

## «ЭЛЕКТРОСТАТИКА».

Электрический заряд ( $q$ ) – фундаментальное неотъемлемое свойство некоторых элементарных частиц (электронов, протонов), проявляющееся в способности к взаимодействию посредством особо организованной материи – электрического поля.

Электрический заряд измеряется в Кулонах  $[q] = \text{Кл}$ .

элементарная частица	обозначение	масса	заряд
электрон	e	$9,11 \cdot 10^{-31}$ кг	$-1,67 \cdot 10^{-19}$ Кл
протон	p	$1,67 \cdot 10^{-27}$ кг	$+1,67 \cdot 10^{-19}$ Кл
нейтрон	n	$1,67 \cdot 10^{-27}$ кг	0

По характеру взаимодействия заряды можно классифицировать на два типа: положительные (протон) и отрицательные (электрон). Два одноименных заряда отталкиваются, два разноименных заряда притягиваются.

Электризация (избыток зарядов одного знака) возможна перераспределением зарядов между телами (электростатическая индукция), или между частями одного и того же тела (электростатическая поляризация).

### **Закон сохранения заряда:**

Алгебраическая сумма зарядов в замкнутой системе неизменна.

$$\sum_{i=1}^n q_i = \text{const} .$$

Точечный заряд – заряженное тело, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием, на котором оценивается его действие на другие тела.

**Закон Кулона:** Сила взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме прямопропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

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

где  $F$  - сила электростатического взаимодействия  $[F] = \text{Н}$ ;  $r$  – расстояние между зарядами  $[r] = \text{м}$ ;  $|q_1|$  и  $|q_2|$  - модули зарядов  $[q] = \text{Кл}$ ;  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$  – электростатическая постоянная.

Силовой характеристикой электрического поля является вектор напряженности. **Напряженностью** ( $\vec{E}$ ) электрического поля в данной точке называется отношение силы, действующей со стороны электрического поля на пробный заряд, внесенный в данную точку поля, к величине пробного заряда.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{\text{пробн}}}$$

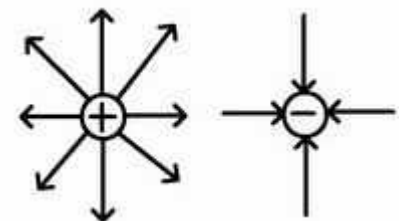
Напряженность измеряется в ньютонах на кулон  $[E] = \text{Н/Кл}$ .

Согласно формуле вектор напряженности поля сонаправлен с вектором силы. Напряженность поля точечного заряда определяется формулой:

$$E = \frac{k \cdot |q|}{r^2},$$

где  $|q|$  - модуль заряда, создающего поле  $[q] = \text{Кл}$ ;  $r$  – расстояние от заряда, создающего поле, до точки поля, в которой определяется напряженность  $[r] = \text{м}$ .

Электрическое поле изображается силовыми линиями, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с вектором напряженности этого поля. Положительный



заряд считается источником поля (вектор напряженности направлен от положительного заряда), отрицательный – стоком (см. рис.)

Густота линий показывает величину модуля напряженности (на рисунке напряженность поля положительного заряда больше чем напряженность поля отрицательного заряда). Поле с напряженностью одинаковой в каждой его точке называется однородным. Для полей, создаваемых несколькими зарядами, справедлив **принцип суперпозиции** полей: Напряженность поля есть геометрическая (векторная) сумма напряженностей полей каждого заряда, создающего поле.

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

Напряженности электрических полей заряженных тел, не являющихся точечными, не всегда могут быть представлены в виде элементарных функций, знакомых учащимся. Например, поле заряженного шара задается так:

$$E = \begin{cases} \frac{kq}{r^2}, r \geq R \\ 0, r < R \end{cases},$$

где  $R$  - радиус шара, т.е. внутри шара поле отсутствует, а, начиная с поверхности, напряженность поля шара рассчитывается так же, как и напряженность поля точечного заряда.

