

# *Электродинамика*



*Электродинамика* –  
это наука о свойствах и закономерностях  
особого вида материи –  
электромагнитного поля,  
которое осуществляет взаимодействие  
между электрическими заряженными  
телами или частицами.

**Классическая электродинамика**  
не затрагивает квантовых эффектов при  
изучении электромагнитного поля.

Обычно когда говорят  
«Электродинамика», имеют в виду  
именно классическую электродинамику.

Когда речь идёт о современной  
квантовой теории электромагнитного  
поля, обычно используется  
термин **квантовая электродинамика.**

# Содержание

## Электростатика

1. Электрический заряд. Электризация
2. Закон Кулона
3. Электрическое поле
4. Напряженность электрического поля
5. Проводники и диэлектрики
6. Работа и мощность электростатического поля
7. Потенциал электростатического поля
8. Эквипотенциальные поверхности
9. Пробой диэлектрика
10. Емкость. Конденсатор

## Тестовые задания

## Табличные данные

Диэлектрическая проницаемость вещества

## Литература

# *Электростатика*

**К содержанию**

## *Электростатика* –

это раздел электродинамики,  
в котором изучаются свойства  
и взаимодействия неподвижных тел  
или частиц, обладающих электрическим  
зарядом (неподвижных в какой-либо  
инерционной системе отсчёта),  
то есть законы электростатики.

*Электрический  
заряд.*

*Электризация*

[К содержанию](#)

*Электрический заряд* –  
это физическая величина,  
которая определяет интенсивность  
электромагнитных взаимодействий.

*Электромагнитные взаимодействия* –  
это взаимодействия между заряженными  
частицами или телами.



*Элементарные частицы* –  
материальные объекты, которые нельзя  
разделить на составные части.

В соответствии с этим определением  
к элементарным частицам **не могут** быть  
отнесены молекулы, атомы и атомные  
ядра, которые поддаются делению  
на составные части:  
атом делится на ядро и орбитальные  
электроны, а ядро – на нуклоны.

# Электрические заряды

Положительные

Отрицательные

*Частицы:*

протон  $P^+$

позитрон  $e^+$

*Частицы:*

электрон  $e^-$

антипротон  $\bar{P}$

Стабильными носителями  
отрицательного заряда являются  
**электрон и антипротон.**

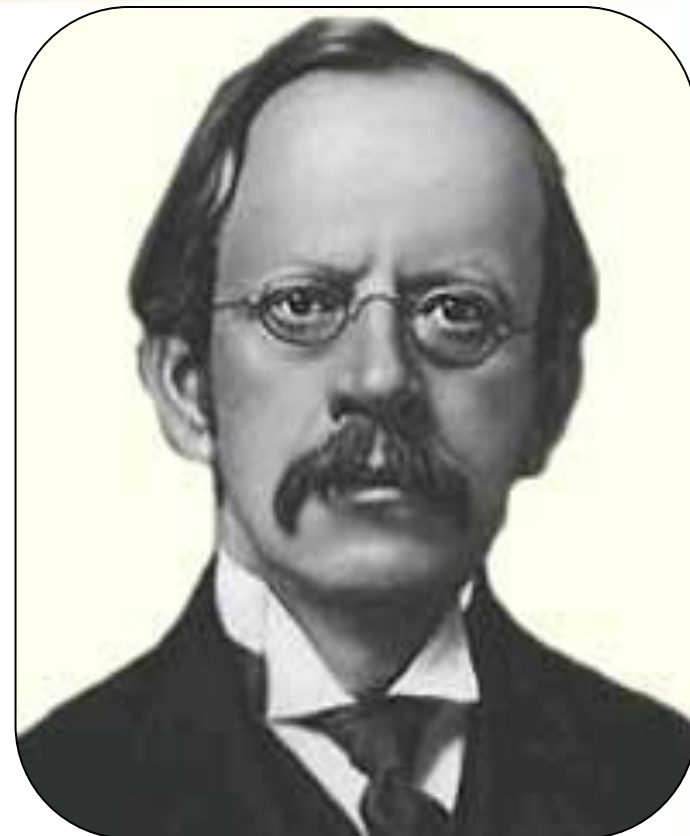
## *Электрон*

(др.-гр. *electron* – янтарь) –  
стабильная отрицательно заряженная  
элементарная частица.

Был открыт в 1897 г. английским  
физиком Джозефом Джоном Томсоном.

**Джозеф Джон  
Томсон**

(18.12.1856 – 30.08.1940)



Выдающийся английский физик,  
основатель научной школы.

Изучал явление прохождения электрического тока при малых напряжениях сквозь газ, облучаемый рентгеновским излучением.

Исследовал «катодные лучи», в результате которого было показано, что они имеют корпускулярную природу и состоят из отрицательно заряженных частиц субатомного размера.

Исследовал «анодные лучи», что привело к открытию стабильных изотопов на примере изотопов неона:  $^{20}\text{Ne}$  и  $^{22}\text{Ne}$  (1913), и послужило толчком к развитию масс-спектрометрии.

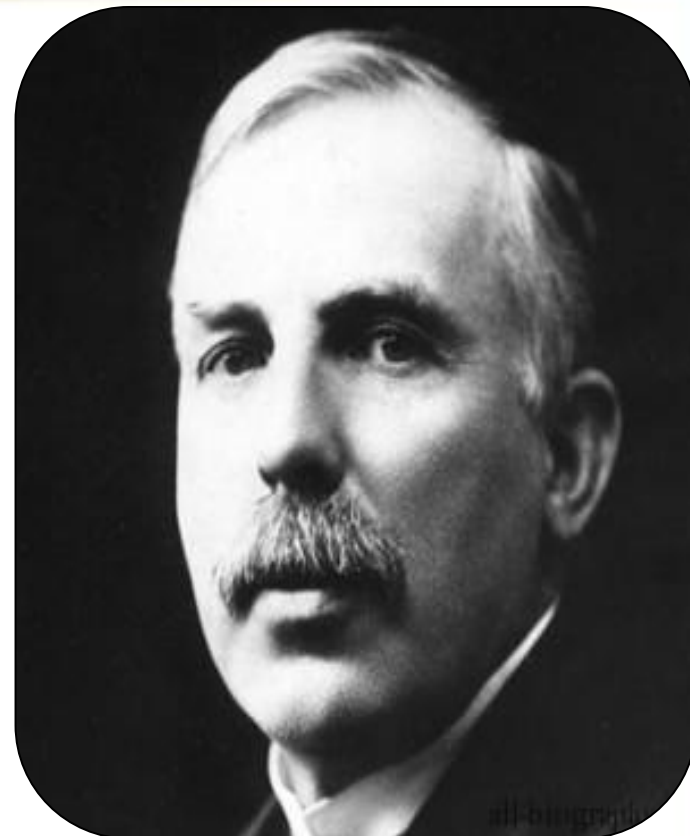
## *Протон*

(др.-греч. *protos* – первый, основной) –  
стабильная элементарная частица,  
входящая в состав всех ядер  
атомов хим. элементов.

Был открыт в 1913 г. британским  
физиком Эрнестом Резерфордом.

# Эрнест Резерфорд

(30.08.1871 – 19.10.1937)



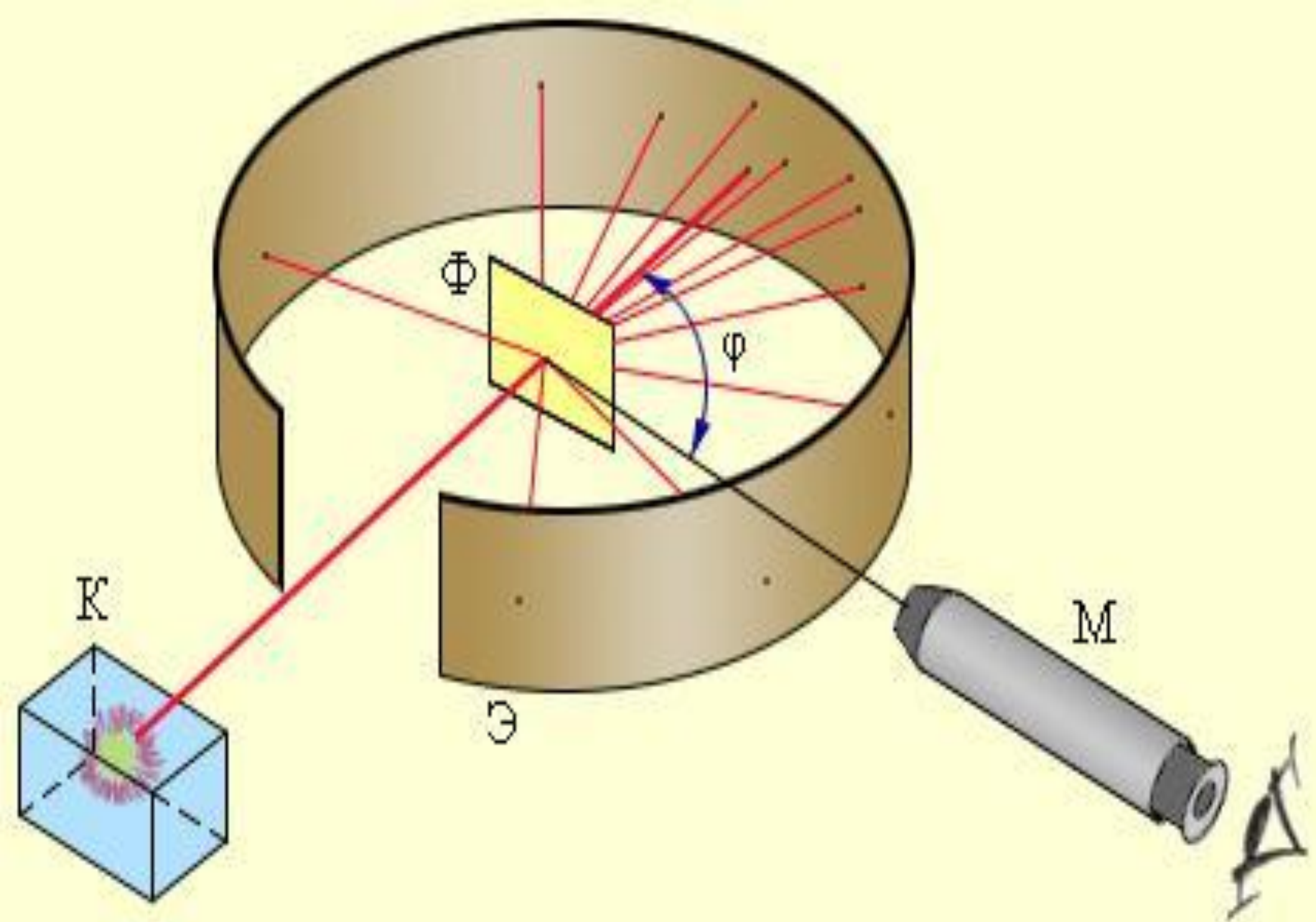
Великий английский физик, рождённый в Новой Зеландии, заложивший основы современного учения о радиоактивности и строении атома.

