е. он может быть положительным и отрицательным.

Основные свойства электрических зарядов: *двойственность, сохранение, квантование, аддитивность, инвариантность* к разным инерциальным системам отсчета.

Двойственность электрических зарядов состоит в том, что в природе существуют заряды двух знаков: положительные и отрицательные. Наименьшим (элементарным) положительным зарядом обладает протон, наименьшим (элементарным) отрицательным зарядом обладает электрон.

Наименьшая частица вещества — атом состоит из отрицательно заряженной электронной оболочки и положительно заряженного ядра. Число отрицательно заряженных электронов в электронной оболочке равно числу положительно заряженных протонов в ядре атома, поэтому атом электрически нейтрален. Если атом лишится части электронов, то превратится в положительный ион, а если к нему добавятся лишние электроны, — то в отрицательный ион.

Единица заряда в СИ — *кулон* (Кл). Выразим кулон через основные единицы СИ:

Кл = А · с.

Заряд электрона e равен по модулю заряду протона и называется *элементарным зарядом*:

$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Заряды одного знака — одноименные заряды — отталкиваются друг от друга, а заряды противоположных знаков — разноименные заряды — притягиваются друг к другу.

Закон сохранения зарядов: общий заряд замкнутой системы сохраняется при всех изменениях внутри системы. Замкнутой здесь называют систему, которая не обменивается зарядами с внешними телами. Янтарь или эбонит, потертые о мех или шерсть, приобретают отрицательный заряд, при этом мех или шерсть — такой же по модулю положительный заряд. Стекло, потертое о шелк, приобретает положительный заряд, шелк — такой же по модулю отрицательный заряд.

Квантование зарядов состоит в том, что любой заряд q содержит в себе целое число N элементарных зарядов e (формула 131):

$$q = Ne.$$

Аддитивность зарядов состоит в том, что заряд системы тел равен алгебраической сумме зарядов, составляющих эту систему.

Инвариантность зарядов к разным инерциальным системам состоит в том, что заряд тела не зависит от скорости его движения.

Заряды делят на свободные и связанные.

Свободными называют заряды, способные перемещаться по всему заряженному телу под действием электрического поля. *Связанными* называют заряды, которые могут лишь смещаться внутри молекулы или атома, но не способны перемещаться по всему заряженному телу под действием электрического поля.

Ниже приведены основные формулы электростатики.

Кратность электрического заряда

$$131)\ q = Ne$$

Здесь q — заряд (Кл), N — число нескомпенсированных элементарных зарядов в заряде q (безразмерное), $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл — элементарный заряд (Кл).

Поверхностная плотность заряда

$$132)\ \sigma = \frac{q}{S}$$

Здесь σ — поверхностная плотность заряда (Кл/м^2), q — заряд на поверхности (Кл), S — площадь этой поверхности (м^2).

Закон Кулона

$$133)\ F = k\frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r^2}$$

Здесь F — сила взаимодействия точечных зарядов (Н),

$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9$ Н $\cdot$ м^2/Кл^2 — коэффициент пропорциональности, q_1 и q_2 — модули взаимодействующих зарядов (Кл), ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды (безразмерная), $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная, r — расстояние между зарядами (м).

Формула напряженности

$$134)\ E = \frac{F}{q}$$

Здесь E — напряженность электрического поля (Н/Кл или В/м), F — сила, действующая на заряд (Н), q — заряд (Кл).

Напряженность поля точечного заряда

$$135)\ E = k\frac{q}{\varepsilon r^2} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}$$

Здесь E — напряженность поля (Н/Кл или В/м), k — коэффициент пропорциональности (Н $\cdot$ м^2/Кл^2), q — модуль заряда (Кл), ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды (безразмерная), ε_0 — электрическая постоянная (Ф/м), r — расстояние от точки с напряженностью E до заряда q (м).

Напряженность поля бесконечной равномерно заряженной плоскости

$$136)\ E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon}$$

Здесь E — напряженность электрического поля (В/м), σ — поверхностная плотность зарядов на плоскости (Кл/м^2), ε_0 — электрическая постоянная (Ф/м), ε — диэлектрическая проницаемость среды (безразмерная).

Напряженность поля двух разноименно и равномерно заряженных плоскостей с одинаковой поверхностной плотностью зарядов (напряженность поля плоского конденсатора)

$$138)\ E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\varepsilon}$$

Все величины те же, что и в предыдущей формуле.

Работа перемещения заряда в однородном электрическом поле

$$139)\ A = Eqd$$

Здесь A — работа перемещения заряда (Дж), E — напряженность однородного поля (Н/Кл или В/м), q — перемещаемый заряд (Кл), d — проекция перемещения на силовую линию однородного поля (м).

Потенциал электрического поля

$$140)\ \varphi = \frac{W_p}{q}$$

Здесь φ — потенциал электрического поля (В), W_p — потенциальная энергия заряда (Дж), q — заряд, обладающий этой энергией в электрическом поле (Кл).

Потенциал поля точечного заряда

$$141)\ \varphi = k\frac{q}{\varepsilon r} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r}$$

Все величины те же, что и в формуле 135).

Разность потенциалов

$$142)\ \varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi = U = \frac{A}{q}$$

Здесь $\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi$ — разность потенциалов между двумя точками поля (В), U — напряжение (В), A — работа перемещения заряда между этими точками (Дж), q — перемещаемый заряд (Кл).

Связь напряженности с разностью потенциалов в однородном электрическом поле

$$143)\ E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$$

$$144)\ E = \frac{U}{d}$$

Здесь E — напряженность электрического поля (Н/Кл или В/м), $\varphi_1 - \varphi_2$ — разность потенциалов между двумя точками поля (В), U — напряжение между этими точками (В), d — проекция расстояния между этими точками на силовую линию поля (м).

Электроемкость проводника

$$145)\ C=\frac{q}{\varphi}$$

Здесь C — емкость проводника (Ф), q — заряд проводника (Кл), φ — его потенциал (В).

Емкость сферического проводника

$$146)\ C=4\pi\varepsilon_0\varepsilon R$$

Здесь C — емкость сферического проводника (Ф), ε_0 — электрическая постоянная (Ф/м), ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды (безразмерная), R — радиус сферы (м).

Емкость конденсатора

$$147)\ C=\frac{q}{\varphi_1-\varphi_2}$$

$$148)\ C=\frac{q}{U}$$

Здесь C — емкость конденсатора (Ф), q — его заряд (Кл), $\varphi_1-\varphi_2$ — разность потенциалов между его обкладками (В), U — напряжение между обкладками (В).

Емкость плоского конденсатора

$$149)\ C=\frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d}$$

Здесь C — емкость плоского конденсатора (Ф), ε_0 — электрическая постоянная (Ф/м), ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды (безразмерная), S — площадь обкладок конденсатора (м^2), d — расстояние между обкладками (м).

Последовательное соединение конденсаторов

Заряд q — одинаков на всех конденсаторах

$$150)\ U_{\text{общ}}=U_1+U_2+U_3+\ldots+U_N$$

$$151)\ \frac{1}{C_{\text{общ}}}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}+\ldots+\frac{1}{C_N}$$

Если все конденсаторы имеют одинаковую емкость C, то

$$152)\ C_{\text{общ}}=\frac{C}{N}$$

$$153)\ U_{общ} = NU$$

Здесь q — заряд конденсаторов (Кл), $U_{общ}$ — общее напряжение на батарее конденсаторов (В), U_1, U_2, U_3, ... U_N — напряжения на отдельных конденсаторах (В), N — число конденсаторов (безразмерное), $C_{общ}$ — общая емкость батареи конденсаторов (Ф), C_1, C_2, C_3, ... , C_N — емкости отдельных конденсаторов (Ф).

Параллельное соединение конденсаторов

Напряжение U — одинаково на всех конденсаторах

$$154)\ q_{общ} = q_1 + q_2 + q_3 + ... + q_N$$

$$155)\ C_{общ} = C_1 + C_2 + C_3 + ... + C_N$$

Если все конденсаторы имеют одинаковую емкость C, то

$$156)\ C_{общ} = NC$$

$$157)\ q_{общ} = qN$$

Здесь U — напряжение на конденсаторах (В), $q_{общ}$ — общий заряд батареи конденсаторов (Кл), q_1, q_2, q_3, ... , q_N — заряды отдельных конденсаторов (Кл), N — число конденсаторов (безразмерное), $C_{общ}$ — емкость батареи конденсаторов (Ф), C_1, C_2, C_3, ... , C_N — емкости отдельных конденсаторов (Ф).

Формулы энергии электрического поля проводника

$$158)\ W_{эл} = \frac{C\varphi^2}{2}$$

$$159)\ W_{эл} = \frac{q^2}{2C}$$

$$160)\ W_{эл} = \frac{q\varphi}{2}$$

Здесь $W_{эл}$ — энергия электрического поля (Дж), C — емкость проводника (Ф), φ — потенциал проводника (В), q — заряд проводника (Кл).

Формулы энергии электрического поля конденсатора

$$161)\ W_{эл} = \frac{CU^2}{2}$$

$$162)\ W_{эл} = \frac{q^2}{2C}$$

$$163)\ W_{эл} = \frac{qU}{2}$$

Здесь $W_{эл}$ — энергия электрического поля конденсатора (Дж), C — емкость конденсатора (Ф), q — заряд на его обкладках (Кл), U — напряжение на обкладках конденсатора (В).

Формула энергии системы точечных зарядов

$$164)\ W_{эл} = \frac{1}{2}\left(q_1\varphi_1 + q_2\varphi_2 + \ldots + q_N\varphi_N\right)$$

Здесь $W_{эл}$ — энергия системы N точечных зарядов, q_1 , q_2 , q_3 , ... , q_N — заряды, входящие в систему, φ_1 , φ_2 , φ_3 , ... , φ_N — потенциалы полей, созданных в точке, где находится один из зарядов, остальными зарядами системы.

Основным законом электростатики является закон Кулона (формула 133).

Закон Кулона: *сила, с которой взаимодействуют два точечных покоящихся электрических заряда, прямо пропорциональна произведению модулей этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними*:

$$F = k\frac{q_1q_2}{\varepsilon r^2}.$$

Сила Кулона направлена вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие заряды. Если взаимодействуют два равномерно заряженных шара, то в формуле закона Кулона 133) r — это расстояние между их центрами. Если взаимодействуют точечный заряд и равномерно заряженный шар, то в этой формуле r — это расстояние от точечного заряда до центра шара.

