

Электрическое поле

Электродинамика – раздел физики, изучающий свойства и взаимодействия электрических зарядов, осуществляемые посредством электромагнитного поля.

Электростатикой называется раздел электродинамики, в котором рассматриваются свойства и взаимодействия неподвижных электрически заряженных тел или частиц.

Электромагнитное взаимодействие – это взаимодействие между электрически заряженными частицами или макротелами.

Точечный заряд – заряженное тело, размер которого мал по сравнению с расстоянием, на котором оценивается его действие.

Электризация тел

Электризация – процесс сообщения телу электрического заряда, т. е. нарушение его электрической нейтральности. Процесс электризации представляет собой перенесение с одного тела на другое электронов или ионов.

Способы электризации:

Электризация трением – например, электризация эбонитовой палочки при трении о мех. При тесном соприкосновении двух тел часть электронов переходит с одного тела на другое; в результате этого на поверхности у одного из тел создается недостаток электронов и тело получает положительный заряд, а у другого – избыток, и тело заряжается отрицательно. Величины зарядов тел одинаковы;

Электризация через влияние (электростатическая индукция) – тело остается электрически нейтральным, электрические заряды внутри него перераспределяются так, что разные части тела приобретают разные по знаку заряды.

Электризация при соприкосновении заряженного и незаряженного тела – заряд при этом распределяется между этими телами пропорционально их размерам. Если размеры тел одинаковы, то заряд распределяется между ними поровну.

Взаимодействие зарядов. Два вида зарядов

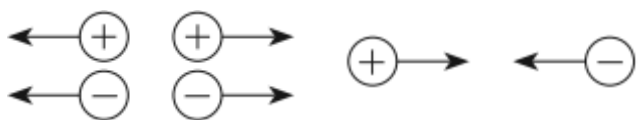
Электрический заряд – физическая величина, характеризующая способность тела участвовать в электромагнитных взаимодействиях. Обозначение – q , единица измерения в СИ – кулон (Кл). Существуют два вида электрических зарядов: положительный и отрицательный. Если тело имеет избыточные (лишние) электроны, то тело заряжено отрицательно, если у тела недостаток электронов, то тело заряжено положительно. Минимальный заряд, который может быть сообщен телу, называется **элементарный заряд**.

Элементарный заряд: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Важно! Модуль заряда электрона равен элементарному, заряд протона также равен элементарному.

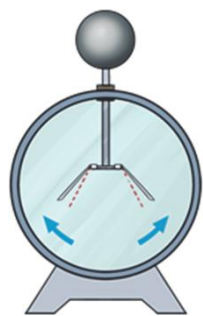
Поскольку заряд тела связан с недостатком или избытком электронов, то любой заряд в природе будет кратен элементарному, т.е. $q = \pm Ne$, где N — число избыточных или недостающих электронов

Важно! Частица может не иметь заряда, но заряд без частицы не существует.



Электрические заряды взаимодействуют: заряды одного знака отталкиваются, заряды противоположных знаков притягиваются

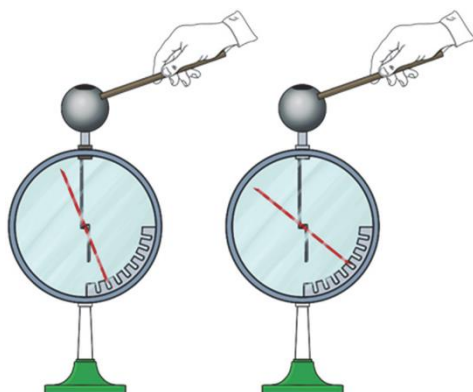
На взаимодействии одноименных зарядов основано действие приборов: электроскопа и электрометра.



Электроскоп - прибор для обнаружения электрического заряда называется. Основная часть прибора – металлический стержень, на котором закреплены два листочка металлической фольги, помещенные в стеклянный сосуд. При соприкосновении заряженного тела со стержнем электроскопа заряды распределяются между листочками фольги. Так как заряд листочков одинаков по знаку, они отталкиваются.