В 1911 г. своим знаменитым опытом рассеяния альфа-частиц доказал существование в атомах положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов вокруг него.

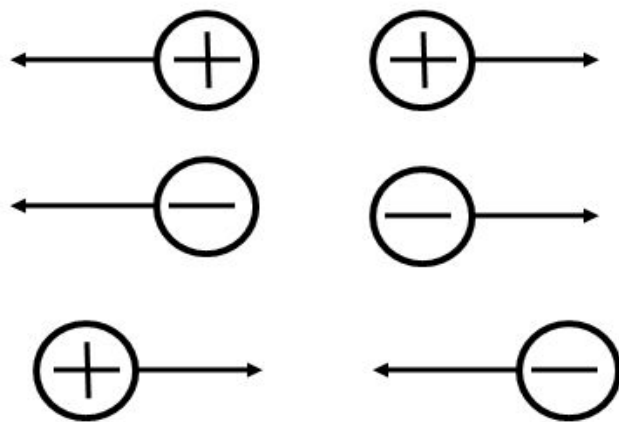
На основе результатов опыта создал планетарную модель атома.

Открыл эманацию тория и искусственную трансмутацию элементов.





Частицы отталкиваются при зарядах  
**одинаковых знаков**  
(одноимённые заряды),  
а при **разных знаках**  
(разноимённые заряды)  
частицы притягиваются.



*Нейтральная частица* –  
элементарная частица,  
не имеющая электрического заряда.

Электрически незаряженные частицы,  
то есть нейтральные:

нейтрон  $n^0$

нейтрино  $\nu$

# Нейтрон

(лат. *neuter* – ни тот, ни другой) – тяжёлая элементарная частица, не имеющая электрического заряда.

Был открыт в 1932 г. английским ученым Джеймсом Чедвиком.

**Джеймс Чедвик**  
(20.10.1891 – 24.07.1974)



Английский физик, известный за открытие нейтрона и фотоядерной реакции. Ученик Э. Резерфорда.

В 1914 г. в одной из ранних работ он показал непрерывность спектра бета-излучения.

В 1920 г., исследуя рассеяние альфа-частиц на ядрах платины, серебра и меди, измерил заряды этих ядер и подтвердил равенство их порядковому номеру элемента в Периодической системе Д.И. Менделеева.

В 1934-35 гг. совместно с М. Гольдхабером поставил опыты по фотодиссоциации дейтрона на нейтрон и протон под действием гамма-квантов.

*Элементарный заряд* –  
это минимальный заряд,  
которым обладают все заряженные  
элементарные частицы.

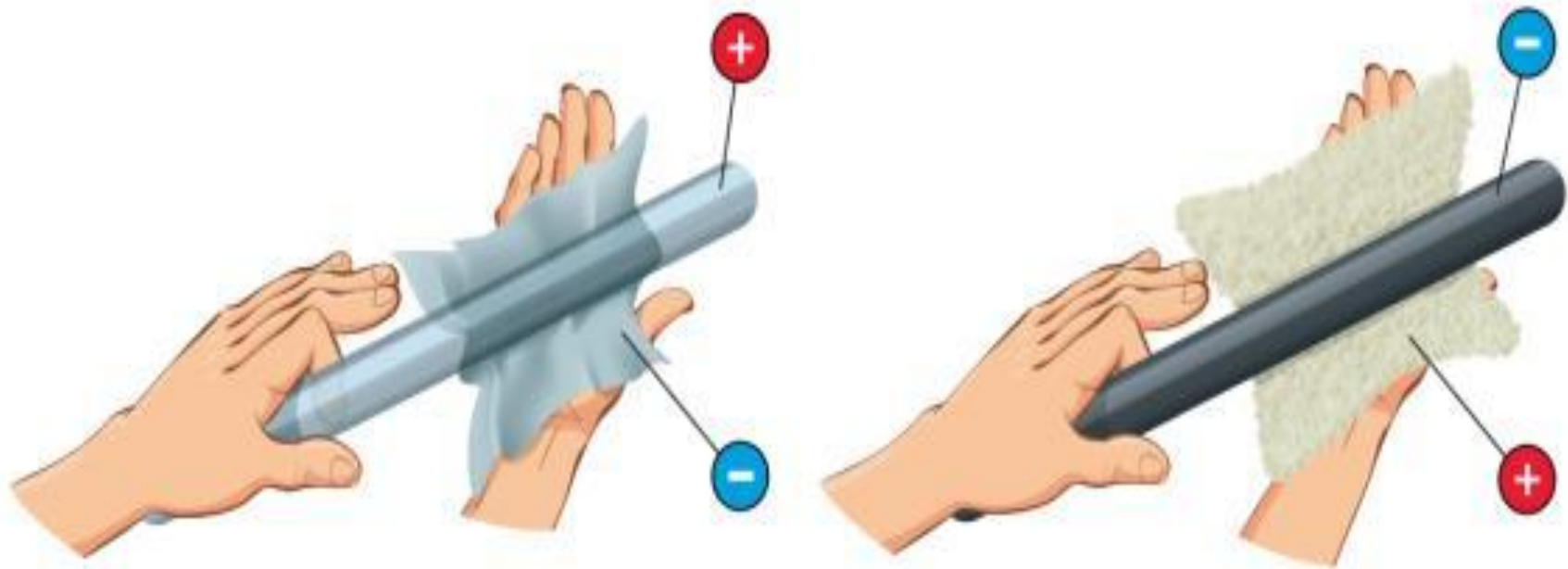
Электрический заряд протона равен по  
абсолютной величине заряду электрона:

$$e = 1,6021892(46) \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

<b>Частица</b>	<b>Заряд, Кл</b>	<b>Заряд</b>
электрон	$1,6 * 10^{-19}$	-1
протон	$1,6 * 10^{-19}$	+1
нейтрон	0	0

<b>Частица</b>	<b>Масса, кг</b>	<b>Масса, а.е.м.</b>
электрон	$9,1 * 10^{-31}$	0,000549
протон	$1,673 * 10^{-27}$	1,00728
нейтрон	$1,675 * 10^{-27}$	1,00867





**Положительный заряд образуется на стекле, потёртом о шёлк.**  
**Отрицательный заряд образуется на эбоните, потёртом о шерсть (мех).**

## **Способы электризации тел**

**Электризация тел при соприкосновении.**

В этом случае при тесном контакте небольшая часть электронов переходит с одного вещества, у которого связь с электроном относительно слаба, на другое вещество.

**Электризация тел при трении.**

При этом увеличивается площадь соприкосновения тел, что приводит к усилению электризации.

# **Способы электризации тел**

## **Влияние.**

В основе влияния лежит явление электростатической индукции в веществе, помещённом в постоянное электрическое поле.

## **Электризация тел под действием света.**

В основе этого лежит фотоэффект, когда под действием света из проводника могут вылетать электроны в окружающее пространство, в результате чего проводник заряжается.

При электризации на телах  
возникают электрические заряды,  
равные по модулю и противоположные  
по знаку.

**Отрицательный заряд** тела обусловлен  
избытком электронов на теле  
по сравнению с протонами,  
**а положительный заряд** обусловлен  
недостатком электронов.

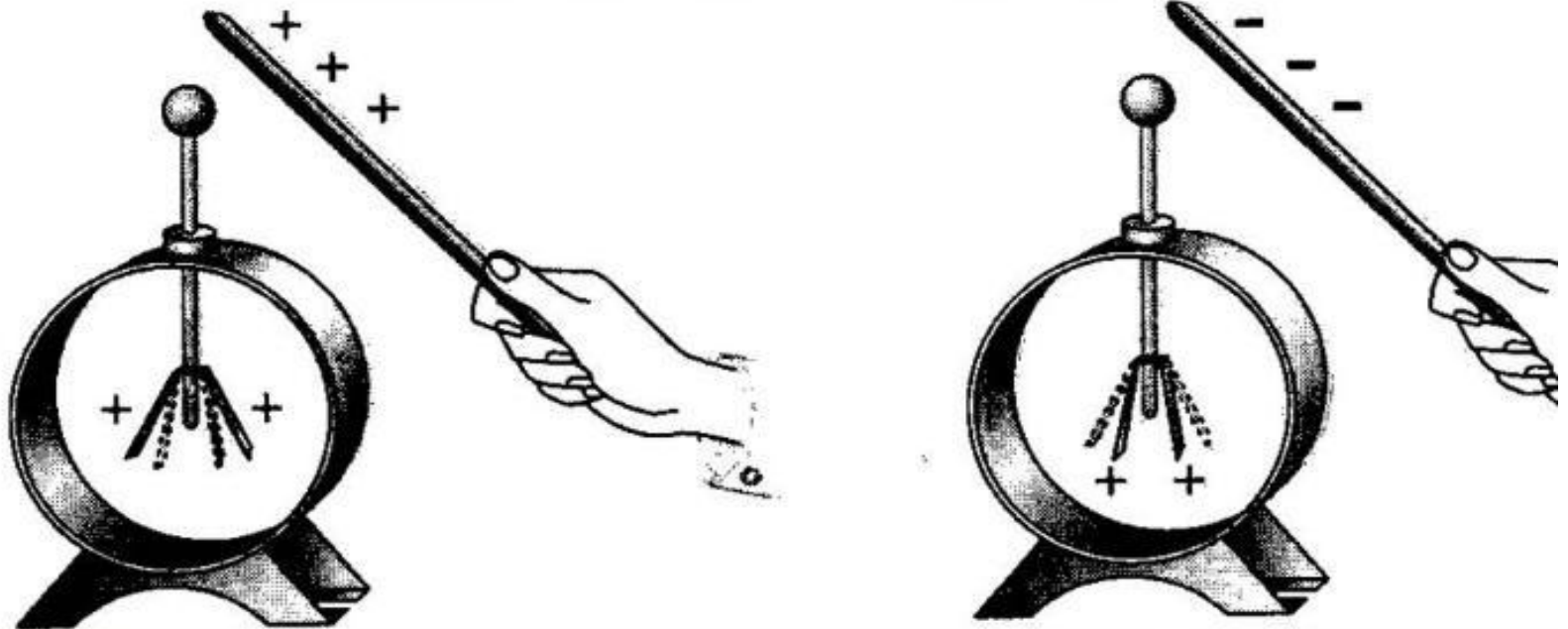
# **Закон сохранения электрического заряда:**