Если на данный заряд действуют несколько других зарядов, то равнодействующая $\vec{F}_р$, действующая на данный заряд, равна векторной сумме сил, действующих на него со стороны каждого из других зарядов в отдельности. На рис. 108 на положительный заряд q действуют положительный заряд q_1 с силой $\vec{F}_1$ и отрицательный заряд q_2 с силой $\vec{F}_2$. Их равнодействующая $\vec{F}_р$ изображается диагональю параллелограмма, построенного на силах $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, как на сторонах.

Модуль этой равнодействующей можно найти по теореме косинусов или Пифагора. Помните, если расстояния между зарядами r, r_1 и r_2 равны соответственно 5 см, 3 см и 4 см или 10 см, 6 см и 8 см, или этим же числам с одинаковым количеством нулей (например, 50 см, 30 см и 40 см или 0, 10 см, 0,6 см и 0,8 см и т.п.), то на рис. 108 треугольники *abc* и *cde* прямоугольные, и при решении задачи можно применить теорему Пифагора.

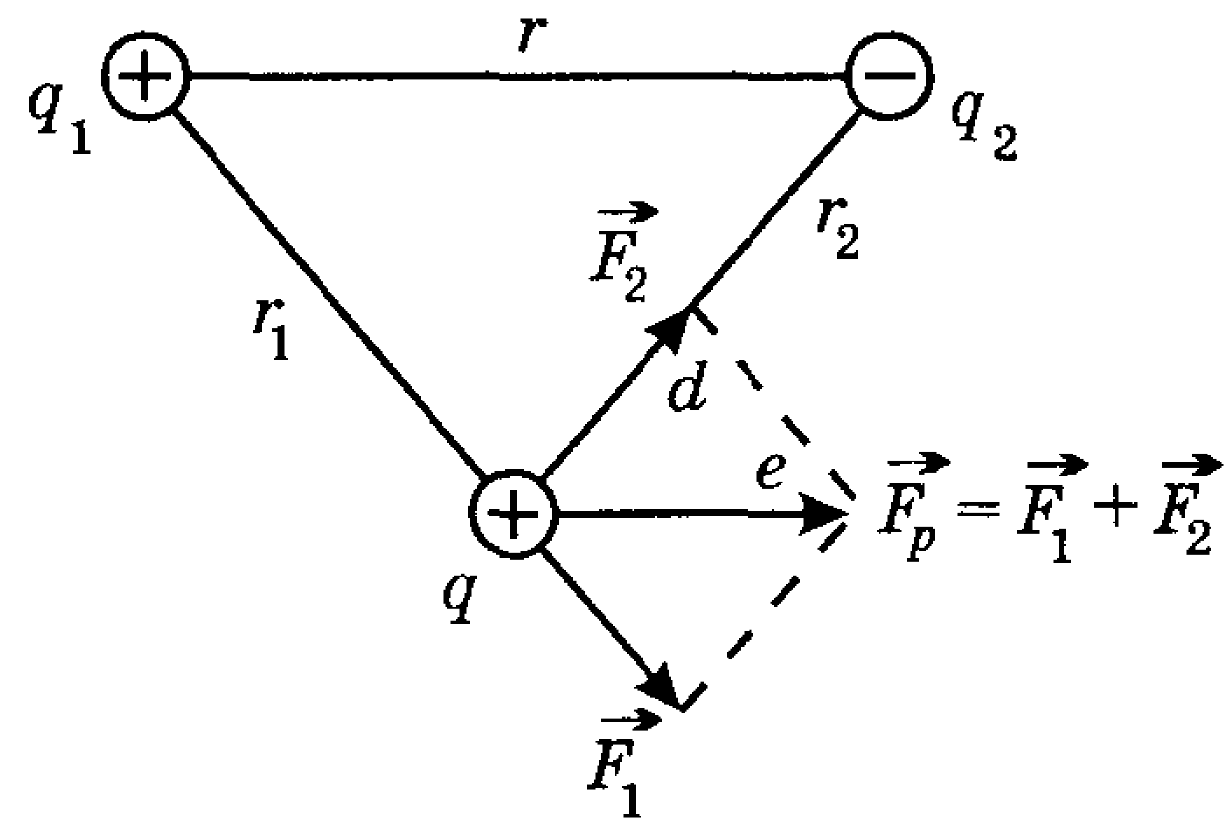


Рис. 108

Если на некоторый заряд (мы говорим «заряд», подразумевая заряженное тело), кроме силы Кулона, действуют и другие силы, например, сила тяжести, сила натяжения, сила трения и т. п., то при решении таких задач часто применяют законы Ньютона. Если заряд под действием приложенных к нему сил покоится или движется равномерно и прямолинейно, то применяют первый закон Ньютона. При этом модули всех противоположно направленных сил приравнивают друг другу. Например, на положительно заряженный шарик q_1 на нити действуют сила Кулона $\vec{F}_к$ со стороны другого положительно заряженного шарика q_2, сила тяжести $m\vec{g}$ и сила натяжения нити $\vec{F}_н$ (рис. 109). Положительно заряженный шарик q_1 будет оставаться в покое при выполнении условия:

$$F_н = F_к + mg.$$

На рис. 110 одноименно заряженные шарики на нитях, оттолкнувшись, разошлись друг от друга на некоторое расстояние r. В такой задаче надо, выполнив рисунок, приложить к шарикам силы Кулона, тяжести и натяжения так, чтобы равнодействующая сил Кулона и тяжести $F_{р1}$ была направлена вдоль нити от точки подвеса и по модулю равнялась силе натяжения нити, направленной к точке подвеса. При решении подобной задачи могут пригодиться приведенные ниже формулы:

$$F_{р1} = F_н, \quad F_{р1} = \sqrt{(mg)^2 + F_к^2}, \quad \mathrm{tg}\,\alpha = \frac{F_к}{mg} \quad \text{и т. п.}$$

Ну и конечно, сам закон Кулона 133).

Если заряженное тело под действием приложенных к нему сил движется по окружности, то их равнодействующую $F_р$ приравняйте, согласно