Для сравнения зарядов используют *электрометр*.

Основные части его – металлический стержень и стрелка, которая может вращаться вокруг горизонтальной оси. Стержень со стрелкой закреплен в пластмассовой втулке и помещен в металлический корпус, закрытый стеклянными крышками. При соприкосновении заряженного тела со стержнем стержень и стрелка получают электрические заряды одного знака. Стрелка поворачивается на некоторый угол.



Закон сохранения электрического заряда

Систему называют **замкнутой (электрически изолированной)**, если в ней не происходит обмена зарядами с окружающей средой.

В любой замкнутой (электрически изолированной) системе алгебраическая сумма электрических зарядов тел остается неизменной при любых взаимодействиях внутри нее

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

Закон сохранения заряда имеет глубокий смысл. Если число заряженных элементарных частиц не меняется, то выполнение закона сохранения заряда очевидно. Но элементарные частицы могут превращаться друг в друга, рождаться и исчезать, давая жизнь новым частицам. Однако во всех случаях заряженные частицы рождаются только парами с одинаковыми по модулю и противоположными по знаку зарядами; исчезают заряженные частицы тоже только парами, превращаясь в нейтральные. И во всех этих случаях алгебраическая сумма зарядов остаётся одной и той же.

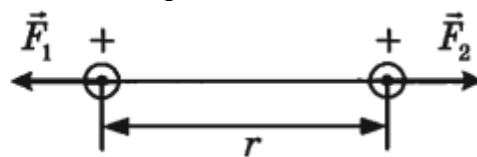
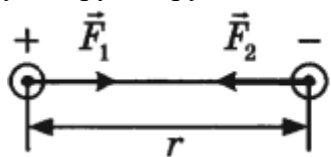
Закон Кулона

Сила взаимодействия двух точечных неподвижных электрических зарядов в вакууме прямо пропорциональна модулям зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

Коэффициент пропорциональности $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ - электрическая постоянная.

Сила Кулона направлена вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие заряды. Заряды взаимодействуют друг с другом с силами, равными по величине и противоположными по направлению.



Если точечные заряды помещены в диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ϵ , то закон Кулона выглядит несколько иначе

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}$$

Закон Кулона применим не только к взаимодействию неподвижных точечных зарядов, но и равномерно заряженных тел сферической формы. В случае вычисления силы взаимодействия двух заряженных сфер r – расстояние между центрами сферических поверхностей.

Важно! Если заряженное тело протяженное, то его необходимо разбить на точечные заряды, рассчитать силы их попарного взаимодействия и найти равнодействующую этих сил (принцип суперпозиции).

Действие электрического поля на электрические заряды

Электрическое поле – это особая форма материи, существующая вокруг электрически заряженных тел. Впервые понятие электрического поля было введено Фарадеем. Он объяснял взаимодействие зарядов следующим образом: каждый заряд создает вокруг себя электрическое поле, которое с некоторой силой действует на другой заряд.

Свойства электрического поля:

1. оно материально;
2. создается зарядом;
3. обнаруживается по действию на заряд;
4. непрерывно распределено в пространстве;
5. ослабевает с увеличением расстояния от заряда.

Действие заряженного тела на окружающие тела проявляется в виде сил притяжения и отталкивания, стремящихся поворачивать и перемещать эти тела по отношению к заряженному телу.

Напряженность электрического поля

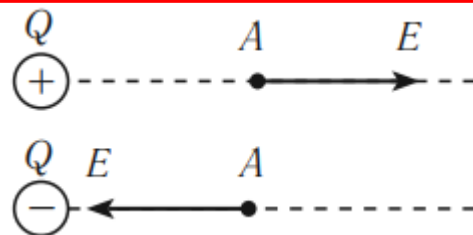
Напряженность электрического поля (E) – физическая величина, равная отношению силы, с которой электрическое поле действует на пробный точечный заряд, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда.