в изолированной системе  
алгебраическая сумма зарядов всех тел  
остается постоянной:

$$q_1 + q_2 + \dots q_n = \textit{const}$$

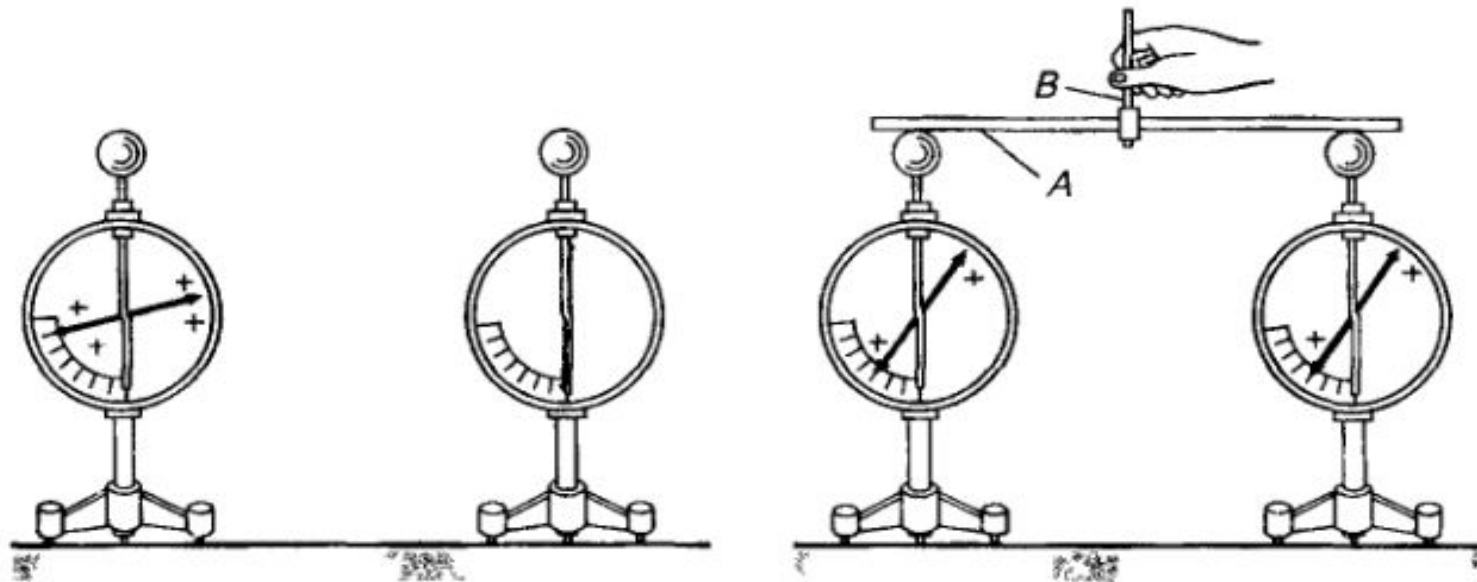
# Электроскоп

(*электрический*, гр. *skoreo* – наблюдать, обнаруживать) – прибор для обнаружения электрических зарядов.



# Электрометр

(*электрический*, гр. *metron* - мера) – электрический прибор для измерения разностей электрических потенциалов небольших электрических зарядов и слабых токов.



# *Образцы заданий* *ЕГЭ*

**К содержанию**



**A1.** Два точечных заряда притягиваются друг к другу только в если заряды

1) одинаковы по знаку и любые по модулю

2) одинаковы по знаку и обязательно одинаковы по модулю

3) различны по знаку и любые по модулю

4) различны по знаку, но обязательно одинаковы по модулю

**A2.** На тонких шёлковых нитях подвешены два заряженных одинаковых.



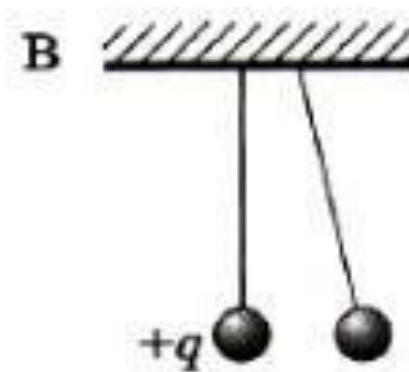
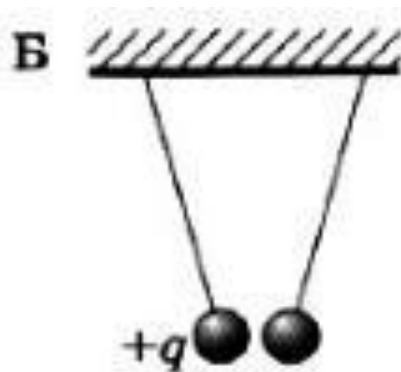
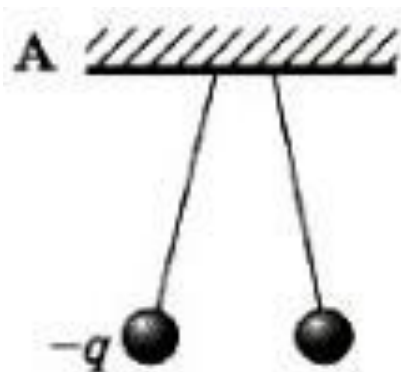
Какое из утверждений верно?

- 1) Заряды шариков обязательно равны по модулю
- 2) Силы, действующие на каждый из шариков, различны
- 3) Заряды шариков имеют одинаковый знак
- ④ Заряды шариков имеют разные знаки

**А3.** На рисунке изображены три пары заряженных лёгких одинаковых шариков, подвешенных на шёлковых нитях.

В каком случае заряд другого шарика может быть отрицателен?

- ① А    2) А и Б    3) В    4) А и В



**A4.** На двух одинаковых металлических шарах находятся положительный заряд  $+Q$  и отрицательный заряд  $-5Q$ . При соприкосновении шаров заряд на каждом шаре станет равен

- 1)  $-4Q$     2)  $+6Q$     3)  $-2Q$     4)  $+3Q$

$$Q_1 + Q_2 = \text{const}$$

$$+Q - 5Q = -4Q$$

$$\text{при соприкосновении: } Q = \frac{-4Q}{2} = -2Q$$

# ***Закон Кулона***

**К содержанию**

*Точечный заряд* –  
заряд, размерами носителя которого  
по сравнению с расстоянием,  
на котором рассматривается  
электростатическое взаимодействие,  
можно пренебречь.

## Закон Кулона:

сила взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме

прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\varepsilon \cdot r^2} = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\varepsilon \cdot r^2}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{Н \cdot м^2}{Кл^2}$$

коэффициент  
пропорциональности

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{Кл^2}{Н \cdot м^2}$$

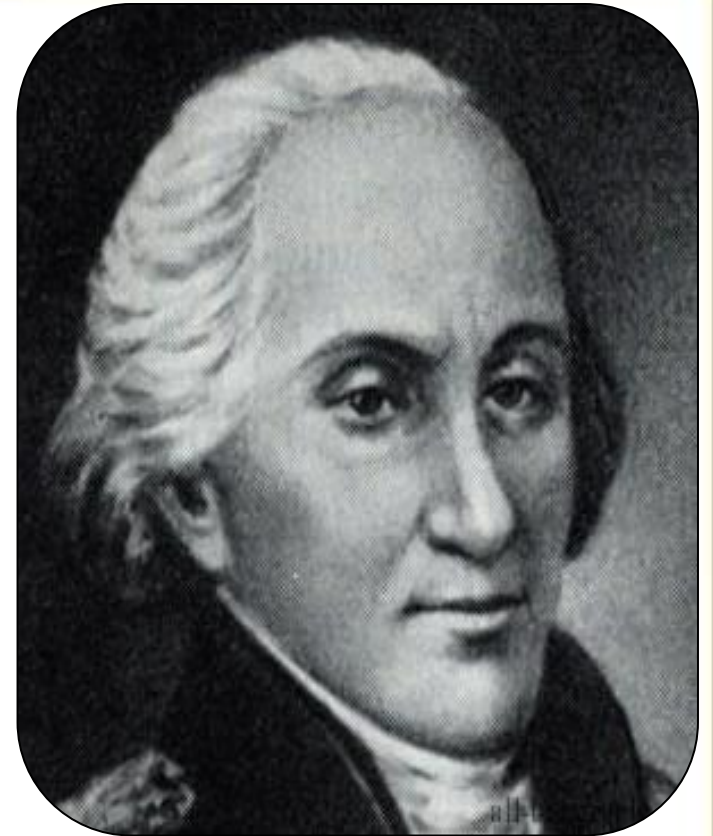
электрическая  
постоянная

$\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды, показывающая, во сколько раз сила взаимодействия зарядов в среде меньше, чем в вакууме, в вакууме равна 1.