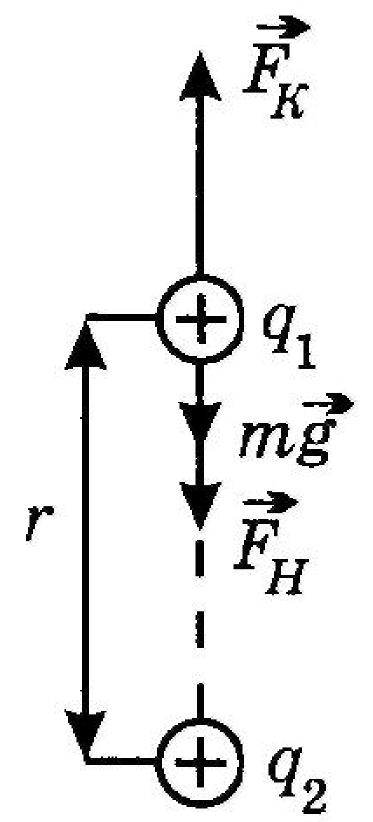


Рис. 109

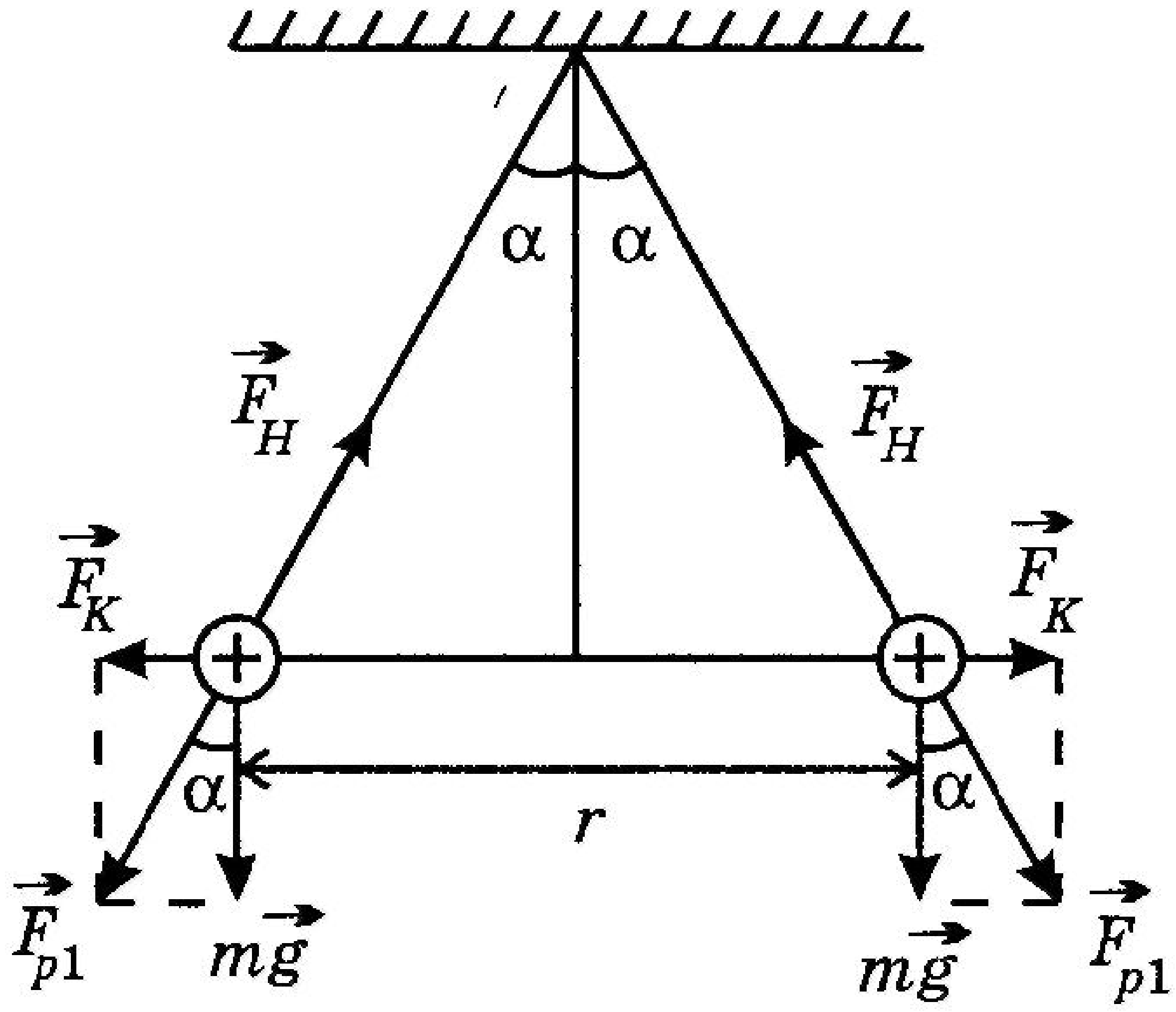


Рис. 110

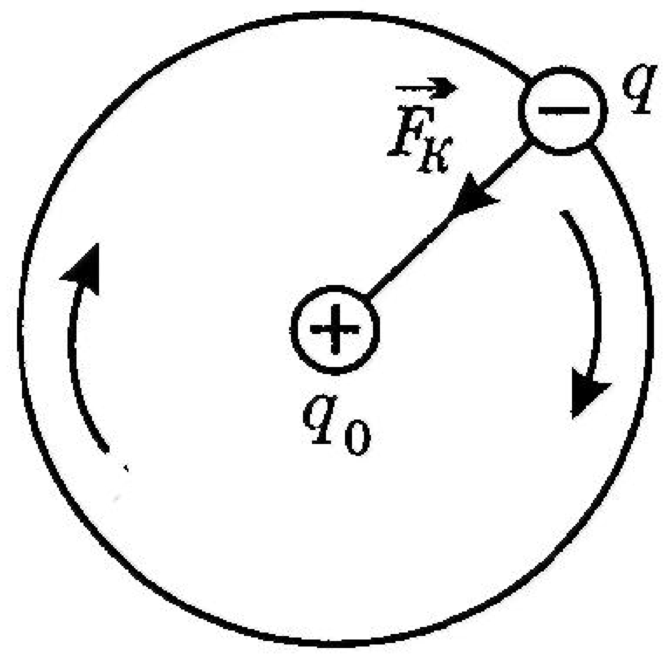


Рис. 111

второму закону Ньютона, произведению массы тела и его центростремительного ускорения. Если этой равнодействующей является сама сила Кулона, как на рис. 111, то она и равна этому произведению:

$$F_к = ma.$$

Помните: закон Кулона можно применять только к точечным зарядам или равномерно заряженным шарам. Если же один из зарядов протяженный, например, это заряженная нить или плоскость, то находить силу взаимодействия точечного заряда с протяженным или силу взаимодействия двух протяженных заряженных тел можно, выразив ее через *напряженность электрического поля* протяженного заряда. Для этого можно воспользоваться формулой 134).

***Электрическое поле** — это форма материи, окружающая электрические заряды.* Силовой характеристикой электрического поля является его напряженность $\vec{E}$.

***Напряженность электрического поля** E — это величина, равная отношению модуля силы, действующей на заряд, внесенный в это поле, к модулю этого заряда* (формула 134):

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

Заряд, внесенный в электрическое поле, называют *пробным*. Напряженность электрического поля не зависит от величины пробного заряда, как не зависит температура воды в ванне от размеров термометра, которым ее измеряют (если, конечно, термометр не очень большой). Заряд, с которым связано электрическое поле, окружающее его, называют *источником поля*.

В формуле

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

заряд q — это пробный заряд, а в формуле

$$E = k\frac{q}{\varepsilon r^2}$$

q — это заряд-источник.

Величина ε в знаменателе предыдущей формулы называется *относительной диэлектрической проницаемостью среды (диэлектрика).* Она показывает, во сколько раз напряженность E_0 электрического поля в вакууме больше напряженности E в диэлектрике:

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

Диэлектрики (*изоляторы*) — это вещества, не проводящие электрический ток, поскольку у них нет свободных зарядов. Разноименные заряды в молекулах диэлектрика связаны силами, намного превосходящими силы, действующие на них со стороны внешнего электрического поля. Поэтому при помещении диэлектрика во внешнее электрическое поле на его противоположных поверхностях появляются связанные заряды противоположного знака, а в диэлектрике возникает электрическое поле напряженностью E, которая, в отличие от напряженности поля внутри проводника, не равна нулю, но в ε раз меньше напряженности поля тех же зарядов в отсутствие диэлектрика.

Единица заряда в СИ — *кулон* (Кл).

Кл = А · с.

1 Кл — это очень большой заряд, поэтому его чаще измеряют во внесистемных единицах — микрокулонах (мкКл), нанокулонах (нКл) и пикокулонах (пКл).

1 мкКл = 10^{-6} Кл, 1 нКл = 10^{-9} Кл, 1 пКл = 10^{-12} Кл

Напряженность — векторная величина. Вектор напряженности электрического поля в данной точке направлен в ту же сторону, в какую направлена сила, действующая на *положительный* пробный заряд, внесенный в данную точку поля. На рис. 112, а) на положительный пробный заряд $q_{\text{пр}}$ в некоторой точке M поля заряда-источника $q_{\text{ист}}$ действует сила $\vec{F}$,

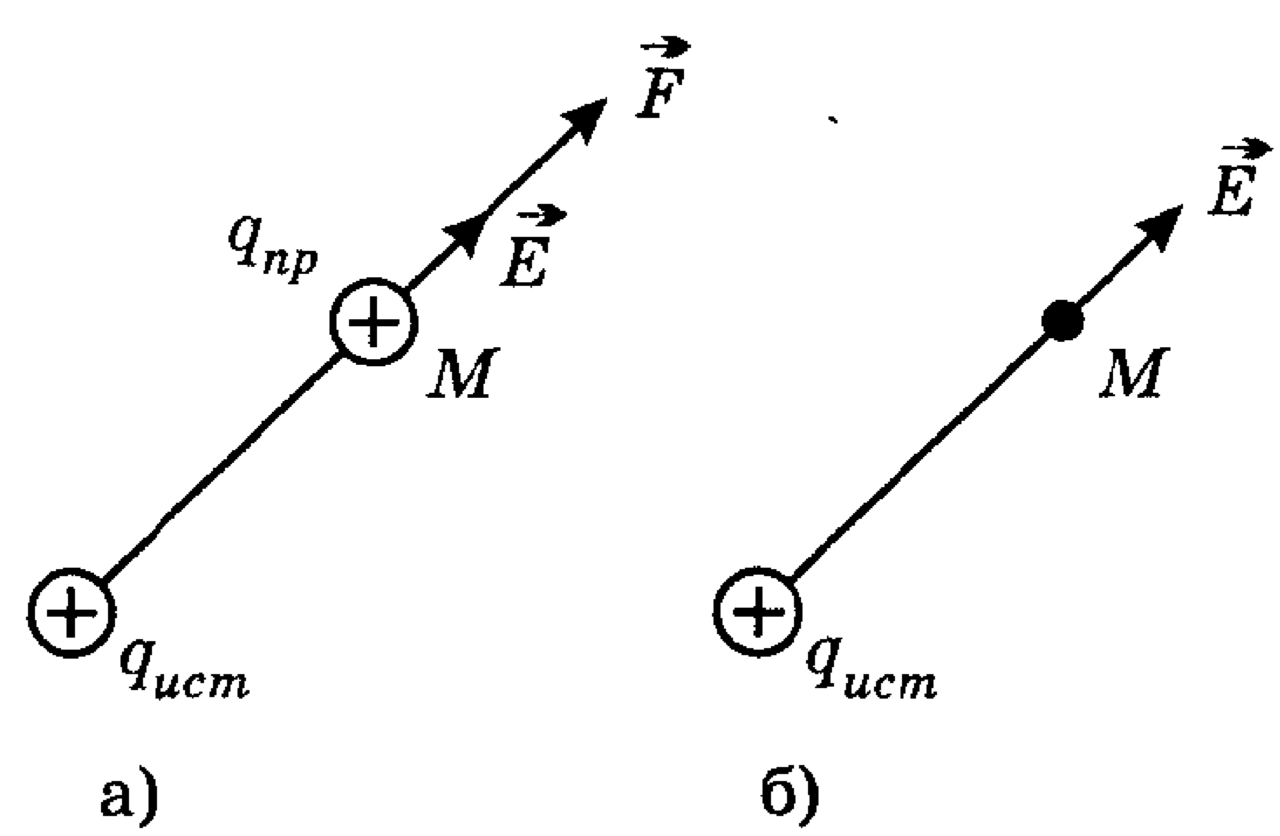


Рис. 112

направленная от заряда источника по прямой, соединяющей эти заряды. И даже если в точке M никакого пробного заряда нет (рис. 112, б), поле в ней присутствует, поэтому и напряженность у него тоже есть, и направлена она так же, как и на рис 112, а).

Если электрическое поле в данной точке M создано несколькими зарядами-источниками, то по *принципу суперпозиции* напряженность поля в этой точке равна векторной сумме напряженностей полей, созданных в ней каждым зарядом в отдельности. На рис. 113, а) напряженность поля $\vec{E}$ равна векторной сумме напряженностей полей $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$, созданным в точке M двумя положительными зарядами, на рис. 113, б) — положительным и отрицательным зарядами (диполем), на рис 113, в) — двумя отрицательными зарядами.