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

Единица измерения в СИ – $\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ или $\frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Важно! Напряженность электрического поля не зависит от величины пробного заряда, она определяется величиной заряда, создающего поле.

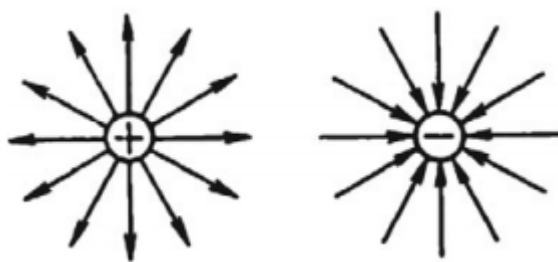
Направление вектора напряженности в данной точке совпадает с направлением силы, с которой поле действует на положительный пробный заряд, помещенный в эту точку. Поэтому вектор напряженности всегда направлен от положительного заряда и к отрицательному.



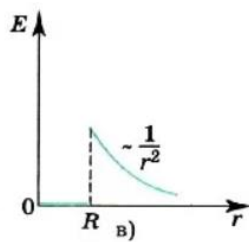
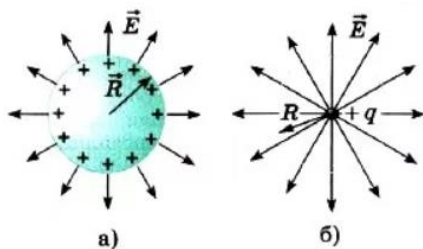
Линией напряженности электрического поля называется линия, касательная к которой в любой точке линии направлена вдоль вектора напряженности.

Линии напряженности электростатического поля начинаются на положительных электрических зарядах и заканчиваются на отрицательных электрических зарядах или уходят в бесконечность от положительного заряда и приходят из бесконечности к отрицательному заряду.

На рисунке показаны линии напряженности точечных зарядов



Модуль вектора напряженности точечного заряда Q : $E = \frac{F}{q} = \frac{k \frac{|Q| \cdot q}{r^2}}{q} = k \frac{|Q|}{r^2}$

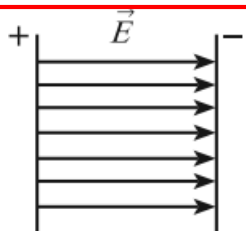


Картина линий электростатического поля заряженного шара (рисунок а) аналогично распределению силовых линий поля точечного заряда q (рисунок б). Следовательно, на расстоянии $r \geq R$ от центра шара напряжённость поля определяется той же

формулой, что и напряжённость поля точечного заряда, помещённого в центре сферы

$$E = k \frac{|Q|}{r^2} \text{ при } r \geq R.$$

Важно! Внутри проводящего шара напряжённость поля равна нулю, т.е. $E = 0$ при $r < R$.



Поле, в котором напряжённость одинакова по модулю и направлению в любой точке, называется *однородным электрическим полем*. Однородным можно считать электрическое поле между двумя разноименно заряженными металлическими пластинами. Линии напряженности в однородном электрическом поле параллельны друг другу.

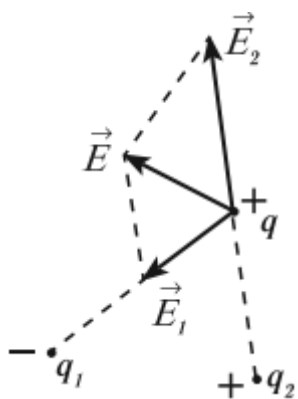
Принцип суперпозиции электрических полей

Каждый электрический заряд создает в пространстве электрическое поле независимо от наличия других электрических зарядов.

Принцип суперпозиции электрических полей: напряжённость электрического поля системы N зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых каждым из них в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_N$$

Электрические поля от разных источников существуют в одной точке пространства и действуют на заряд независимо друг от друга.