# **Шарль Огюстен де Кулон**

(14.06.1736 – 23.08.1806)

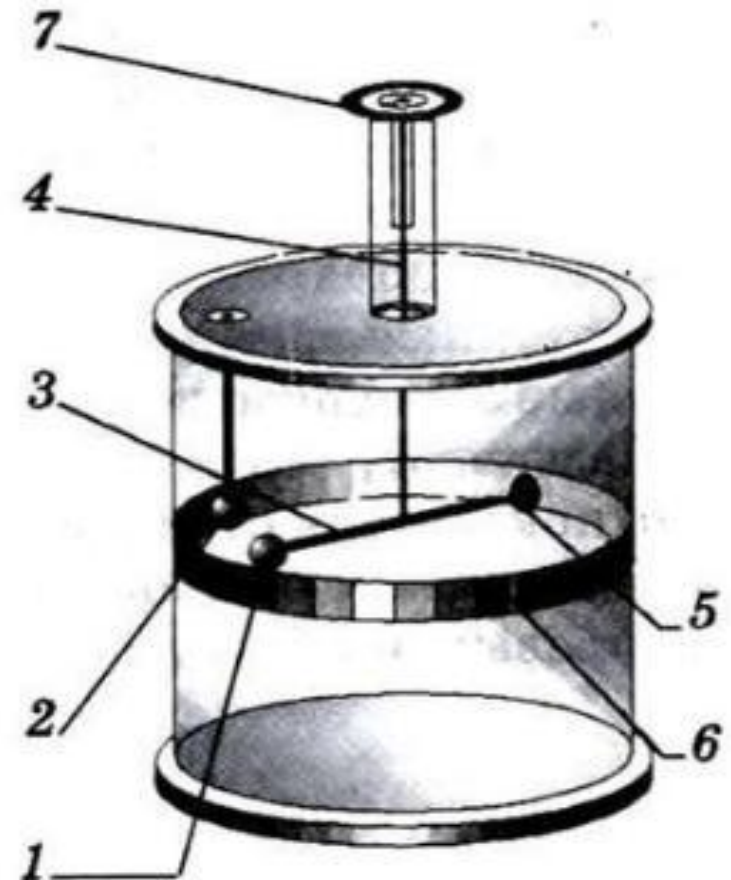


**Французский военный инженер и  
учёный-физик, исследователь  
электромагнитных  
и механических явлений.**

Кулон сформулировал законы кручения; изобрёл крутильные весы, которые сам же применил для измерения электрических и магнитных сил взаимодействия.

### *Крутильные весы:*

1. Незаряженная сфера
2. Неподвижная заряженная сфера
3. Легкий изолирующий стержень
4. Упругая нить
5. Бумажный диск
6. Шкала



Опубликовал статью, ставшую основанием теории Мора-Кулона, описывающей зависимость касательных напряжений материала от величины приложенных нормальных напряжений.

Описал опыты по трению скольжения и качения и сформулировал законы сухого трения.

Сформулировал закон взаимодействия электрических зарядов и магнитных полюсов, а также закономерность распределения электрических зарядов на поверхности проводника.

Ввёл понятия магнитного момента и поляризации зарядов.

***Один кулон (1 Кл) –***  
это заряд, проходящий за 1 с через  
поперечное сечение проводника при силе  
тока 1 А:

$$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с.}$$

$q = Ne$  формула для нахождения  
заряда любого тела

$N$  – целое число

$e$  – элементарный заряд

*Кулоновская сила* –  
сила взаимодействия двух точечных  
зарядов.

Она направлена вдоль прямой,  
соединяющей тела,  
т.е. является центральной.

Может быть как силой притяжения,  
так и силой отталкивания.

Положительной считают силу  
отталкивания!

# *Образцы заданий* *ЕГЭ*

**К содержанию**

**A1.** Какая из приведённых ниже формул выражает в СИ модуль силы взаимодействия точечных зарядов  $-q_1$  и  $+q_2$ , расположенных на расстоянии  $r$  друг от друга в вакууме? Определите, электрические заряды притягиваются или отталкиваются.

- 1)  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}$ , притягиваются      3)  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$ , притягиваются
- 2)  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}$ , отталкиваются      4)  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$ , отталкиваются

**A2.** Сила кулоновского взаимодействия двух точечных зарядов

1) прямо пропорциональна расстоянию между ними

2) обратно пропорциональна расстоянию между ними

3) прямо пропорциональна квадрату расстояния между ними

④ обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними



**А3.** С какой силой взаимодействуют два маленьких заряженных шарика, находящиеся в вакууме на расстоянии 9 см друг от друга? Заряд каждого шарика равен  $3 \cdot 10^{-6}$  Кл.

- 1) 0.09 Н      ③) 10 Н  
2) 1 Н          4)  $3.3 \cdot 10^6$  Н

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \frac{(3 \cdot 10^{-6} \text{ Кл})^2}{(0.9 \text{ м})^2} = 10 \text{ Н}$$

**A4.** Два точечных заряда действуют друг на друга с силой 12 Н. Какой будет сила взаимодействия между ними, если уменьшить значение каждого заряда в 2 раза, не меняя расстояние между ними?

- ①) 3 Н    2) 6 Н    3) 24 Н    4) 48 Н

$$F_1 = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} = k \frac{q^2}{r^2} = 12 \text{ Н}, \quad F_2 = k \frac{\left| \frac{q_1}{2} \right| \cdot \left| \frac{q_2}{2} \right|}{r^2} = k \frac{q^2}{4r^2}$$

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{kq^2}{4r^2} \cdot \frac{r^2}{kq^2} = \frac{1}{4} \Rightarrow F_2 = \frac{F_1}{4} = \frac{12 \text{ Н}}{4} = 3 \text{ Н}$$

**A5.** Два точечных электрических заряда действуют друг на друга с силами 9 мкН. Какими станут силы взаимодействия между ними, если, не меняя расстояние между зарядами, увеличить модуль каждого из них в 3 раза?

- 1) 1 мкН   2) 3 мкН   3) 27 мкН   **4) 81 мкН**

$$F_1 = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} = k \frac{q^2}{r^2} = 9 \text{ мкН}, \quad F_2 = k \frac{|3q_1| \cdot |3q_2|}{r^2} = k \frac{9q^2}{r^2}$$

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{9kq^2}{r^2} \cdot \frac{r^2}{kq^2} = 9 \Rightarrow F_2 = 9F_1 = 9 \cdot 9 \cdot 10^{-6} \text{ Н} = 81 \text{ мкН}$$

# *Решение задач*

**К содержанию**

**№1.** Определить силу взаимодействия двух точечных зарядов  $q_1=q_2=1$  Кл, находящихся в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга.

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

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{Н \cdot м^2}{Кл^2}$$

$$F = 9 \cdot 10^9 \frac{Н \cdot м^2}{Кл^2} \cdot \frac{|1Кл|^2}{(1м)^2} = 9 \cdot 10^9 Н$$

№2. Два шарика, расположенные на расстоянии 10 см друг от друга, имеют одинаковые отрицательные заряды и взаимодействуют с силой 0,23 мН. Найти число избыточных электронов

$$N = \frac{0.1 \text{ м}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} \sqrt{\frac{0.23 \cdot 10^{-3} \text{ Н}}{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}}} = 10^{11}$$

на каждом шарике.

$$q_1 = +150 \text{ нКл}$$

$$q_2 = -60 \text{ нКл}$$

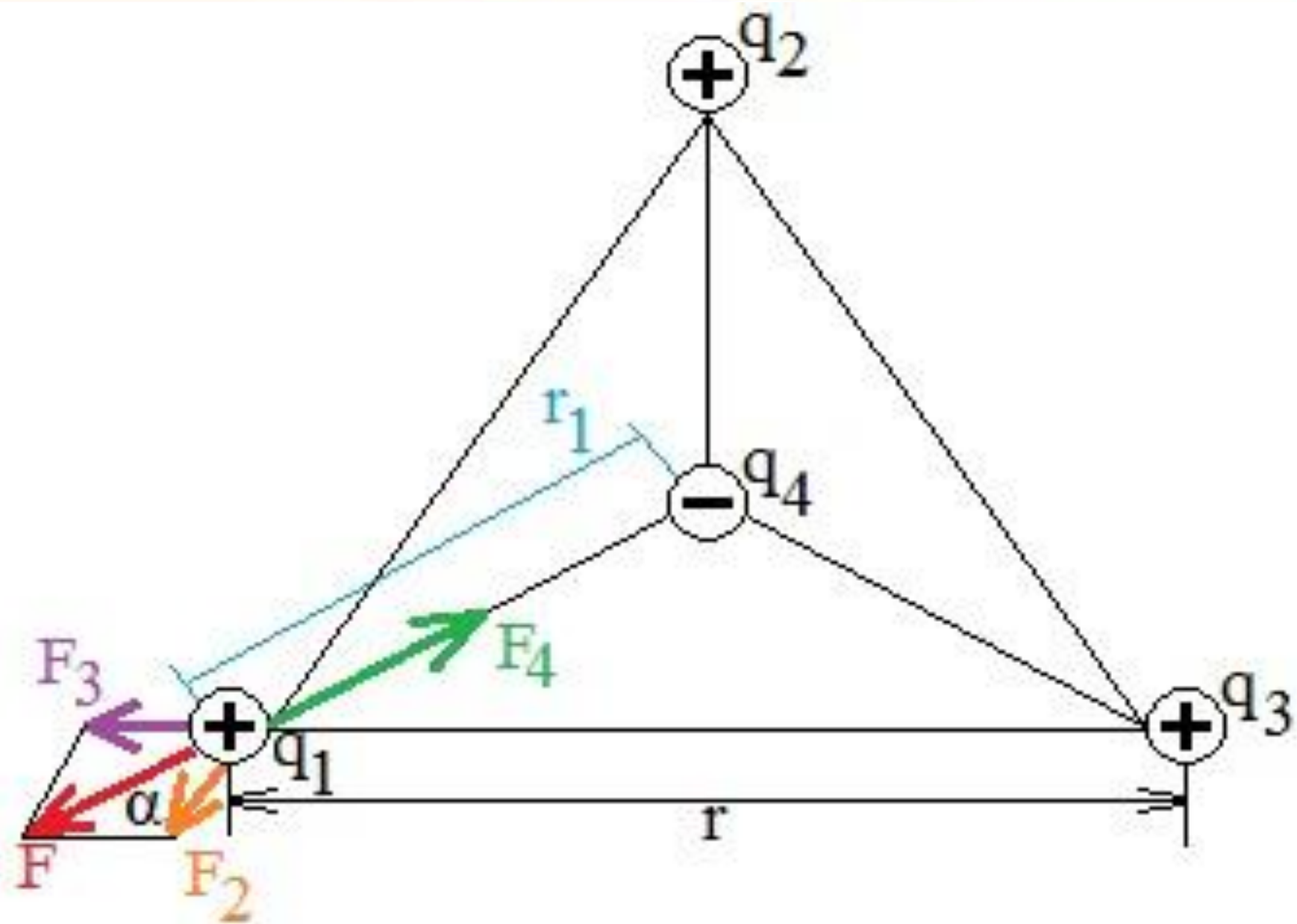
№3. Два одинаковых металлических шарика, имеющих заряды  $+150 \text{ нКл}$  и  $-60 \text{ нКл}$ , привели в соприкосновение и раздвинули на  $10 \text{ см}$ .