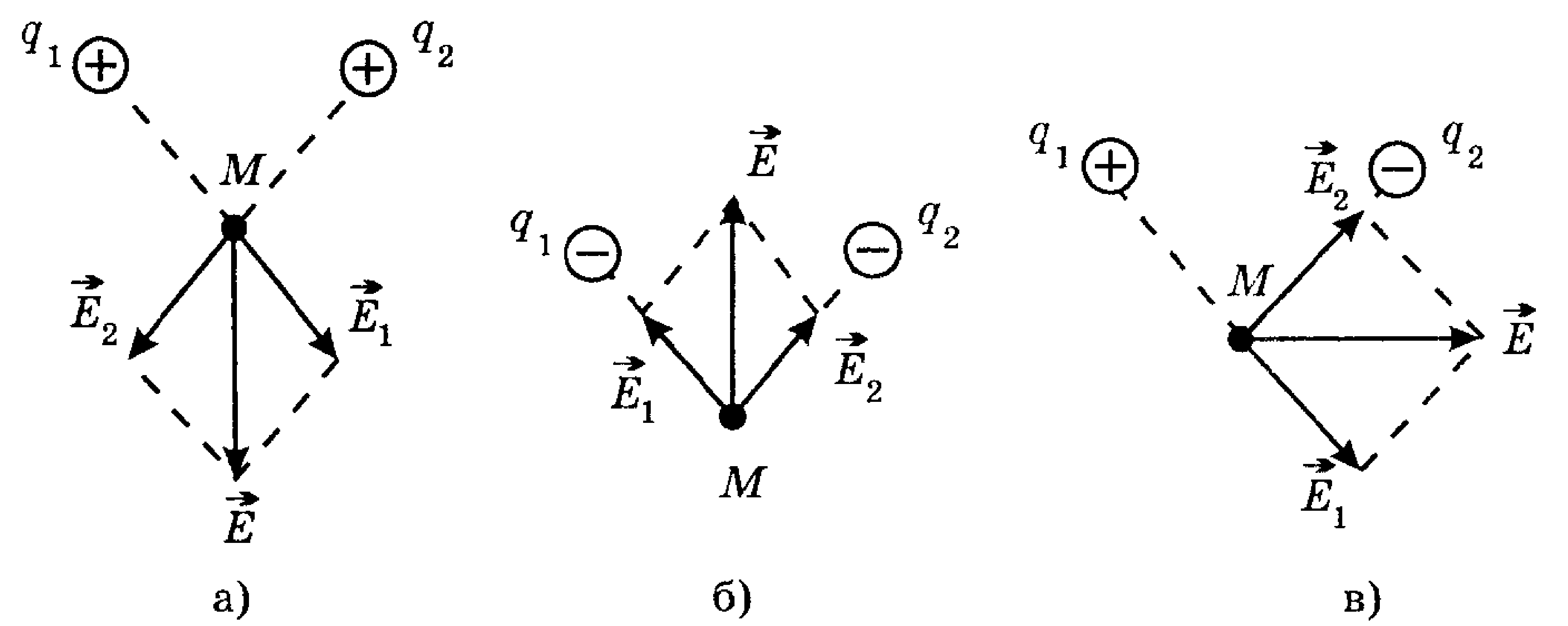


Рис. 113

Электрические поля изображают с помощью силовых линий или линий вектора напряженности. ***Силовой линией*** (*линией вектора напряженности*) ***называют линию, в каждой точке которой вектор напряженности направлен по касательной к этой линии*** (рис. 114).

Силовые линии выходит из положительных зарядов и входят в отрицательные или уходят в бесконечность, т. е. туда, где напряженность электрического поля данного заряда-источника равна нулю. Они никогда не пересекаются и всегда разомкнуты, так как начинаются на поверхности положительно заряженного проводника и оканчиваются на

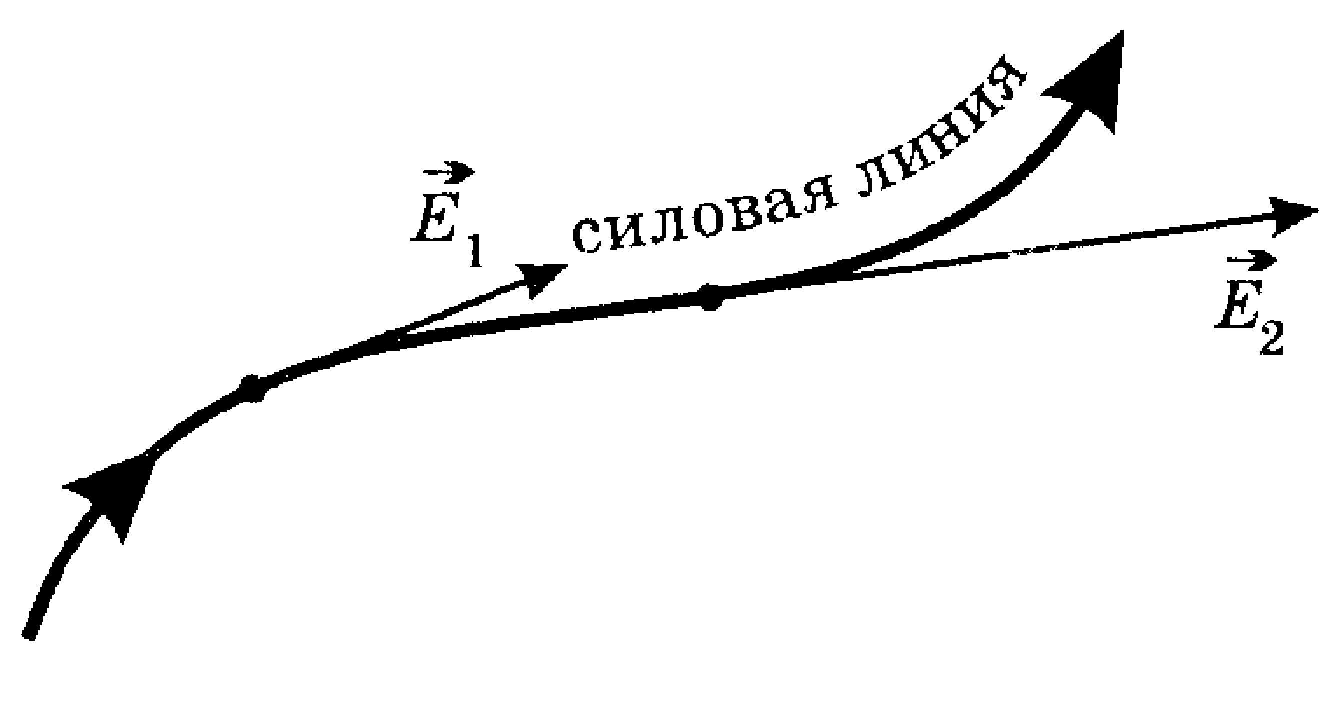


Рис. 114

поверхности отрицательного. Внутрь проводника с неподвижными зарядами на его поверхности силовые линии не проникают, поэтому внутри такого проводника (полого или сплошного, все равно) напряженность электрического поля в любой точке равна нулю.

Электрическое поле, в каждой точке которого вектор напряженности одинаков, называется однородным. Силовые линии однородного поля — это параллельные прямые, расположенные на одинаковом расстоянии друг от друга.

Примерами *однородного поля* являются поле бесконечной, равномерно заряженной плоскости (рис. 115, а) и поле между двумя бесконечными, равномерно и разноименно заряженными плоскостями (рис. 115, б).

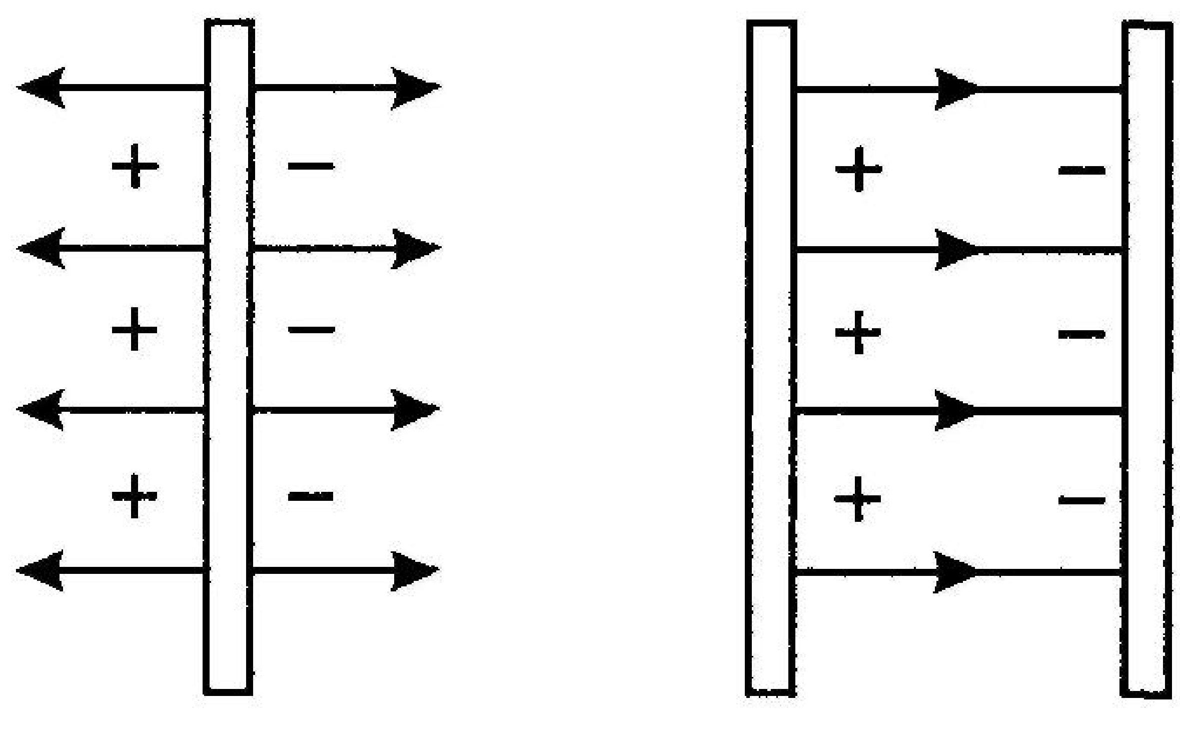


Рис. 115

Поле, в котором напряженность меняется от точки к точке, называется неоднородным. Поля точечных зарядов — это неоднородные поля. На рис. 116 изображены неоднородные поля вблизи точечного отрицательного заряда, двух разноименных точечных зарядов (поле диполя) и точечного положительного заряда. По мере удаления от этих зарядов напряженность поля уменьшается и наоборот, тогда как во всех точках однородного поля она одинакова.

На рис. 117, а) изображен график зависимости напряженности E электрического поля поверхностно заряженной сферы радиусом R от расстояния r до ее поверхности, на рис. 117, б) — график зависимости напряженности E электрического поля бесконечной, равномерно заряженной плоскости от расстояния r до нее, на рис. 117, в) — тот же график для электрического поля между двумя равномерно и разноименно заряженными плоскостями, расстояние между которыми d.