Работа электростатического поля. Потенциальная энергия заряда, помещенного в электростатическое поле

Электрическое поле совершает работу при перемещении заряда. Работа сил электростатического поля при перемещении заряда из одной точки поля в другую не зависит от формы траектории, а определяется только начальным и конечным положением заряда. Работа сил электростатического поля при перемещении заряда по любой замкнутой траектории равна нулю, такие поля называются потенциальными, а сила – консервативной.

Работа консервативной силы, т.е. работа электростатической силы электростатического поля по перемещению заряда, равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком

$$A = -\Delta W.$$

Потенциальная энергия взаимодействия зарядов вычисляется относительно нулевого уровня (аналогично потенциальной энергии поля силы тяжести). Выбор нулевого уровня потенциальной энергии определяется исходя из соображений удобства при решении задачи.

Потенциальная энергия заряда в однородном электростатическом поле

$$W_{\text{п}} = qEd,$$

где d — расстояние от заряда, до нулевого уровня потенциальной энергии.

Важно! В формуле для потенциальной энергии через q обозначается алгебраическая величина заряда (с учётом знака), а не его модуль.

Если $q > 0$, то при движении заряда вдоль силовой линии потенциальная энергия убывает: поле совершает положительную работу, разгоняя заряд, а кинетическая энергия заряда растёт за счёт убыли его потенциальной энергии.

Если $q < 0$, то потенциальная энергия при движении заряда вдоль силовой линии возрастает, т.к. сила, с которой поле действует на заряд, будет направлена при движении заряда против движения заряда. Заряд тормозится полем, кинетическая энергия заряда уменьшается, а потенциальная энергия — увеличивается.

Если два точечных заряда q_1 и q_2 находятся в вакууме на расстоянии r друг от друга, то потенциальная энергия их взаимодействия определяется формулой

$$W_{\text{п}} = k \frac{q_1 q_2}{r}.$$

Важно! Нулевой уровень потенциальной энергии взаимодействия двух точечных зарядов находится в бесконечно удаленной точке.

Важно! q_1 и q_2 — это алгебраические величины зарядов, т. е. заряды с учётом их знака.

Потенциальная энергия взаимодействия двух одноимённых зарядов будет положительной. Если «отпустить» их, то они начнут разгоняться и удаляться друг от друга. Их кинетическая энергия возрастает, потенциальная энергия — убывает. Но на бесконечности потенциальная энергия обращается в нуль, а раз она убывает к нулю, значит — она является положительной.

Потенциальная энергия взаимодействия разноимённых зарядов - отрицательна. Представим, что мы удалили разноименные заряды на очень большое расстояние друг от друга — так что потенциальная энергия равна нулю — и отпустили. Заряды начнут разгоняться, сближаться и потенциальная энергия снова убывает. Но если энергия была нулём, то она может убывать только в сторону отрицательных значений.

Потенциал электрического поля. Разность потенциалов

Потенциал — скалярная физическая величина, равная отношению потенциальной энергии электрического заряда в электростатическом поле к величине этого заряда. Обозначение — φ , единица измерения в СИ — вольт (В)

$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{q}$$

Потенциал - энергетическая характеристика электростатического поля.

Разность потенциалов численно равна работе, которую совершает электрическая сила при перемещении единичного положительного заряда между двумя точками поля

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

Обозначение — $\Delta\varphi$, единица измерения в СИ — вольт (В). Также разность потенциалов обозначают буквой U и называют **напряжением**.

Важно! Следует различать понятие разности потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ и изменением потенциала $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$.

Работу электростатического поля можно вычислить по формуле

$$A = \Delta\varphi \cdot q = qU.$$

Эта формула позволяет вычислить работу электростатических сил в любом поле.

Потенциал поля точечного заряда q в точке, удаленной от него на расстояние r

$$\varphi = \frac{kq}{r}$$

Важно! При стремлении $r \rightarrow \infty$, потенциал $\varphi \rightarrow 0$, т.е. потенциал поля в бесконечно удаленной точке равен нулю.