$$q = \frac{+150 \text{ нКл} + (-60 \text{ нКл})}{2} = 45 \text{ нКл}$$

Определите силу взаимодействия

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \text{ между ними.}$$

$$F = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \frac{(45 \cdot 10^{-9} \text{ Кл})^2}{(0.1 \text{ м})^2} \approx 2 \text{ мН}$$





Чтобы система зарядов находилась в равновесии, необходимо, чтобы результирующая сила, действующая на каждый заряд, равнялась нулю.

Заряды расположены в вершинах равностороннего треугольника, т.е. на каждый заряд в силу симметрии системы будут действовать одинаковые по модулю результирующие силы.

Достаточно выяснить, какой заряд следует поместить в центре треугольника, чтобы один из трех зарядов, например,  $q_1$  находился в равновесии.

На заряд  $q_1$  действует каждый из зарядов  $q_2, q_3, q_4$  независимо от остальных. Поэтому заряд  $q_1$  будет находиться в равновесии, если выполняется следующее

$$\vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 = 0$$

$$\vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{F} \Rightarrow \vec{F} + \vec{F}_4 = 0$$

$$F - F_4 = 0 \Rightarrow F = F_4$$

$$F_2 = F_3 \Rightarrow F = 2F_2 \cos \alpha$$

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

$$\left. \begin{array}{l} F_2 = F_3 \Rightarrow F = 2F_2 \cos \alpha \\ F_2 = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \end{array} \right\} \Rightarrow F = 2k \frac{q_1 q_2}{r^2} \cos \alpha$$

$$F_4 = k \frac{q_1 q_4}{r_{14}^2}, \quad r_{14} = \frac{2}{3} r \cos \alpha = \frac{2}{3} r \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{3} r = \frac{r}{\sqrt{3}}$$

$$F = F_4 \Rightarrow 2k \frac{q_1 q_2}{r^2} \cos \alpha = k \frac{q_1 q_4}{r_{14}^2}$$

$$q_4 = \frac{2kq_1 q_2 \cos \alpha \cdot r_{14}^2}{kq_1 \cdot r^2} = \frac{2q_2 \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot r_{14}^2}{r^2} = \frac{\sqrt{3} r_{14}^2}{r^2} q_2$$

$$\left. \begin{array}{l} q_4 = \frac{\sqrt{3} r_{14}^2}{r^2} q_2 \\ r_{14} = \frac{r}{\sqrt{3}} \end{array} \right\} \Rightarrow q_4 = \frac{\sqrt{3}}{r^2} \left( \frac{r}{\sqrt{3}} \right)^2 q_2 = \frac{\sqrt{3}}{3} q_2 = \frac{q_2}{\sqrt{3}}$$

$$q_4 = \frac{1 \text{ нКл}}{\sqrt{3}} = 0.58 \text{ нКл}$$

$$F_{\text{эл}} = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} = k \frac{|q|^2}{r^2}$$

$$F_{\text{гр}} = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} = G \frac{m^2}{r^2}$$

**№5.** Во сколько раз сила электрического отталкивания между двумя электронами больше силы их гравитационного притяжения друг к другу?

$$\frac{F_{\text{эл}}}{F_{\text{гр}}} = \frac{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Кл}^2}{\text{м}^2} \cdot (1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2}{6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} \cdot (9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг})^2}$$

$$\frac{F_{\text{эл}}}{F_{\text{гр}}} = 42 \cdot 10^{41}$$

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

**№6.** Согласно классической модели атома водорода, электрон вращается вокруг

протона по круговой орбите радиусом  $5.3 \cdot 10^{-11}$  м.

Найдите период обращения электрона, его угловую и линейную скорости.

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{2.18 \cdot 10^6 \text{ м/с}}{5.3 \cdot 10^{-11} \text{ м}} = 0.411 \cdot 10^{17} \text{ рад/с}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2 \cdot 3.14}{0.411 \cdot 10^{17} \text{ рад/с}} = 15.2 \cdot 10^{-17} \text{ с}$$

$$F_{\text{эл}} = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} = k \frac{|q|^2}{r^2}$$

№7. Определите гравитационную силу притяжения двух водяных шаров, содержащих избыточный электрический заряд, равный 1% от их полного заряда.

Шары взаимодействуют на расстоянии  $r = 5,98 \text{ см}$  с силой  $5,98 \cdot 10^{-19} \text{ Н}$ .

$$\frac{F_{\text{эл}}}{F_{\text{гр}}} = \frac{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot (6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} \cdot 16 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2}{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} \cdot (18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}})^2} = 0,38 \cdot 10^{30}$$

Масса каждого шара 60 кг.

$$\left. \begin{aligned} q &= 0,01 N e \\ N &= \frac{m}{M} N_A \end{aligned} \right\} \Rightarrow q = 0,01 \frac{m}{M} N_A e$$

$$+Ne = -Ne \Rightarrow F_{эл} = \frac{kq^2}{R^2}$$

$$q = Ne = n \cdot N_A \cdot e$$

№8. С какой силой F будут притягиваться два одинаковых свинцовых шарика радиусом

$V = \frac{4}{3}\pi r^3 = 1 \text{ см}^3$ , расположенные на расстоянии  $R = 1 \text{ м}$

друг от друга, если у каждого атома первого

шарика отнять по одному электрону

$F_{эл}$  и все эти электроны перенести на второй шарик?

Молярная масса свинца  $M = 207 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ ,

плотность  $\rho = 11.3 \text{ г/см}^3$ .

$$F_{эл} = \frac{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \left( \frac{11.3 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{207 \cdot 10^{-3} \text{ моль}} \cdot 6.02 \cdot 10^{23} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \right)^2}{(1 \text{ м})^2} =$$

$$= \frac{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \frac{127.69 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}^2}{\text{м}^6} \cdot \frac{16}{9} \cdot 9.8596 \cdot 10^{-12} \text{ м}^6}{42849 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}^2}{\text{моль}^2}} \cdot 36.2404 \cdot 10^{46} \frac{1}{\text{моль}^2} \cdot 2.56 \cdot 10^{-38} \text{ Кл}^2}{1 \text{ м}^2} =$$

$$= 43 \cdot 10^{17} \text{ Н}$$

$$F_k + T_1 + T_2 = 0$$

$$T_1 = T_2 = T$$

№9. Тонкое проволочное кольцо радиуса  $R$  несет электрический заряд  $Q$ .

В центре кольца расположено точечное заряд  $q$ , причем  $Q \gg q$ .

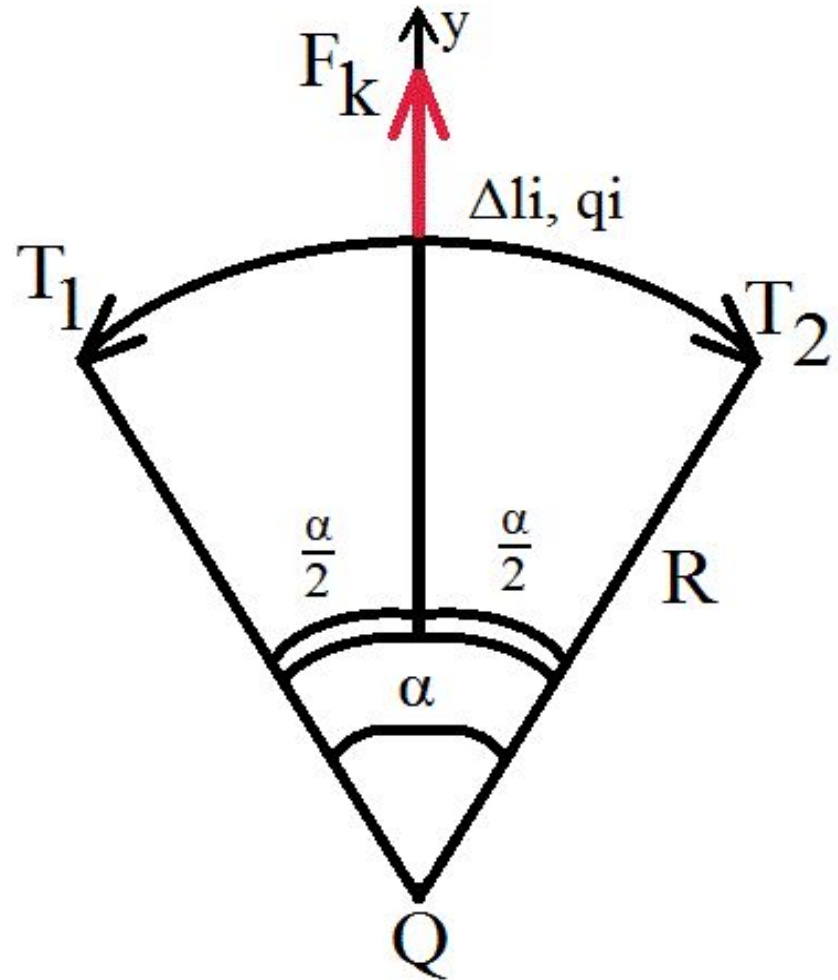
С какой силой  $F_k$  заряд  $q$  будет притягиваться к центру кольца?