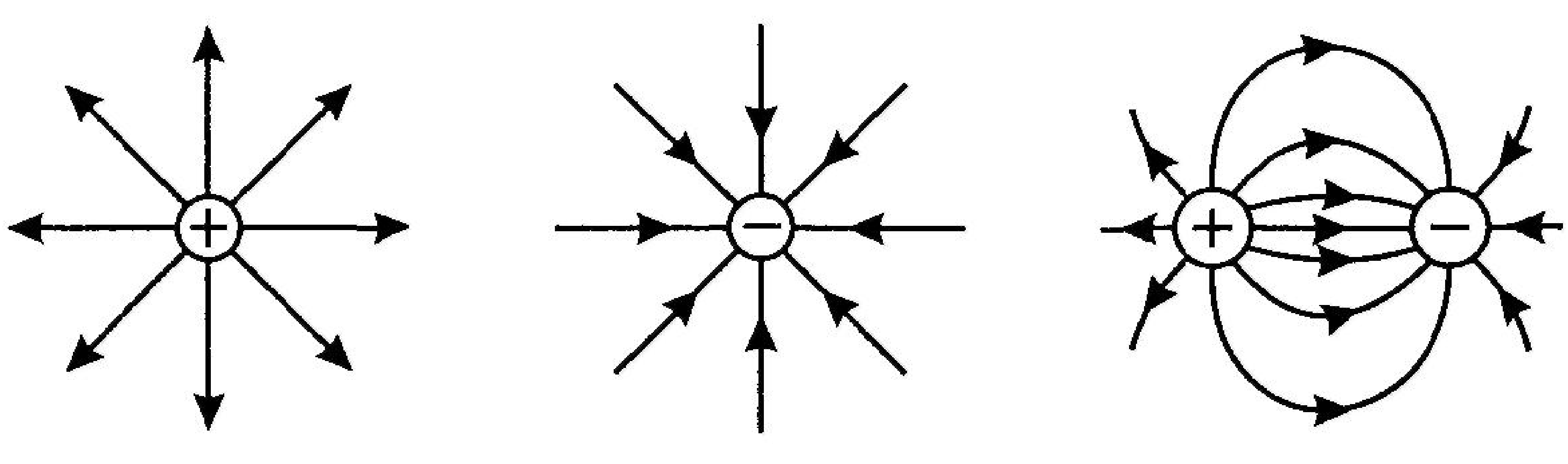


Рис. 116

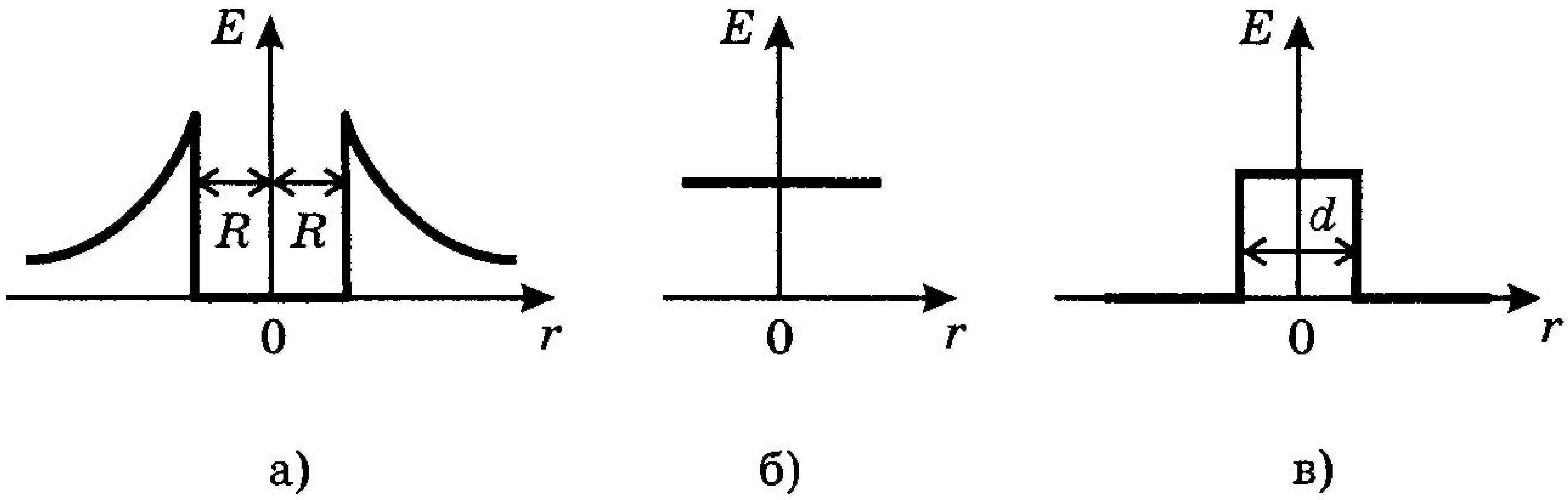


Рис. 117

Единица напряженности в СИ, согласно формуле 134), — $\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ (или, что то же самое, $\frac{\text{В}}{\text{м}}$). Выразим ее через основные единицы СИ:

$$\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}=\frac{\text{В}}{\text{м}}=\frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}^2\cdot\text{А}\cdot\text{с}}=\text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{А}^{-1}$$

Энергетической характеристикой электрического поля является потенциал φ.

***Потенциал электрического поля в данной точке** — это величина, равная отношению потенциальной энергии заряда, помещенного в эту точку, к модулю этого заряда* (формула 140):

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

В формуле 140) заряд q — это пробный заряд, а в формуле 141)

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

q — заряд-источник. Потенциал поля заряженного шара, как полого, так и сплошного, в любой его точке на поверхности или внутри полого тоже можно вычислить по формуле 141). В этом случае r — это радиус шара. А если точка находится вне шара, то r — расстояние от нее до центра шара. На рис. 118 изображен график зависимости потенциала точек поля заряженного шара от расстояния r до его центра.

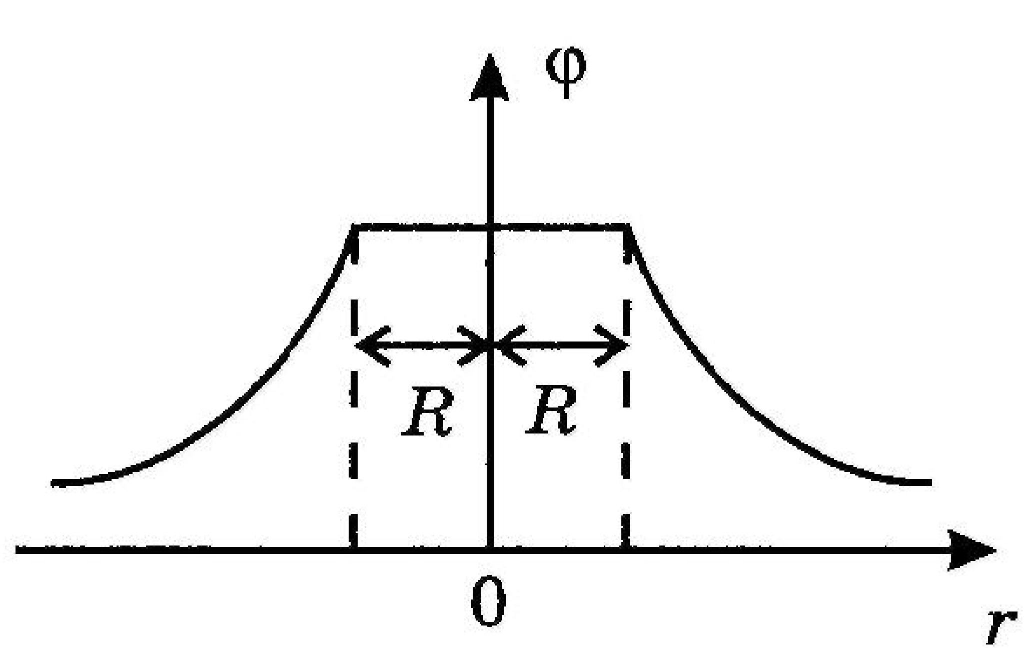


Рис. 118

Потенциал — скалярная алгебраическая величина, т. е. он может быть положительным и отрицательным. Потенциал поля положительного заряда считается положительным, а отрицательного —

отрицательным. Если поле в данной точке создано несколькими зарядами, то его потенциал равен алгебраической сумме потенциалов полей, созданных в этой точке каждым зарядом в отдельности. По мере удаления от положительного заряда-источника или приближения к отрицательному потенциал его поля понижается — и наоборот.

Если два заряженных проводника привести в соприкосновение или соединить третьим проводником, то их потенциалы станут одинаковы, а общий заряд будет равен сумме бывших зарядов на проводниках.

Разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi$ (или *напряжение* U) *между двумя точками электрического поля — это величина, равная отношению работы перемещения заряда из одной точки поля в другую, к модулю этого заряда* (формула 142):

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

Если заряд q перемещается в электрическом поле между точками с разностью потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ под действием электрической силы, то электрическое поле совершает работу A и при этом кинетическая энергия заряда изменяется на величину этой работы:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU = E_{k2} - E_{k1}.$$

Напряженность однородного электростатического поля связана с разностью потенциалов (напряжением) между двумя его точками формулами 143)

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

и 144)

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

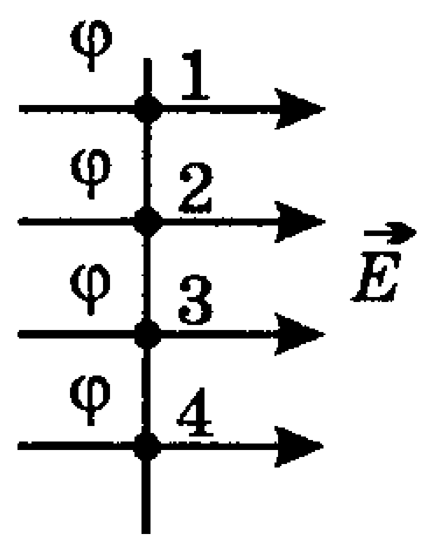


Рис. 119

Если такие точки 1, 2, 3, 4 лежат на линии или плоскости, перпендикулярной силовым линиям электрического поля, то работа перемещения заряда между такими точками равна нулю, а их потенциал одинаков (рис. 119).