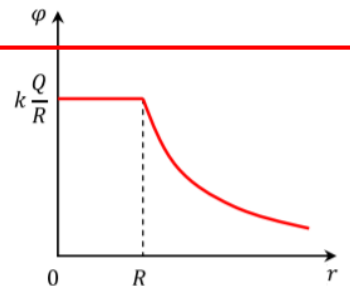
Потенциал однородного электростатического поля в точке, отстоящей на расстоянии d от неё

$$\varphi = Ed.$$

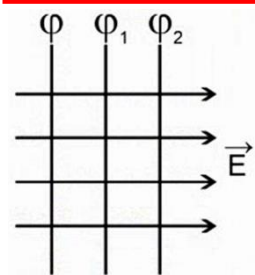
Важно! Подобно потенциальной энергии, значение потенциала в данной точке зависит от выбора нулевого уровня для отсчёта потенциала, т. е. от выбора точки, потенциал которой принимается равным нулю.

Потенциал поля заряженной сферы радиусом R , в точке, отстоящей на расстоянии r от центра сферы

$$\varphi(r) = \begin{cases} \frac{kQ}{R}, & \text{при } r \leq R \\ \frac{kQ}{r}, & \text{при } r > R \end{cases}$$



Важно! Внутри проводящего шара потенциал всех точек внутри шара равен потенциалу поверхности шара. Напряженность поля внутри шара равна нулю.

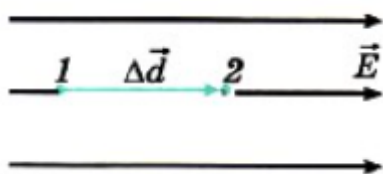
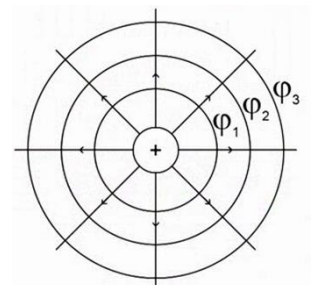


Для наглядного представления электрического поля используют эквипотенциальные поверхности. *Эквипотенциальной поверхностью*, или поверхностью равного потенциала, называется поверхность, во всех точках которой потенциал имеет одинаковое значение.

Свойства эквипотенциальных поверхностей

1. Вектор напряженности перпендикулярен эквипотенциальным поверхностям и направлен в сторону убывания потенциала.
2. Работа по перемещению заряда по эквипотенциальной поверхности равна нулю.

В случае однородного поля эквипотенциальные поверхности представляют собой систему параллельных плоскостей. Для точечного заряда эквипотенциальные поверхности представляют собой концентрические окружности.



Связь разности потенциалов и напряженности. Пусть заряд q перемещается в направлении вектора напряженности однородного электрического поля E из точки 1 в точку 2, находящуюся на расстоянии Δd

$$A = qE\Delta d = qE(d_1 - d_2) = q(Ed_1 - Ed_2) = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU$$

$$qE\Delta d = qU \Rightarrow U = E\Delta d$$

Важно! Последняя формула показывает: чем меньше меняется потенциал на расстоянии Δd , тем меньше напряженность электростатического поля. Если потенциал не меняется совсем, то напряженность поля равна нулю. **Напряженность электрического поля направлена в сторону убывания потенциала.**

Из принципа суперпозиции полей следует принцип суперпозиции потенциалов

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots$$

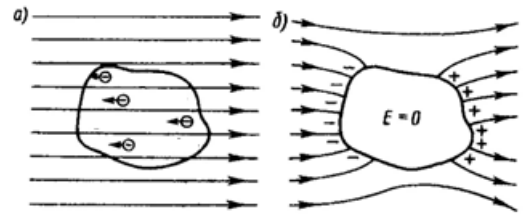
Потенциал результирующего поля равен сумме потенциалов полей отдельных зарядов.

Важно! Потенциалы складываются алгебраически, а напряженности — по правилу сложения векторов.

Проводники в электрическом поле

Проводниками - вещества, в которых может происходить упорядоченное перемещение электрических зарядов, т. е. протекать электрический ток. Проводники: металлы, водные растворы солей, кислот, ионизованные газы. *В проводниках есть свободные электрические заряды.* В металлах носителями заряда являются свободные электроны.