$$F_{ki} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq_i}{R^2}$$

Закон Кулона прямо пропорционально квадрату расстояния. Равномерно заряженное кольцо можно считать совокупностью элементарных элементов, состоящих из точечных зарядов.

$$F_{ki} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq_i}{R^2}$$

$$T = \frac{Qq}{8\pi^2\epsilon_0 R^2}$$





# *Электрическое поле*

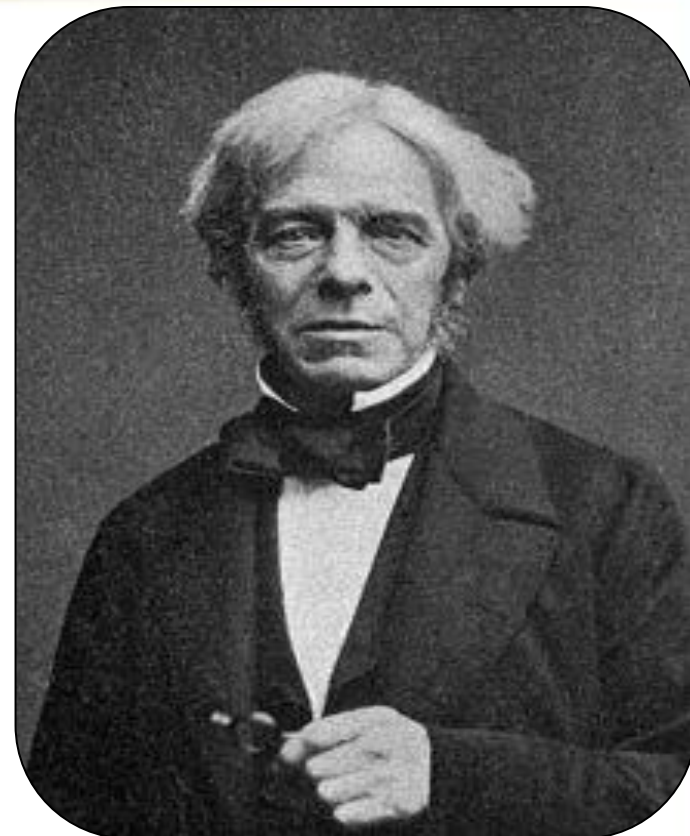
**К содержанию**

*Теория близкодействия,*  
созданная на основе работ  
английского физика Майкла Фарадея,  
объясняет взаимодействие электрических  
зарядов тем, что вокруг каждого  
электрического заряда существует  
электрическое поле.

*Электрическое поле заряда* –  
материальный объект, оно непрерывно в  
пространстве и способно действовать на  
другие электрические заряды.

Это одна из двух компонент  
электромагнитного поля,  
существующее вокруг тел или частиц,  
обладающих электрическим зарядом,  
а также возникающее при изменении  
магнитного поля.

**Майкл Фарадей**  
(22.09.1791 – 25.08.1867)



**Английский физик-экспериментатор,  
ХИМИК.**

Открыл электромагнитную индукцию.  
Создал первую модель электродвигателя.  
Среди других его открытий: первый трансформатор,  
химическое действие тока, диамагнетизм,  
законы электролиза,  
действие магнитного поля на свет.  
Первым предсказал электромагнитные волны.  
Ввёл в научный обиход  
термины ион, катод, анод, электролит,  
диэлектрик, диамагнетизм, парамагнетизм и др.

## *Теория дальнего действия*

Действие на расстоянии представляет собой взаимодействие объектов между собой, не используя при этом никаких посредников.

Согласно этой теории между взаимодействующими объектами находится пустота.

Т.е. отрицается наличие какого-либо агента передающего воздействие от одного тела к другому.

Считается, что такое воздействие передается бесконечно быстро. Расстояние также может быть любым, действие тел друг на друга всё равно будет происходить.

В качестве примера теории действия на расстоянии приводится сила всемирного тяготения, которая описана в классической теории гравитации Ньютона.

Согласно теории  
дальнодействия кулоновская сила,  
действующая на электрический заряд,  
сразу же изменится, если соседний заряд  
сдвинуть с места.

С точки зрения действия на расстоянии  
иначе быть не может:  
один заряд непосредственно через  
пустоту «чувствует» присутствие  
другого.



## **Идея Фарадея:**

электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно.

Каждый из них создаёт в окружающем пространстве электрическое поле.

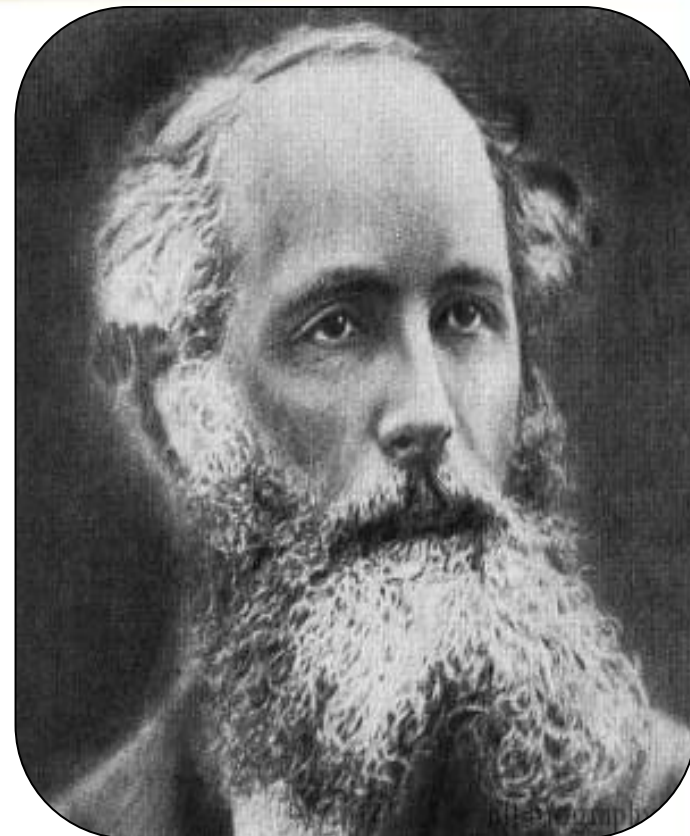
Поле одного заряда действует на другой заряд, и наоборот.

По мере удаления от заряда поле ослабевает.

**Подтвержденная теоретически  
идея Максвелла:  
электромагнитные взаимодействия  
должны распространяться в пространстве  
с конечной скоростью.**

**Джеймс Клерк  
Максвелл**

(13.07.1831 – 05.11.1879)



Британский физик, математик и механик.  
Шотландец по происхождению.

Заложил основы современной классической электродинамики.

Ввёл в физику понятия тока смещения и электромагнитного поля.

Получил ряд следствий из своей теории: предсказание электромагнитных волн, электромагнитная природа света, давление света и др.

Ввёл в физику статистические представления и показал статистическую природу второго начала термодинамики, получил ряд важных результатов в молекулярной физике и термодинамике.

Один из основателей кинетической теории газов.

Пионер количественной теории цветов; автор трёхцветного принципа цветной фотографии.

*Электростатическое поле* —  
поле, созданное неподвижными в  
пространстве и неизменными во времени  
электрическими зарядами  
(при отсутствии электрических токов).

Не меняется со временем!  
Создаётся только электрическими  
зарядами, и существует в пространстве,  
окружающем эти заряды,  
и неразрывно с ними связано.

# *Образцы заданий* *ЕГЭ*

**К содержанию**

## **A1. Скорость распространения электромагнитных взаимодействий**

- 1) всегда равна скорости света**
- 2) определяется только при условии, что заряды неподвижны
- 3) равна скорости света в вакууме
- 4) зависит от знаков зарядов

**A2. Электрическое поле можно обнаружить**

- 1) если оно не изменяется во времени
- 2) если оно изменяется во времени
- 3) помещая в данную точку заряд
- 4) если заряд движется



**А3.** При перемещении одного из зарядов

1) уменьшается электрическое поле

другого заряда

2) его электрическое поле постепенно

ослабеваает

3) изменяется сила взаимодействия

зарядов

4) увеличивается электрическое поле

другого заряда

# *Напряженность электрического поля*

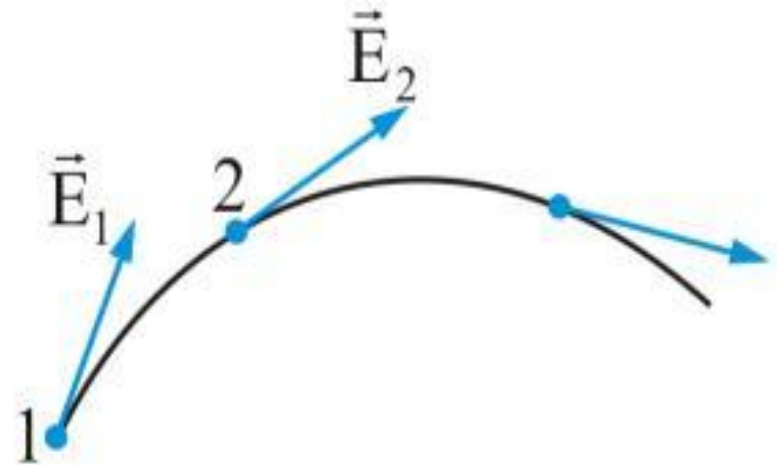
[К содержанию](#)