Если электрическое поле однородно, то работу перемещения в нем заряда можно определить по формуле 130)

$$A = Eqd,$$

а если оно неоднородно, — то только из формулы 142):

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

Поверхность или линия, все точки которой имеют одинаковый потенциал, называется ***эквипотенциальной.*** Эквипотенциальной является поверхность любого проводника с неподвижными зарядами. При этом сами заряды могут быть распределены по поверхности проводника неравномерно: на острие их плотность больше, а где впадина — меньше, но потенциалы всех точек проводника как на поверхности, так и внутри проводника с неподвижными зарядами, одинаковы. Работа перемещения заряда по поверхности любого проводника с неподвижными зарядами равна нулю.

Если незаряженный проводник заземлить, а потом поднести к нему заряженный проводник, не касаясь первого, то из земли на незаряженный проводник придет такой же по модулю заряд противоположного знака.

Единица потенциала и разности потенциалов (напряжения) в СИ — *вольт* (В). Выразим *вольт* через основные единицы СИ:

$$\text{В} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{А} \cdot \text{с}} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}.$$

Электроемкостью (емкостью) проводника *C называется отношение заряда q, сообщенного проводнику, к потенциалу φ, который он при этом приобрел* (формула 145):

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

Емкость — скалярная положительная величина. Она зависит от формы проводника, его размеров и окружающей среды. Приближение к данному проводнику других проводников или внесение его в диэлектрическую среду увеличивает емкость данного проводника. Емкость сферического проводника определяет формула 146):

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R.$$

Единица емкости в СИ — *фарад* (Ф), Выразим фарад через основные единицы СИ:

$$\text{Ф} = \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = \frac{\text{Кл}}{\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}} = \frac{\text{Кл}^2}{\text{Дж}} = \frac{(\text{А} \cdot \text{с})^2}{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}} = \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2$$

Два одинаковых по форме и размерам проводника имеют одинаковую емкость независимо от их вещества. Медный и алюминиевый шары одинакового радиуса имеют одинаковую емкость. Если до соприкосновения они были заряженными, то после соприкосновения или соединения их проводником алгебраическая сумма их бывших зарядов распределится между ними поровну так, что на каждом проводнике окажется половина этой суммы. Например, если заряд одного проводника был равен +6 нКл, а заряд другого проводника был равен −4 нКл, то после их соединения на каждом окажется заряд $\frac{6+(-4)}{2}$ нКл = 1 нКл. Но так будет, если емкости этих проводников одинаковы. Если же нет, то следует помнить, что заряды на них перераспределятся так, что *одинаковыми станут потенциалы* этих проводников, и при этом *сумма новых зарядов на проводниках останется равной сумме их прежних зарядов.*

Система из двух, близко расположенных проводников называется конденсатором. Пластины конденсатора называют его *обкладками.*

Емкость любого конденсатора определяют формулы 147)

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$$

и 148)

$$C = \frac{q}{U}.$$

Кроме того, *емкость плоского конденсатора* определяет формула 149):

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}.$$

Через конденсатор постоянный ток не идет.

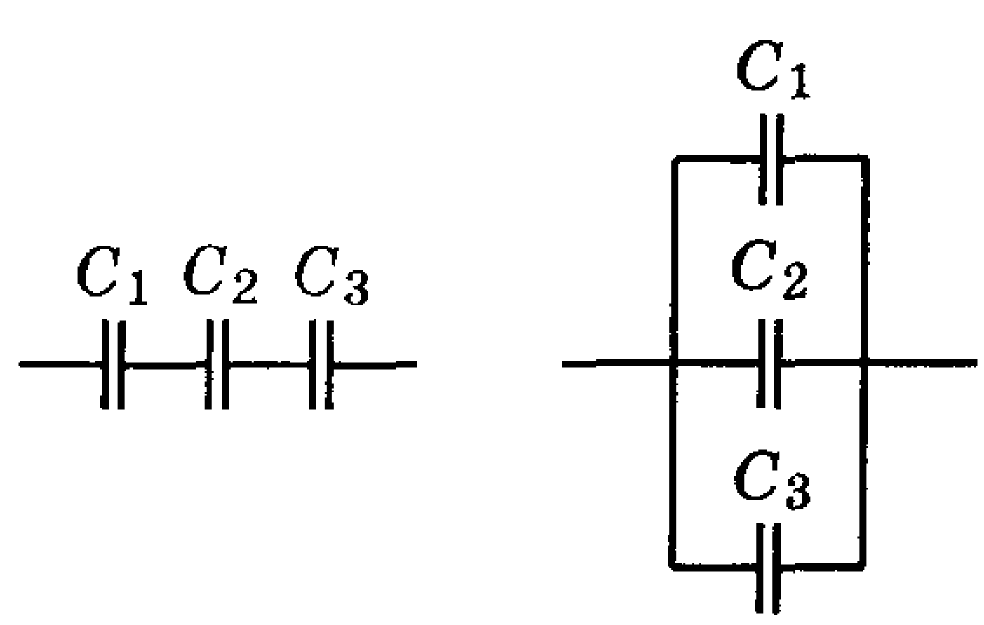
Если изменить расстояние между обкладками конденсатора или заменить диэлектрик, *не отключая конденсатор* от источника зарядов (источника напряжения), то *изменятся его емкость и заряд,* а *напряжение будет оставаться прежним,* а если это проделать, *отключив конденсатор* от источника, то будут *изменяться его емкость и напряжение,* а *заряд изменяться не будет.*

Конденсаторы соединяют последовательно и параллельно. На рис. 120, а) изображено последовательное соединение трех конденсаторов, а на рис. 120, б) — их параллельное соединение.

При последовательном соединении:

а) заряд на всех конденсаторах одинаков,

б) общее напряжение равно сумме напряжений на отдельных конденсаторах (формула 150):



а) б)

Рис. 120

$$U_{общ} = U_1 + U_2 + U_3 + ... + U_N,$$

в) величина, обратная общей емкости, равна сумме величин, обратных емкостям отдельных конденсаторов (формула 151):

$$\frac{1}{C_{общ}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots + \frac{1}{C_N}.$$

Если все последовательно соединенные конденсаторы имеют одинаковую емкость, то их общая емкость в N раз меньше емкости каждого из них (формула 152)

$$C_{общ} = \frac{C}{N},$$

а общее напряжение на них в N раз больше напряжения на каждом конденсаторе (формула 153)

$$U_{общ} = NU.$$

Здесь N — количество конденсаторов с одинаковой емкостью.

Если два последовательных конденсатора имеют емкости C_1 и C_2, то их общую емкость $C_{общ}$ можно определить по формуле

$$C_{общ} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

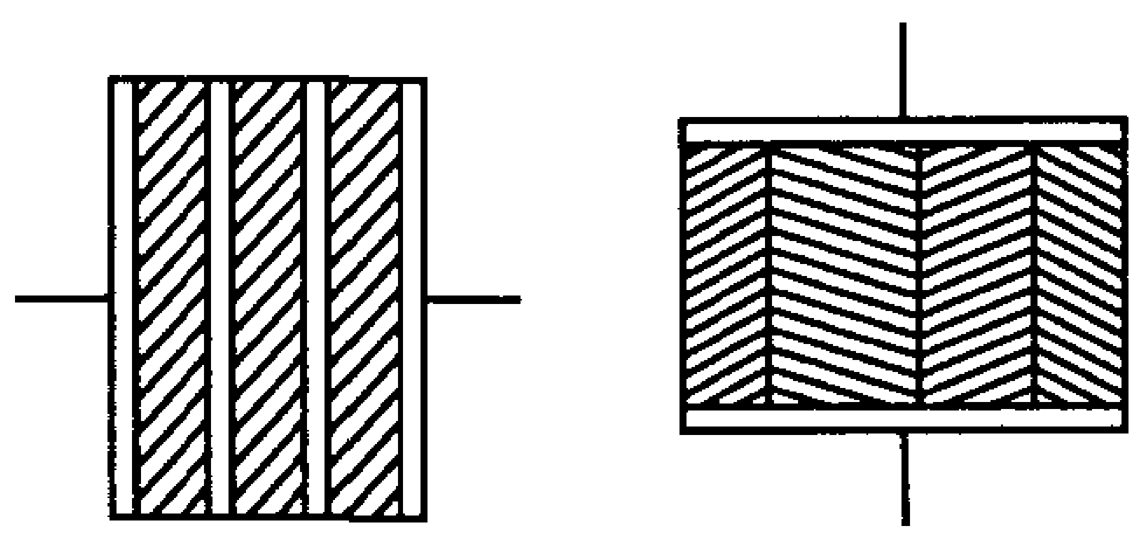
Если их три, то

$$C_{общ} = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_3 C_1}$$

и т. п.

При последовательном соединении конденсаторов их общая емкость всегда меньше самой меньшей емкости отдельного конденсатора.

На рис. 121, а) изображена батарея из трех последовательных конденсаторов, имеющая 4 обкладки и три прокладки, а на рис. 121, б) — батарея из четырех параллельно соединенных конденсаторов с четырьмя прокладками из разных диэлектриков.



а) б)

Рис. 121

Если конденсаторы соединены обкладками в одной точке (рис. 122), то алгебраическая сумма зарядов на этих обкладках равна нулю:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = 0$$

Следует также помнить, что все соединенные обкладки конденсаторов имеют одинаковый потенциал. Поэтому обкладки с одинаковым потенциалом можно соединять или разъединять с целью упрощения схемы. Если левые обкладки двух конденсаторов с одинаковой емкостью имеют одинаковые потенциалы, то потенциалы их правых обкладок тоже будут одинаковы.