Если металлический проводник поместить в электрическое поле, то под его действием свободные электроны проводника начнут перемещаться в направлении, противоположном направлению напряженности поля (рис. а). В результате на одной поверхности проводника появится избыточный отрицательный заряд, а на противоположной – избыточный положительный заряд (рис. б).



Эти заряды создают внутри проводника внутреннее электрическое поле, вектор напряженности которого направлен противоположно вектору напряженности внешнего поля. Под действием внешнего электростатического поля электроны проводимости в металлическом проводнике перераспределяются так, что напряженность результирующего поля в любой точке внутри проводника равна нулю. Электрические заряды расположены на поверхности проводника.

Важно! Если внутри проводника есть полость, то напряженность в ней будет равна нулю независимо от того, какое поле имеется вне проводника и как заряжен проводник. Внутренняя полость в проводнике экранирована (защищена) от внешних электростатических полей. На этом основана электростатическая защита.

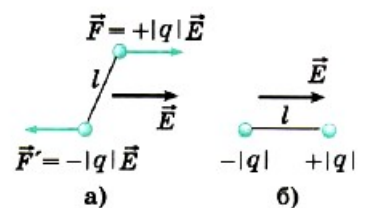
Явление перераспределения зарядов во внешнем электростатическом поле называется **электростатической индукцией**. Заряды, разделенные электростатическим полем, взаимно компенсируют друг друга, если проводник удалить из поля. Если такой проводник разрезать, не вынося из поля, то его части будут иметь заряды разных знаков.

Важно! Во всех точках поверхности проводника вектор напряженности направлен перпендикулярно к его поверхности. Поверхность проводника является эквипотенциальной (потенциалы всех точек поверхности проводника равны).

Диэлектрики в электрическом поле

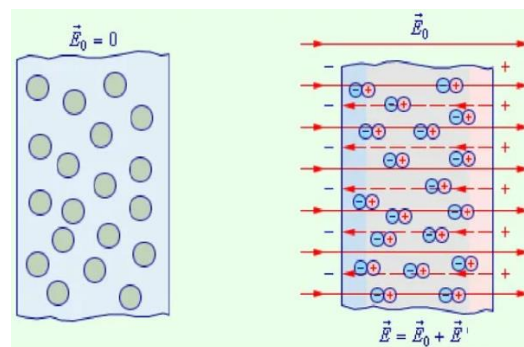
Диэлектриками называют вещества, не проводящие электрический ток. Диэлектрики: стекло, фарфор, резина, дистиллированная вода, газы. *В диэлектриках нет свободных зарядов, все заряды связаны.* В молекуле диэлектрика суммарный отрицательный заряд электронов равен положительному заряду ядра. **Электрическим диполем** называют систему двух равных по модулю, но противоположных по знаку зарядов, находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Различают полярные и неполярные диэлектрики.

Полярные, состоящие из таких молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают. Если такой диэлектрик поместить во внешнее электрическое поле, то направления векторов сил, действующих на положительные и отрицательные заряды, будут противоположными. В результате положительные заряды смещаются в направлении электрического поля, а отрицательные — в противоположную сторону. В результате на поверхности диэлектрика возникает связанный заряд.



Поляризация диэлектрика – процесс смещения в противоположные стороны разноименных связанных зарядов, входящих в состав атомов и молекул вещества в электрическом поле.

Неполярные, состоящие из атомов или молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают. Если такой диэлектрик поместить во внешнее электрическое поле, то молекула деформируется и превращается в диполь. При внесении диэлектрика в электрическое поле происходит его поляризация. На поверхности диэлектрика появятся поверхностные связанные заряды. Связанными эти заряды называют потому, что они не могут свободно перемещаться отдельно друг от друга.



Внутри диэлектрика суммарный заряд равен нулю, а на поверхностях заряды не скомпенсированы и создают внутри диэлектрика поле, вектор напряженности которого направлен противоположно вектору напряженности внешнего поля. Это значит, что внутри диэлектрика напряженность поля уменьшается.

