

## 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

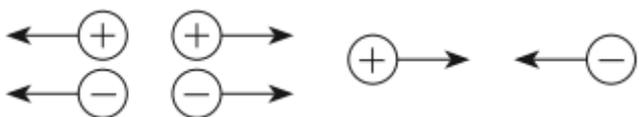
**Электрический заряд** – физическая величина, характеризующая способность тела участвовать в электромагнитных взаимодействиях. Обозначение –  $q$ , единица измерения в СИ – кулон (Кл). Существуют два вида электрических зарядов: положительный и отрицательный. Если тело имеет избыточные (лишние) электроны, 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.

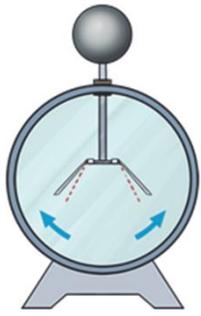
Поскольку заряд тела связан с недостатком или избытком электронов, то любой заряд в природе будет кратен элементарному, т.е.  $q = \pm Ne$ , где  $N$  — число избыточных или недостающих электронов

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



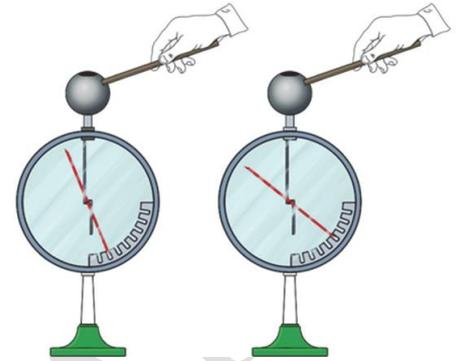
Электрические заряды взаимодействуют: заряды одного знака отталкиваются, заряды противоположных знаков притягиваются

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*

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = const.$$

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.

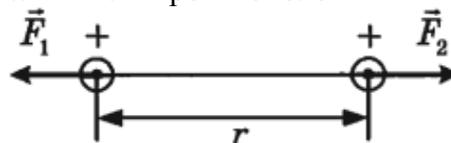
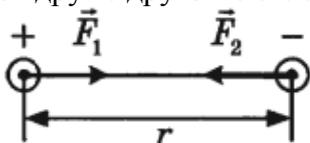
### Закон Кулона

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  $\epsilon$ , 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

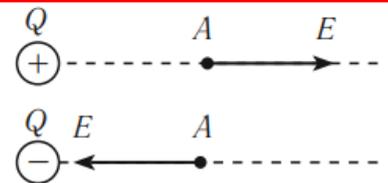
**Напряженность электрического поля ( $E$ )** – физическая величина, равная отношению силы, с которой электрическое поле действует на пробный точечный заряд, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда.

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

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

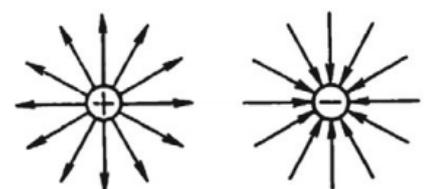
**Важно!** Напряженность электрического поля не зависит от величины пробного заряда, она определяется величиной заряда, создающего поле.

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.

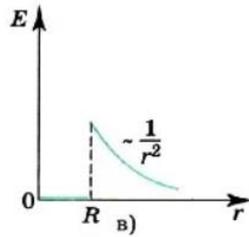
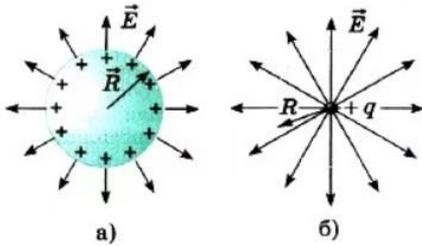


*Линией напряженности* электрического поля называется линия, касательная к которой в любой точке линии направлена вдоль вектора напряженности.

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  $Q$ :  $E = \frac{F}{q} = \frac{k|Q| \cdot q}{r^2} = k \frac{|Q|}{r^2}$

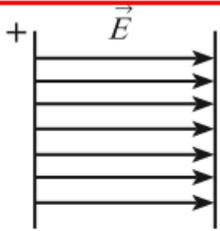


Картина линий электростатического поля заряженного шара (рисунок а) аналогично распределению силовых линий поля точечного заряда  $q$  (рисунок б). Следовательно, на расстоянии  $r \geq R$  от центра шара напряжённость поля определяется той же

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 напряжённости в однородном электрическом поле параллельны друг другу.

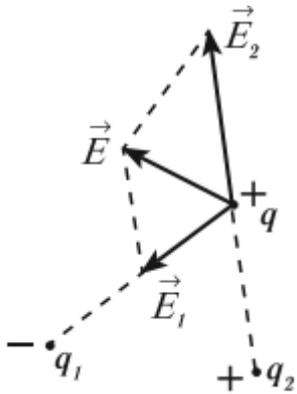
### Принцип суперпозиции электрических полей

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 напряжённостей 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 —  $\varphi$ , 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.