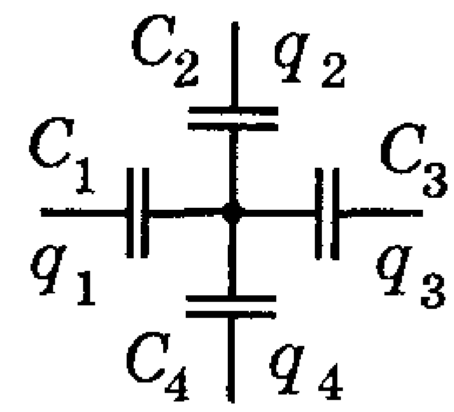


Рис. 122

Если вам предложат определить общую емкость батареи конденсаторов, подобную той, что на рис. 123, а), то учтите, что потенциалы обкладок 1 и 5 равны φ_1, потенциалы обкладок 4 и 8 равны φ_2, а в силу симметрии схемы потенциалы обкладок 2, 3, 6 и 7 тоже будут одинаковы и равны, например, φ, как и потенциалы точек *а* и *в*. Но тогда обкладки конденсатора емкостью C, соединенные с этими точками, тоже будут иметь одинаковый потенциал φ, поэтому разность потенциалов между ними будет равна нулю. А поскольку его емкость C не равна нулю, то, согласно формуле емкости 145)

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2},$$

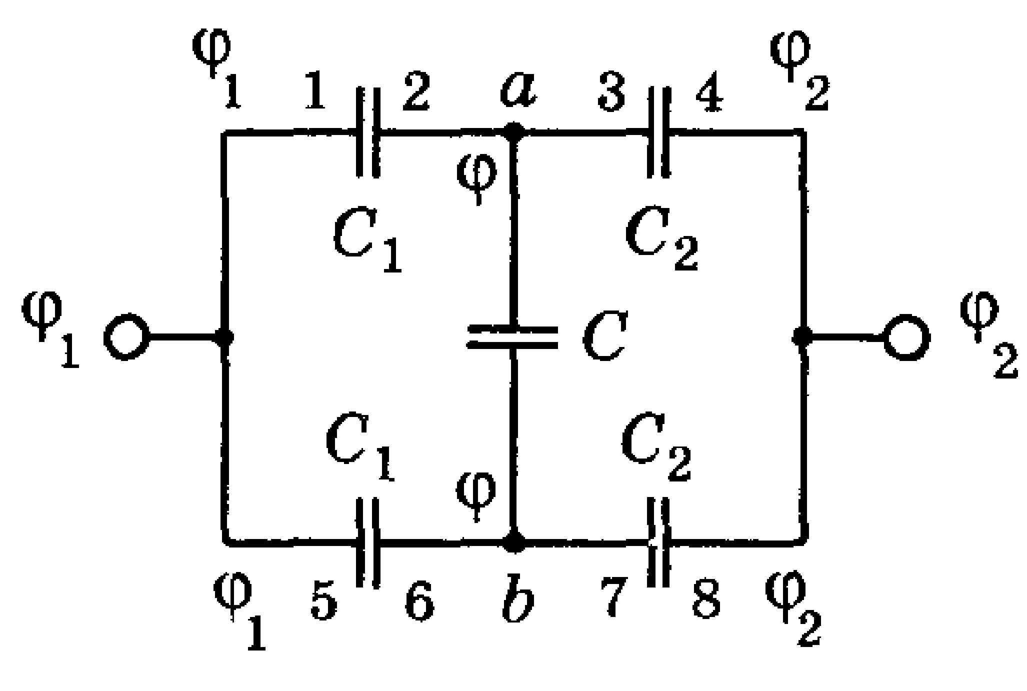
заряд этого конденсатора тоже будет равен нулю:

$$q = C(\varphi - \varphi) = 0.$$

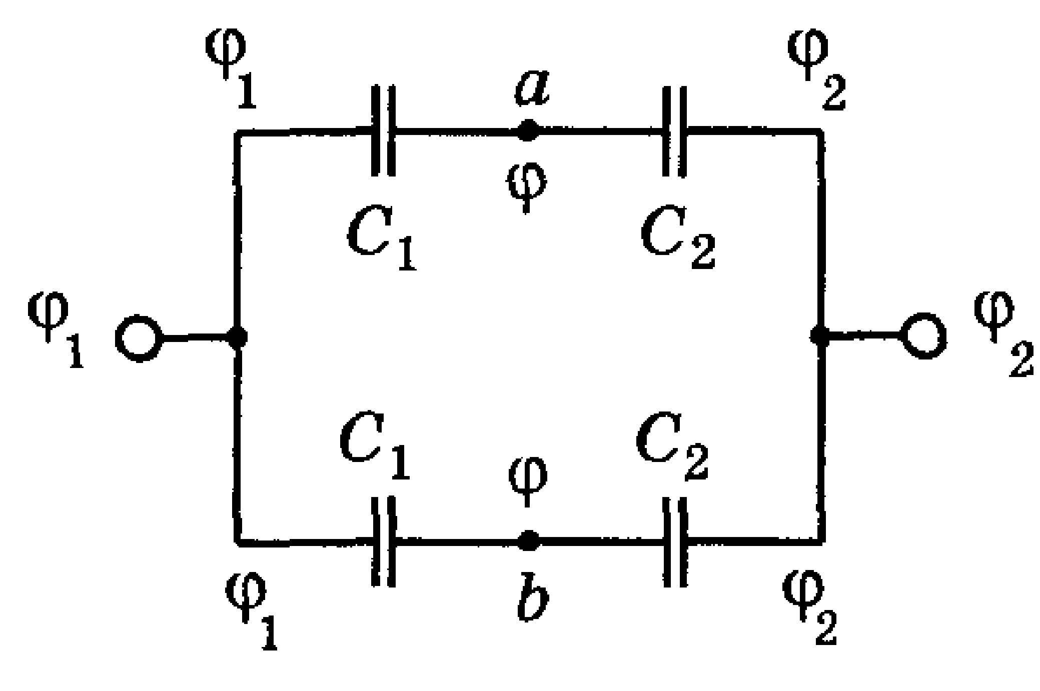
Значит, такой конденсатор окажется незаряженным и его можно исключить из схемы, заменив эквивалентной схемой (рис. 123, б), емкость которой уже определить несложно:

$$C = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2} = 2\frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}.$$

Заряженный проводник обладает энергией, величину которой определяют формулы 158)–160)



а)



б)

Рис. 123

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

Если два проводника с разными потенциалами соединить третьим проводником, то по третьему проводнику пройдет кратковременный ток и при этом выделится количество теплоты, равное разности суммарной энергии проводников до соединения и их общей энергии после соединения.

Энергию системы зарядов (заряженных проводников) определяет формула 164)

$$W_{эл} = \frac{1}{2}\left(q_1\varphi_1 + q_2\varphi_2 + \ldots + q_N\varphi_N\right).$$

Если заряды системы перемещают, меняя их расположение относительно друг друга, то работа такого перемещения равна разности энергий системы после и до перемещения зарядов.

Силу притяжения разноименно заряженных обкладок конденсатора можно найти, умножив его заряд на напряженность поля одной из обкладок, которую определяет формула 136):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}.$$

Энергию заряженного конденсатора определяют формулы 161)–163):

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

Если в задаче требуется определить работу по изменению емкости конденсатора, — например, если из него вынули прокладку или заменили ее, или изменили расстояние между обкладками, то эту работу можно определить как разность энергий конденсатора после и до этих действий.

Если заряженные конденсаторы соединяют проводником, то при наличии разности потенциалов между соединяемыми обкладками по проводнику пройдет кратковременный ток и при этом в нем выделится некоторое количество теплоты, а общая энергия конденсаторов уменьшится. Это количество теплоты будет равно разности суммарной энергии конденсаторов после и до их соединения проводником.

А1. Какой из четырех графиков на рис. 157 соответствует зависимости силы взаимодействия двух точечных зарядов от расстояния между ними?

1) 1 2) 2 3) 3 4) 4

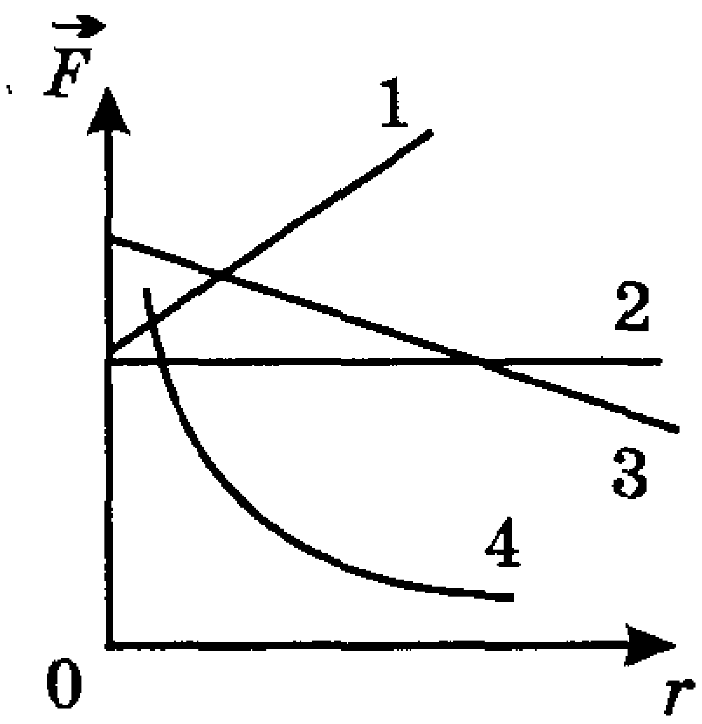


Рис. 157

А2. Во сколько раз изменится сила взаимодействия двух точечных зарядов, если один из них уменьшить в 4 раза, а второй увеличить в 2 раза?