По способности проводить электрические заряды все вещества можно классифицировать на три типа: проводники, полупроводники, диэлектрики (изоляторы).

Напряженность собственного поля проводника равна нулю. Под действием внешнего поля носители заряда, имеющиеся внутри проводника, перемещаются по нему, согласно направлению внешнего поля.

Диэлектрики практически не проводят электрические заряды. Молекула диэлектрика образует собственное поле, и во внешнем

поле ориентируется против него (поляризация), таким образом электрическое поле внутри диэлектрика ослабляется. Отношение напряженности поля в вакууме к напряженности этого же поля в диэлектрике называется диэлектрической проницаемостью среды (вещества):

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{вак.}}}{E_{\text{вещ.}}}.$$

Диэлектрическая проницаемость среды величина безразмерная, определяется экспериментально. Существуют справочные таблицы диэлектрических проницаемостей различных сред.

Для вычисления напряженностей и электростатических сил в средах используются уже известные формулы электростатики, в знаменателях которых дописывается множитель  $\varepsilon$ . Например, формула напряженности поля точечного заряда в веществе с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  выглядит так:

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

При перемещении заряда под действием электростатического поля совершается **работа**.

$$A = Fs = qE(d_1 - d_2) \text{ (см. рис.)}$$

Величина  $qEd = W_p$  - потенциальная энергия

электростатического поля. Работа электростатического поля равна убыли его потенциальной энергии.  $A_{\text{поля}} = -\Delta W_p = -(W_{p2} - W_{p1})$ .

Поля, в которых работа не зависит от формы траектории и определяется положением начальной и конечной точек траектории, называются потенциальными. Работа потенциального поля по замкнутой траектории равна нулю. Потенциальными являются



электростатическое поле и гравитационное поле.

Отношение потенциальной энергии поля в некоторой точке к величине пробного заряда, помещенного в эту точку, называется **потенциалом** поля в данной точке:

$$\varphi = \frac{W_p}{q_{\text{пробн}}}.$$

Потенциал является скалярной величиной, единица измерения потенциала – вольт  $[\varphi] = \text{В}$ . И потенциальная энергия, и потенциал могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. Разность потенциалов называется **напряжением** ( $U$ ):

$$U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Напряжение измеряется в вольтах. Между напряжением и напряженностью есть зависимость:

$$U = E \cdot \Delta d,$$

где  $\Delta d$  – расстояние, на котором вблизи исследуемой точки на силовой линии поля наблюдается разность потенциалов  $U$ . Следует, что напряженность может измеряться в вольтах на метр  $[E] = \text{В/м}$ . Напряженность показывает направление убыли потенциала поля. Поле можно изображать с помощью эквипотенциальных поверхностей (поверхностей равного потенциала).

### *ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ «ЭЛЕКТРОСТИКА»*

**Пример №1.** Вблизи заряженной плоскости с поверхностной плотностью заряда  $0,2 \text{ мкКл/м}^2$  в вакууме находится маленький шарик с зарядом  $3 \text{ нКл}$ . Найти силу взаимодействия между шариком и плоскостью. (Ответ:  $34 \text{ мкН}$ .)

Дано:

Решение:

$\sigma = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2$  $q = 3 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$	Напряженность поля плоскости: $E = 2\pi k \sigma$ .  Определение напряженности $E = \frac{F}{q}$ . Таким образом: $F = 2 \cdot \pi \cdot k \cdot \sigma \cdot q$ .
Найти:  $F = ?$	$F = 2 \cdot 3,14 \cdot 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Кл}^2}{\text{м}^2} \times 3 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} = 34 \cdot 10^{-6} \text{ Н}.$

**Пример №2.** Шарик массой 0,1 г с зарядом 10 нКл перемещается под действием электрического поля из точки А в точку В, при этом скорость шарика возрастает с 1,7 м/с до 2 м/с. Считая потенциал электростатического поля в точке В равным 0 В, найти потенциал в точке А. (Ответ: 555 В.)