Физическая величина, равная отношению модуля напряженности электрического поля (E_0) в вакууме к модулю напряженности электрического поля в однородном диэлектрике (E), называется **диэлектрической проницаемостью вещества**

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

Если внесенный в электрическое поле диэлектрик разрезать, то его части будут электрически нейтральны.

Электрическая емкость. Конденсатор

Электрическая емкость (электроемкость)– физическая величина, характеризующая способность проводников накапливать электрический заряд. Обозначение – C , единица измерения в СИ – фарад (Ф)

Электроемкость зависит от линейных размеров и геометрической формы проводника. Электроемкость не зависит от материала проводника и его агрегатного состояния. Электроемкость проводника прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости среды, в которой он находится.

Электроёмкостью двух проводников называют отношение заряда одного из проводников к разности потенциалов между ними

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

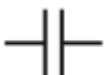
Конденсатор – это система из двух проводников, разделенных слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников. Самый простейший конденсатор представляет собой две металлические пластины, разделенные диэлектриком. Пластины конденсатора называют обкладками. Заряды обкладок конденсатора равны по величине и противоположны по знаку заряда. Силовые линии электрического поля заряженного конденсатора начинаются на положительно заряженной обкладке конденсатора и оканчиваются на отрицательно заряженной. Почти всё электрическое поле сосредоточено внутри конденсатора и однородно.

Для зарядки конденсатора нужно присоединить его обкладки к полюсам источника напряжения, например, к полюсам батареи аккумуляторов. Можно также первую обкладку соединить с полюсом батареи, у которой другой полюс заземлён, а вторую обкладку конденсатора заземлить. Тогда на заземлённой обкладке останется заряд, противоположный по знаку и равный по модулю заряду незаземлённой обкладки. Такой же по модулю заряд уйдёт в землю.

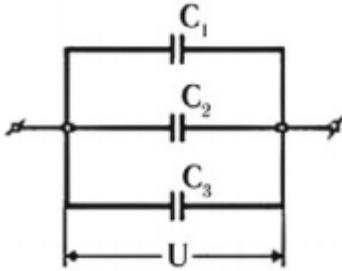
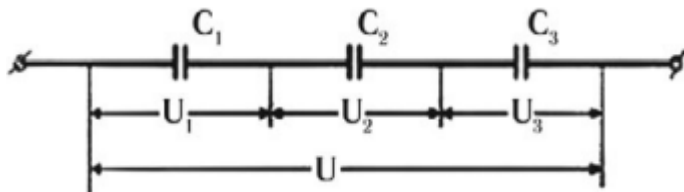
Под зарядом конденсатора понимают абсолютное значение заряда одной из обкладок.

Электроемкость плоского конденсатора зависит от площади пластин и расстояния между ними, а также прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости вещества между пластинами.

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

Обозначение на электрической схеме 

Параллельное и последовательное соединение конденсаторов

	Параллельное соединение	Последовательное соединение
Схема		
Электрический заряд	$q = q_1 + q_2 + q_3$	$q = q_1 = q_2 = q_3$
Разность потенциалов (напряжение)	$U = U_1 = U_2 = U_3$	$U = U_1 + U_2 + U_3$
Общая емкость	$C = C_1 + C_2 + C_3$	$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$

Важно! Если конденсатор подключен к источнику тока, то разность потенциалов между его обкладками не изменяется при изменении электроемкости и равна напряжению источника. Если конденсатор заряжен до некоторой разности потенциалов и отключен от источника тока, то его заряд не изменяется при изменении электроемкости.

Энергия электрического поля конденсатора

Энергия заряженного конденсатора равна работе внешних сил, которую необходимо затратить, чтобы зарядить конденсатор.

Электрическая энергия конденсатора сосредоточена в пространстве между обкладками конденсатора, то есть в электрическом поле, поэтому ее называют **энергией электрического поля**

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