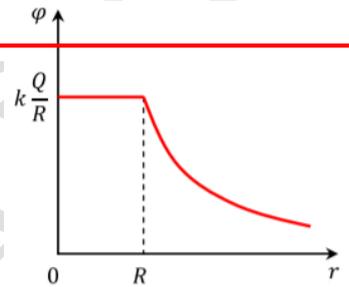
Потенциал однородного электростатического поля в точке, отстоящей на расстоянии  $d$  от неё

$$\varphi = Ed.$$

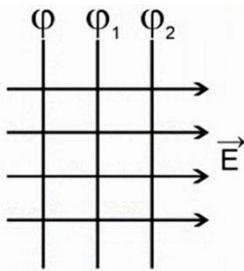
**Важно!** Подобно потенциальной энергии, значение потенциала в данной точке зависит от выбора нулевого уровня для отсчёта потенциала, т. е. от выбора точки, потенциал которой принимается равным нулю.

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.

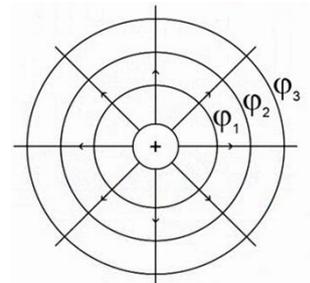


Для наглядного представления электрического поля используют эквипотенциальные поверхности. *Эквипотенциальной поверхностью*, или поверхностью равного потенциала, называется поверхность, во всех точках которой потенциал имеет одинаковое значение.

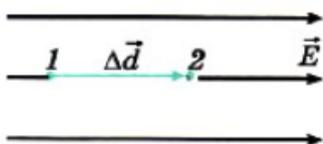
*Свойства эквипотенциальных поверхностей*

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  $\Delta d$



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

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

**Важно!** Последняя формула показывает: чем меньше меняется потенциал на расстоянии  $\Delta d$ , 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

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

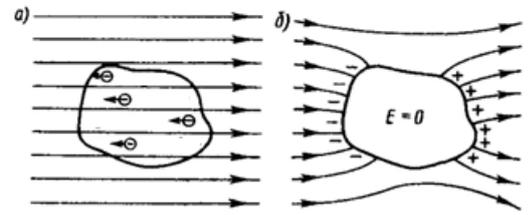
Потенциал результирующего поля равен сумме потенциалов полей отдельных зарядов.

**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.

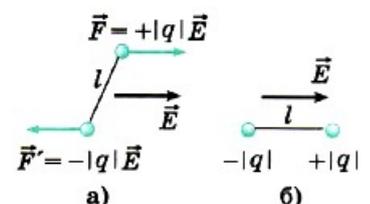
Явление перераспределения зарядов во внешнем электростатическом поле называется **электростатической индукцией**. Заряды, разделенные электростатическим полем, взаимно компенсируют друг друга, если проводник удалить из поля. Если такой проводник разрезать, не вынося из поля, то его части будут иметь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

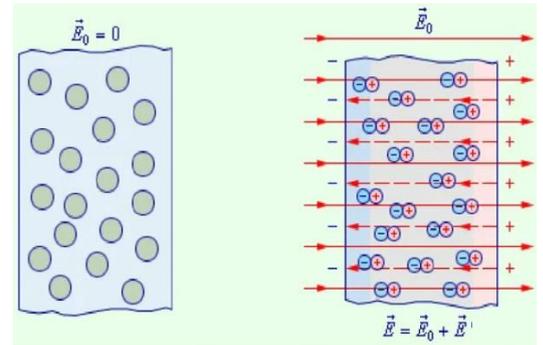
**Диэлектриками** называют вещества, не проводящие электрический ток. Диэлектрики: стекло, фарфор, резина, дистиллированная вода, газы. *В диэлектриках нет свободных зарядов, все заряды связаны.* В молекуле диэлектрика суммарный отрицательный заряд электронов равен положительному заряду ядра. **Электрическим 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**

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

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 – С, 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

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

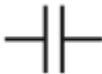
**Конденсатор** – это система из двух проводников, разделенных слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников. Самый простейший конденсатор представляет собой две металлические пластины, разделенные диэлектриком. Пластины конденсатора называют обкладками. Заряды обкладок 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.

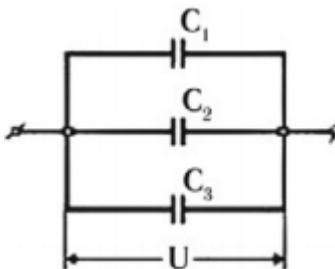
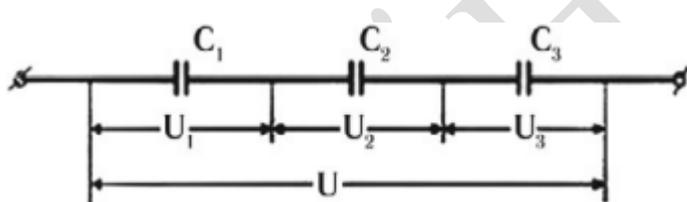
Под зарядом конденсатора понимают абсолютное значение заряда одной из обкладок.

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

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

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 емкости и равна напряжению источника. Если конденсатор заряжен до некоторой разности потенциалов и отключен от источника тока, то его заряд не изменяется при изменении емкости.

### 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

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