1) увеличится в 2 раза 2) уменьшится в 2 раза
3) уменьшится в 8 раз 4) увеличится в 6 раз

А3. Расстояние от точки поля до заряда увеличили в 3 раза. При этом напряженность поля этого заряда в данной точке

1) увеличилась в 3 раза 2) уменьшилась в 6 раз
3) уменьшилась в 3 раза 4) уменьшилась в 9 раз

А4. Заряд 50 нКл пролетел расстояние между точками с разностью потенциалов 200 В. При этом его кинетическая энергия изменилась на

1) 25 мДж 2) 100 мкДж 3) 10 мкДж 4) 1 мДж

А5. В вершинах квадрата расположены 4 одинаковых по модулю точечных заряда с разными знаками (рис. 158). Вектор напряженности в центре квадрата направлен, куда показывает стрелка

1) 1 2) 2 3) 3 4) 4

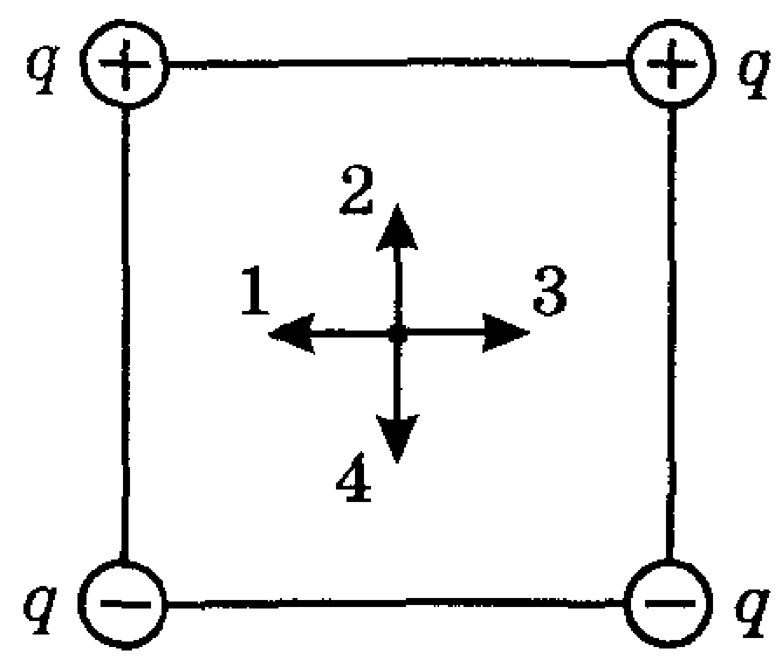


Рис. 158

А6. Единица емкости выражена через основные единицы СИ верно под номером

1) кг · $м^2$ · $с^{-2}$ · $А^{-2}$ 2) $кг^{-1}$ · $м^{-2}$ · $с^4$ · $А^2$
3) кг · $м^{-2}$ · $с^2$ · А 4) $кг^2$ · м · $с^{-4}$ · $А^3$

А7. Расстояние между обкладками конденсатора уменьшили в 4 раза, не отключая его от источника зарядов. При этом напряжение на обкладках конденсатора

1) увеличилось в 2 раза
2) увеличилось в 4 раза
3) не изменилось
4) уменьшилось в 4 раза

А8. Общая емкость батареи конденсаторов, изображенной на рис. 159, равна

1) 2 мкФ
2) 6 мкФ
3) 8 мкФ
4) 16 мкФ

А9. В однородном электрическом поле напряженностью 10 В/м заряд 5 мкКл перемещен между точками 1 и 2 (рис. 160). Расстояние между точками 4 см. Совершенная при этом работа равна

1) 2 мкДж
2) 10 мкДж
3) 0,2 мкДж
4) 0

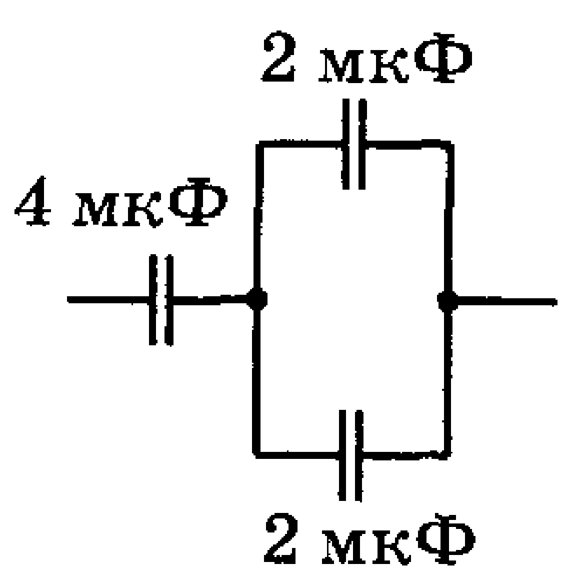


Рис. 159

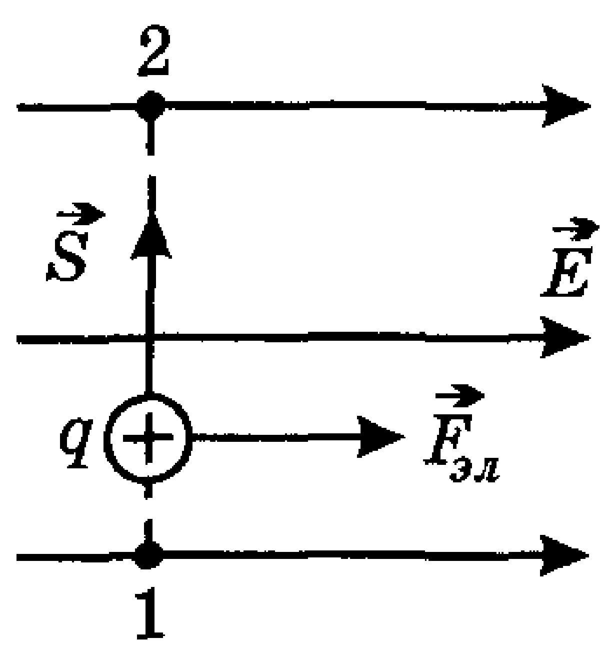


Рис. 160

А10. Расстояние между обкладками конденсатора увеличили в 3 раза, предварительно отключив его от источника зарядов. При этом энергия электрического поля конденсатора

1) не изменилась
2) уменьшилась в три раза
3) увеличилась в 3 раза
4) увеличилась в 9 раз

А1. Согласно закону Кулона (формула 133) сила взаимодействия зарядов F обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними r. Следовательно, с увеличением расстояния между зарядами сила их взаимодействия нелинейно (по кривой) уменьшается.

Правильный ответ 4).

А2. Запишем закон Кулона до изменения зарядов:

$$F_1 = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

и после их изменения, когда первый заряд стал равен $\frac{q_1}{4}$, а второй — $2q_2$:

$$F_2 = k\frac{q_1 2q_2}{4r^2} = k\frac{q_1 q_2}{2r^2}.$$

Сравнивая эти формулы, мы видим , что сила F_2 вдвое меньше силы F_1. Значит, сила взаимодействия зарядов уменьшится вдвое.

Правильный ответ 2).

А3. Запишем формулу напряженности поля точечного заряда 135) для первого случая, когда расстояние от точки поля, где определялась напряженность, до заряда, было равно r, и для второго случая, когда оно стало равно $2r$:

$$E_1 = k\frac{q}{r^2} \quad \text{и} \quad E_2 = k\frac{q}{(3r)^2} = k\frac{q}{9r^2}.$$

Сравнивая эти формулы, мы видим, что во втором случае напряженность меньше в 9 раз.

Правильный ответ 4).

А4. Изменение кинетической энергии заряда ΔE_k происходит за счет работы перемещения заряда A в электрическом поле, поэтому $\Delta E_k = A$, где, как это следует из формулы 142) $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$, поэтому

$\Delta E_k = q(\varphi_1 - \varphi_2) = 50 \cdot 10^{-9} \cdot 200$ Дж $= 10 \cdot 10^{-6}$ Дж $= 10$ мкДж.

Правильный ответ 3).

А5. Вектор напряженности направлен от положительного заряда к отрицательному. На рис. 169 изображен результирующий вектор $E_р$ напряженности поля всех четырех зарядов, равный векторной сумме напряженностей полей каждого заряда в отдельности. Как следует из чертежа, он направлен вниз.

Правильный ответ 4).

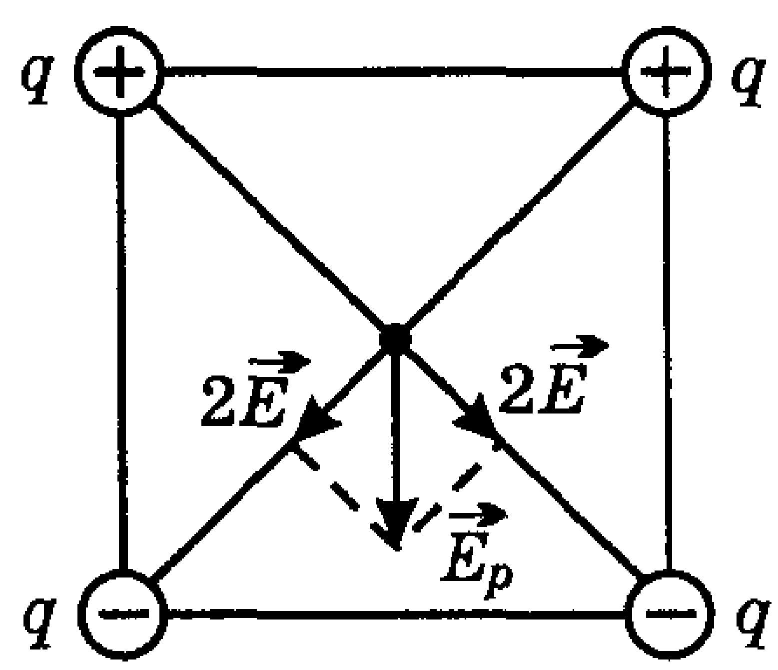


Рис. 169

А6. *Правильный ответ* 2) (см. краткую теорию к теме 6 «Электростатика»).

А7. Если конденсатор не отключали от источника зарядов, напряжение на его обкладках будет оставаться равным разности потенциалов на полюсах источника.

Правильный ответ 3).

А8. Общая емкость двух параллельных конденсаторов, согласно формуле 156, равна 2 · 2 мкФ = 4 мкФ. С ними конденсатор слева соединен последовательно, поэтому их общая емкость, согласно формуле 152), равна $\frac{4}{2}$ мкФ = 2 мкФ.

Правильный ответ 1).

А9. На заряд действует электрическая сила $F_{эл}$, перпендикулярная его перемещению $\vec{S}$. Работа перемещения определяется произведением модуля этой силы, модуля перемещения и косинуса угла между векторами силы и перемещения. Как следует из рис. 156, это угол равен 90^0, а $\cos 90^0 = 0$, поэтому и работа перемещения заряда в направлении, перпендикулярном силовым линиям электрического поля, всегда равна нулю.

Правильный ответ 4).

А10. Поскольку конденсатор отключили от источника зарядов, то при изменении расстояния d между его обкладками заряд на них сохранялся. При этом менялась емкость конденсатора C согласно формуле149)

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}.$$

Энергию конденсатора в этом случае лучше определять по формуле 162)

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

или с учетом предыдущей формулы

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

Отсюда видно, что при увеличении расстояния d в 3 раза энергия поля конденсатора тоже увеличится в 3 раза.

Правильный ответ 3).