Дано:	Решение:
$q = 10^{-8} \text{ Кл}$  $m = 0,1 \text{ г} = 10^{-4} \text{ кг}$  $v_A = 1,7 \text{ м/с}$  $v_B = 2 \text{ м/с}$  $\varphi_B = 0 \text{ В}$	Закон сохранения энергии:  $W_{\text{кин.А}} + W_{\text{пот.А}} = W_{\text{кин.В}} + W_{\text{пот.В}}$  Кинетическая энергия движения определяется по формуле: $W_{\text{кин.}} = \frac{m \cdot v^2}{2}$ .  Потенциальная энергия поля вычисляется из определения потенциала: $W_{\text{пот.}} = q \cdot \varphi$ .
Найти:  $\varphi_A = ?$	Таким образом: $\frac{m \cdot v_A^2}{2} + q \cdot \varphi_A = \frac{m \cdot v_B^2}{2} + q \cdot \varphi_B$ .  Выразим потенциал: $\varphi_A = \frac{m \cdot (v_B^2 - v_A^2)}{2 \cdot q} + \varphi_B$ .

$$\varphi_A = \frac{10^{-4} \text{ Кл} \cdot \left( (2 \text{ м/с})^2 - (1,7 \text{ м/с})^2 \right)}{2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}} + 0 \text{ В} = 555 \text{ В}$$

**Пример №3.** Два одинаковых плоских конденсатора соединены параллельно и заряжены до напряжения 240 В. После отключения от источника тока расстояние между пластинами одного из конденсаторов уменьшили в 3 раза. Каким стало напряжение на конденсаторах? (Ответ: 120 В).

Дано:

$$U_A = 240 \text{ В}$$

$$d_{1A} = 3 \cdot d_{1B}$$

Найти:

$$U_B = ?$$

Решение:

Момент времени (А) до изменения ширины зазора:

$$\text{Емкость первого конденсатора: } C_1 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d_1} = c$$

.

Емкость второго конденсатора:

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d_1} = c .$$

Емкость батареи из двух параллельно соединенных конденсаторов:

$$C = C_1 + C_2 = c + c = 2c .$$

По определению  $C = \frac{q}{U}$  тогда  $q = 2cU_A$

Момент времени (В) после изменения ширины зазора:

Емкость первого конденсатора:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d_1/3} = 3c .$$

Емкость второго конденсатора:

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d_1} = c.$$

Емкость батареи из двух параллельно соединенных конденсаторов:

$$C = C_1 + C_2 = 3c + c = 4c.$$

По определению  $C = \frac{q}{U}$  тогда  $q = 4cU_B$

В силу закона сохранения заряда

$$q = 4cU_B = q = 2cU_A, \text{ откуда } U_B = \frac{U_A}{2} = 120\text{В}.$$

## ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

### «ЭЛЕКТРОСТАТИКА»

#### "Электрические взаимодействия."

1. Два точечных электрических заряда  $-2,67$  нКл и  $0,67$  нКл находятся в вакууме на расстоянии  $4$  см друг от друга. Их приводят в соприкосновение и удаляют на прежнее расстояние. Найдите величину и характер силы их электрического взаимодействия до и после соприкосновения.

2. Два закрепленных точечных заряда  $1$  нКл и  $4$  нКл находятся на расстоянии  $12$  см друг от друга. Где нужно поместить третий точечный заряд, чтобы он находился в равновесии? Будет ли равновесие устойчивым? (Устойчивым считается равновесие тела в том случае, если оно, будучи выведено малой силой из положения равновесия, в него вернется.)

#### "Напряженность."



3. На каком расстоянии от точечного заряда 1 нКл напряженность его поля будет равна 300 Н/Кл ?
4. С какой силой действует электрическое поле Земли, напряженность которого 100 Н/Кл, на тело, несущее заряд 1 мкКл?
5. Металлическая тонкая сфера радиусом 4 см несет заряд 1 мкКл, равномерно распределенный по ее поверхности. Найдите поверхностную плотность заряда и напряженность поля сферы в точках, удаленных на 3 см и на 5 см от ее центра.
6. Бесконечная пластина равномерно заряжена с поверхностной плотностью заряда 2 мкКл/м<sup>2</sup>. С какой силой пластина действует на точечный заряд -3 мКл, находящийся вблизи пластины.