***Напряженность электрического поля -***  
физическая величина,  
равная отношению силы,  
с которой поле действует на  
положительный пробный заряд,  
помещенный в данную точку  
пространства, к величине этого заряда:

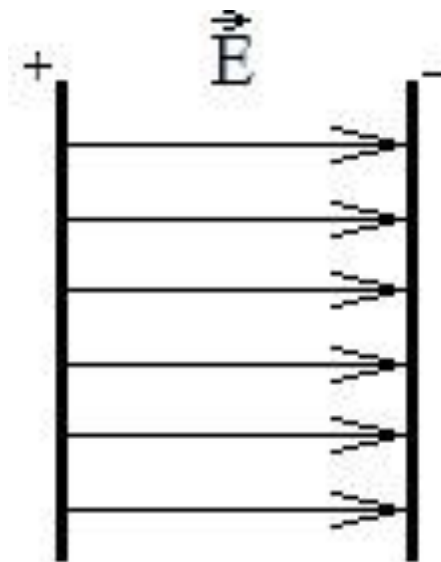
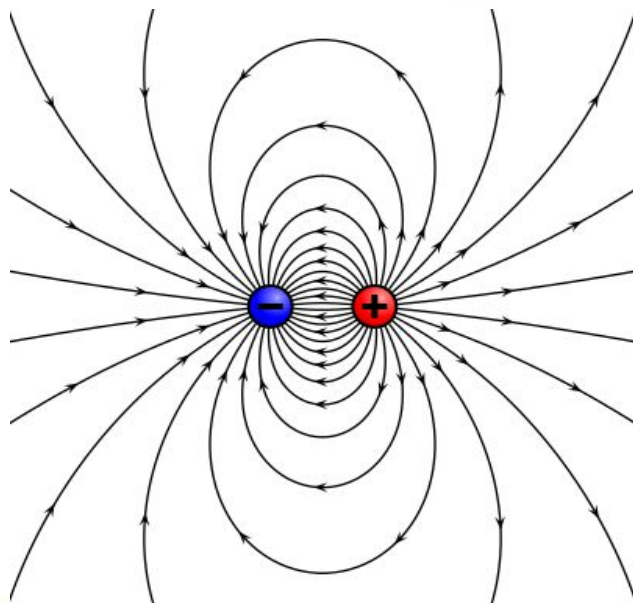
$$E = \frac{F}{q} \left[ \frac{Н}{Кл} \right]$$

Направление вектора напряженности электрического поля в каждой точке пространства совпадает с направлением силы, действующей на положительный пробный заряд.

Для того чтобы описать электрическое поле, нужно задать вектор напряженности в каждой точке поля.



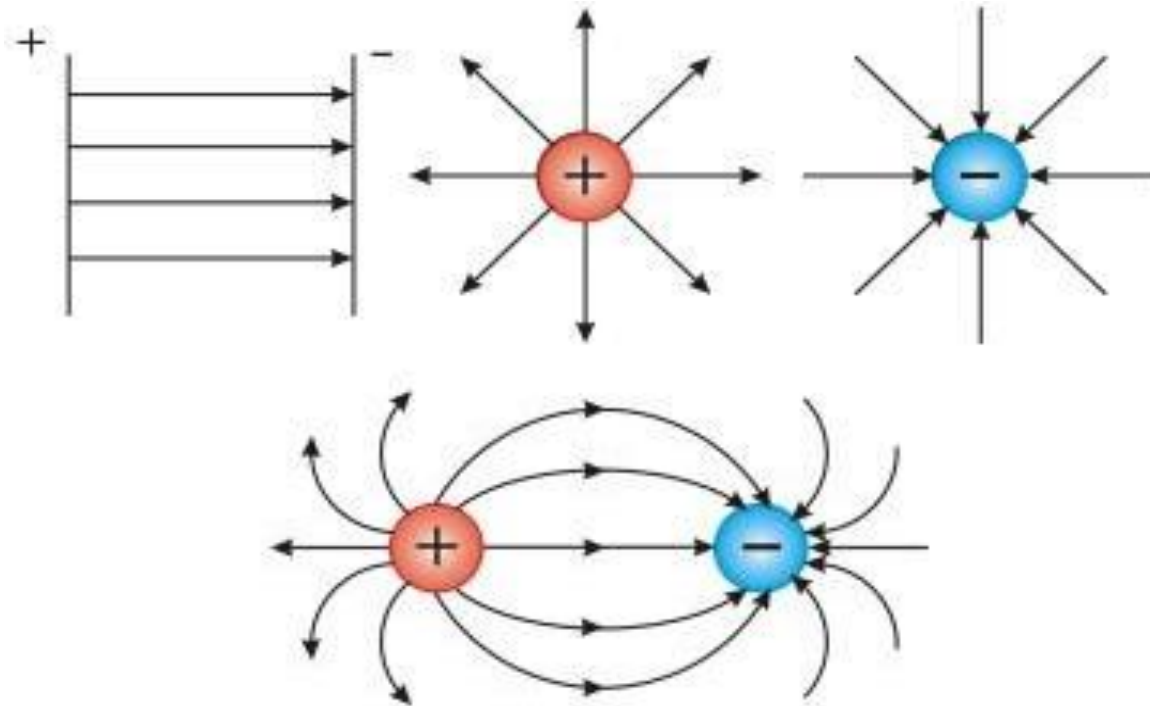
Направление силовых линий позволяет определить направление вектора напряжённости в различных точках поля, а густота (число линий на единицу площади) силовых линий показывает, где напряжённость поля больше.

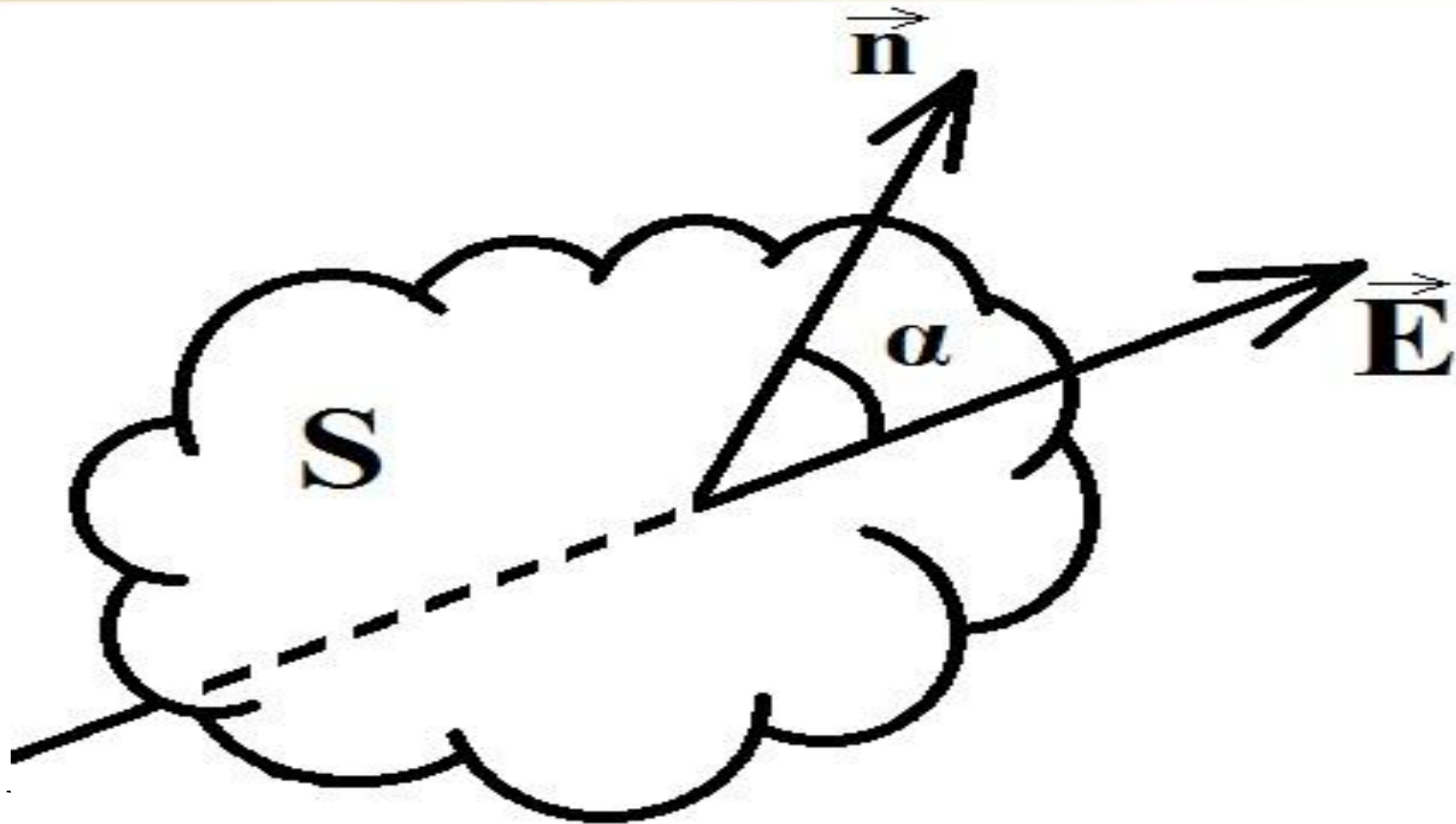


Силовые линии электрического поля не замкнуты, они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных.

Силовые линии непрерывны и не пересекаются, т.к. пересечение означало бы отсутствие определённого направления напряжённости электрического поля в данной точке.