*"Вещество в электрическом поле."*

7. Точечный заряд 9 нКл находится в стекле (проницаемость 7). На каком расстоянии от заряда напряженность его поля равна 1 кН/Кл?
8. Два одинаковых одноименно заряженных шарика, подвешенных в одной точке на нитях равной длины, опускают в керосин (плотность 0,8 г/см<sup>3</sup>, проницаемость 2,1). При этом угол расхождения нитей не изменяется. Найти плотность материала шариков.
9. Точечные заряды 1 мкКл и 0,1 мкКл взаимодействуют в вакууме с силой 0,36 Н. Затем заряды помещают в керосин (проницаемость 2), так, что сила взаимодействия не изменяется. На сколько изменилось расстояние между зарядами?

*"Потенциал."*

10. В воздушном слое между горизонтальными проводящими пластинами висит пылинка массой 0,01 мкг. Расстояние между пластинами 5 см, напряжение 5 кВ. Найти заряд пылинки.
11. Внутри тонкой проводящей сферы радиусом 20 см находится

проводящий шар радиусом 10 см; центры шара и сферы совпадают. Через маленькое отверстие в сфере проходит длинный провод, которым шар заземлен. На сферу помещают заряд 20 нКл. Найдите потенциал точек поверхности сферы.

**12.** Работа электрического поля по переносу заряда 200 нКл из бесконечно удаленной точки в некоторую точку поля равна 800 мкДж. Найти потенциал в указанной точке поля. Потенциал в бесконечно удаленной точке принять равным нулю.

**13.** Разность потенциалов между двумя точками, находящимися на расстоянии 3 см друг от друга и лежащими на одной силовой линии однородного электрического поля, равна 12 В. Определить разность потенциалов между точками, лежащими на той же силовой линии на расстоянии 15 см друг от друга.

**14.** 729 одинаковых капель ртути с поверхностной плотностью заряда  $16 \text{ мкКл/м}^2$  каждая сливаются в одну большую каплю. Определить плотность заряда на поверхности большой капли и напряженность на расстоянии от поверхности капли, равном ее радиусу. Считать, что капли имеют форму шара и находятся в воздухе.

*"Электроемкость. Конденсаторы."*

**15.** Какова толщина слюды между пластинами плоского конденсатора емкостью 500 пФ, если площадь каждой из двух пластин  $10 \text{ см}^2$ ?

**16.** Какое количество теплоты выделится в проводнике, которым замкнуты обкладки конденсатора емкостью 100 мкФ, заряженного до разности потенциалов 1,2 кВ?

**17.** Конденсатор емкостью 2 мкФ заряжают до разности потенциалов 110 В. Затем, отключив от сети, его присоединяют к незаряженному конденсатору неизвестной емкости, который при этом заряжается

до напряжения 44 В. Определить неизвестную емкость.

**18.** Найти энергию электрического поля конденсатора емкостью 10 мкФ, заряженного до напряжения 10 В.

**19.** В пространство между обкладками незаряженного плоского конденсатора вносят металлическую пластину, имеющую заряд 5 нКл, так, что между пластиной и обкладками остаются зазоры шириной 10 мм и 3 мм. Площади обкладок и пластины одинаковы и равны 150 см<sup>2</sup>. Найти разность потенциалов между обкладками конденсатора.

**20.** Два одинаковых плоских воздушных конденсатора соединены последовательно и подключены к источнику тока. Когда один из конденсаторов опустили в жидкий диэлектрик, то заряд системы конденсаторов увеличился в 1,5 раза. Определить диэлектрическую проницаемость диэлектрика.