***Силовые линии*** –  
линии, касательная к которым  
в любой точке поля  
совпадает с направлением вектора  
напряженности  $E$ .





$$\Phi = ES \cos \alpha, \quad \alpha = \left( \vec{E}, \vec{n} \right)$$



Густота силовых линий должна быть такой, чтобы единичную площадку, нормальную к вектору напряженности пересекало такое их число, которое равно модулю вектора напряженности.

$$\left| \overline{E} \right| = \frac{\text{число линий}}{\text{площадь}} = \frac{\Phi}{S}$$

***Однородное поле*** –  
электрическое поле, в котором  
напряжённость одинакова по модулю  
и направлению во всех точках  
пространства.

Приблизительно однородным является  
поле между двумя разноимённо  
заряженными плоскими металлическими  
пластинами.

# *Образцы заданий* *ЕГЭ*

**К содержанию**

**A1.** Направление вектора напряжённости электрического поля совпадает с направлением силы, действующей на

1) незаряженный металлический шар, помещённый в электрическое поле

2) отрицательный пробный заряд, помещённый в электрическое поле

3) положительный пробный заряд, помещённый в электрическое поле

4) ответа нет, так как напряжённость поля — скалярная величина

**A2.** Сила, действующая в поле на заряд 0.00002 Кл, равна 4 Н. Напряжённость поля в этой точке равна

- 1) 200 000 Н/Кл
- 2) 0.00008 В/м
- 3) 0.0008 Н/Кл
- 4)  $5 \cdot 10^{-6}$  Кл/Н

$$E = \frac{F}{q} = \frac{4\text{Н}}{0.00002\text{Кл}} = 200000 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$$

**А3.** Силовая линия электрического поля

1) линия, вдоль которой в поле будет двигаться положительный заряд

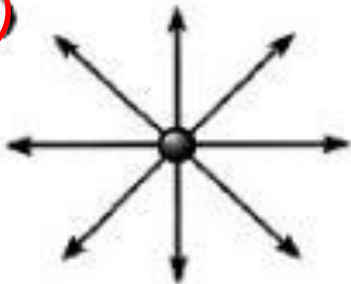
2) линия, вдоль которой в поле будет двигаться отрицательный заряд

3) светящаяся линия в воздухе, которая видна при большой напряжённости поля

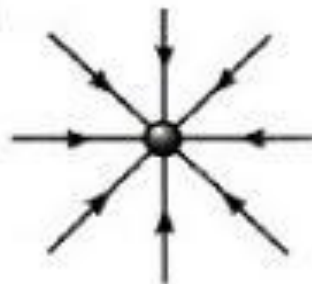
④ линия, в каждой точке которой напряжённость поля направлена по касательной

**A4.** На каком рисунке правильно изображена картина линий напряжённости электростатического поля точечного положительного заряда?

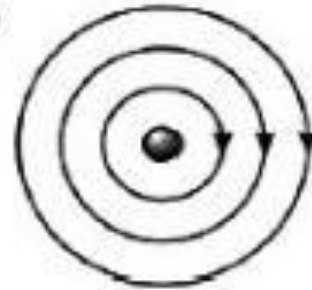
1)



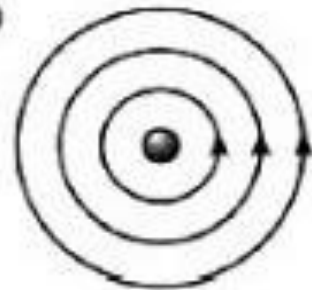
2)



3)



4)



# Напряжённость поля точечного заряда

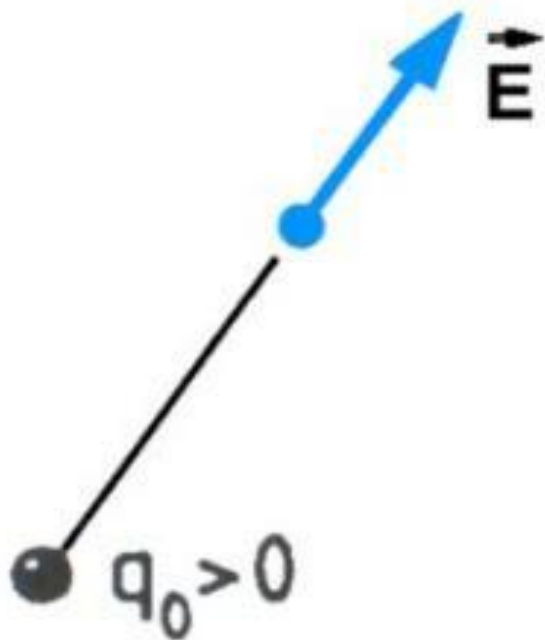
$$\left. \begin{aligned} F &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \\ E &= \frac{F}{q} \end{aligned} \right\} \Rightarrow E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

Напряжённость поля точечного заряда прямо пропорциональна величине заряда  $Q$ , создающего поле, и обратно пропорциональна квадрату расстояния от заряда, до той точки поля, в которой измеряется напряжённость.



Если  $Q > 0$ , то  $E$  направлен  
по радиусу **от** заряда.

Если  $Q < 0$ , то  $E$  направлен  
по радиусу **к** заряду.



## Поле заряженного шара

На расстоянии больше, чем радиус сферы, от центра шара напряжённость поля определяется той же формулой, что и напряжённость поля точечного заряда, помещённого в центре сферы

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

Внутри проводящего шара  $E=0!$

## Принцип суперпозиции полей:

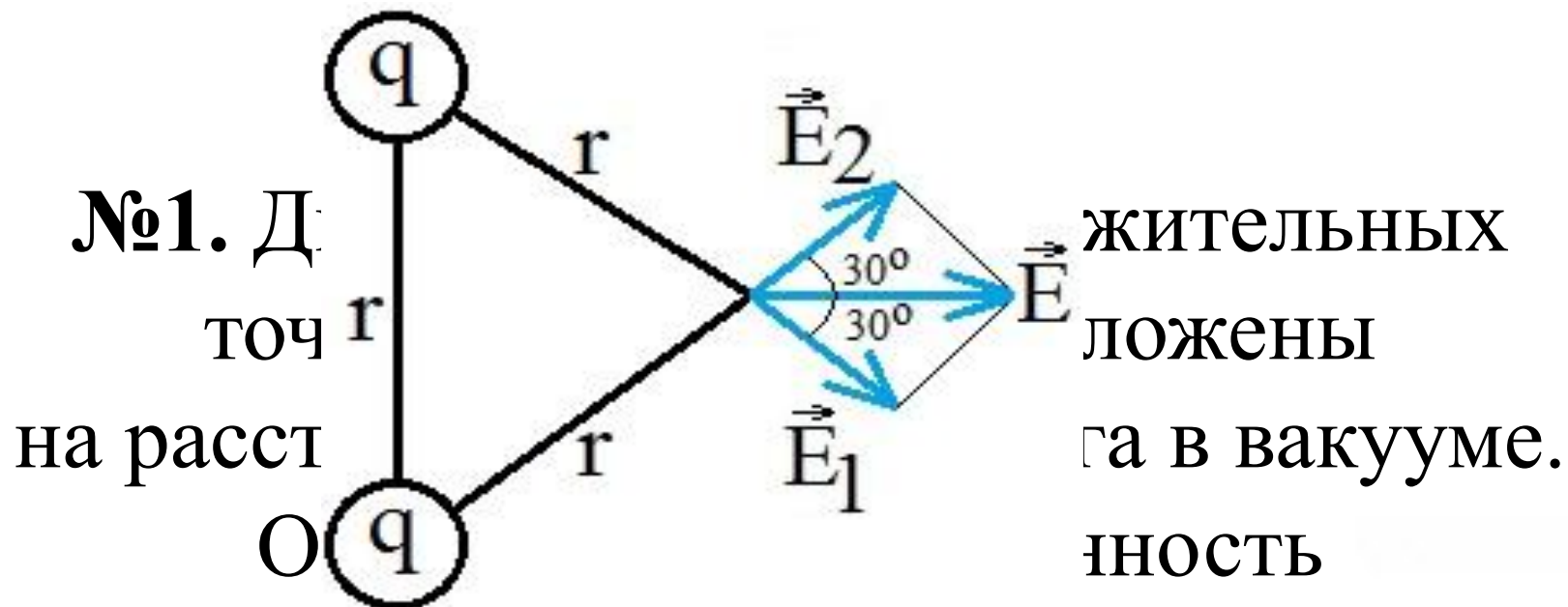
Если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают электрические поля, напряжённости которых  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  и т. д., то результирующая напряжённость поля в этой точке равна сумме напряжённостей этих полей:

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

Напряжённость поля, создаваемого отдельным зарядом, определяется так, как будто других зарядов, создающих поле, не существует.

# *Решение задач*

**К содержанию**



Электрического поля в точке,  
расположенной на одинаковом расстоянии

$$E_1 = E_2 = k \frac{q}{r^2} \text{ этих зарядов.}$$

$$E = 2E_1 \cos 30^\circ = 2k \frac{q}{r^2} \frac{\sqrt{3}}{2} = k \frac{q\sqrt{3}}{r^2}$$

1) **№2.** Проводящая сфера радиусом  $R = 0.2$  м, несущая заряд  $Q = 8 \cdot 10^{-4}$  Кл, находится в вакууме.

1) **определите;**  
 $E = 9 \cdot 10^9 \frac{H \cdot m^2}{Kл^2} \frac{8 \cdot 10^{-4} Кл}{(0.2 м)^2} = 405 \cdot 10^5 \frac{H}{Kл}$   
 модуль напряжённости  $E$  электрического поля на её поверхности;

2) модуль напряжённости  $E_1$  электрического поля в точке, отстоящей на расстоянии  $r_1 = 10$  м от центра сферы;

2)  $E_1 = 9 \cdot 10^9 \frac{H \cdot m^2}{Kл^2} \frac{8 \cdot 10^{-4} Кл}{(10 м)^2} = 0.162 \cdot 10^5 \frac{H}{Kл}$   
 модуль напряжённости  $E_0$  в центре сферы;

3)  $E_0 = 0$

№3. В однородное электрическое поле напряжённостью  $E_0 = 3 \text{ кН/Кл}$  внесли точечный заряд  $q = 4 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$ .

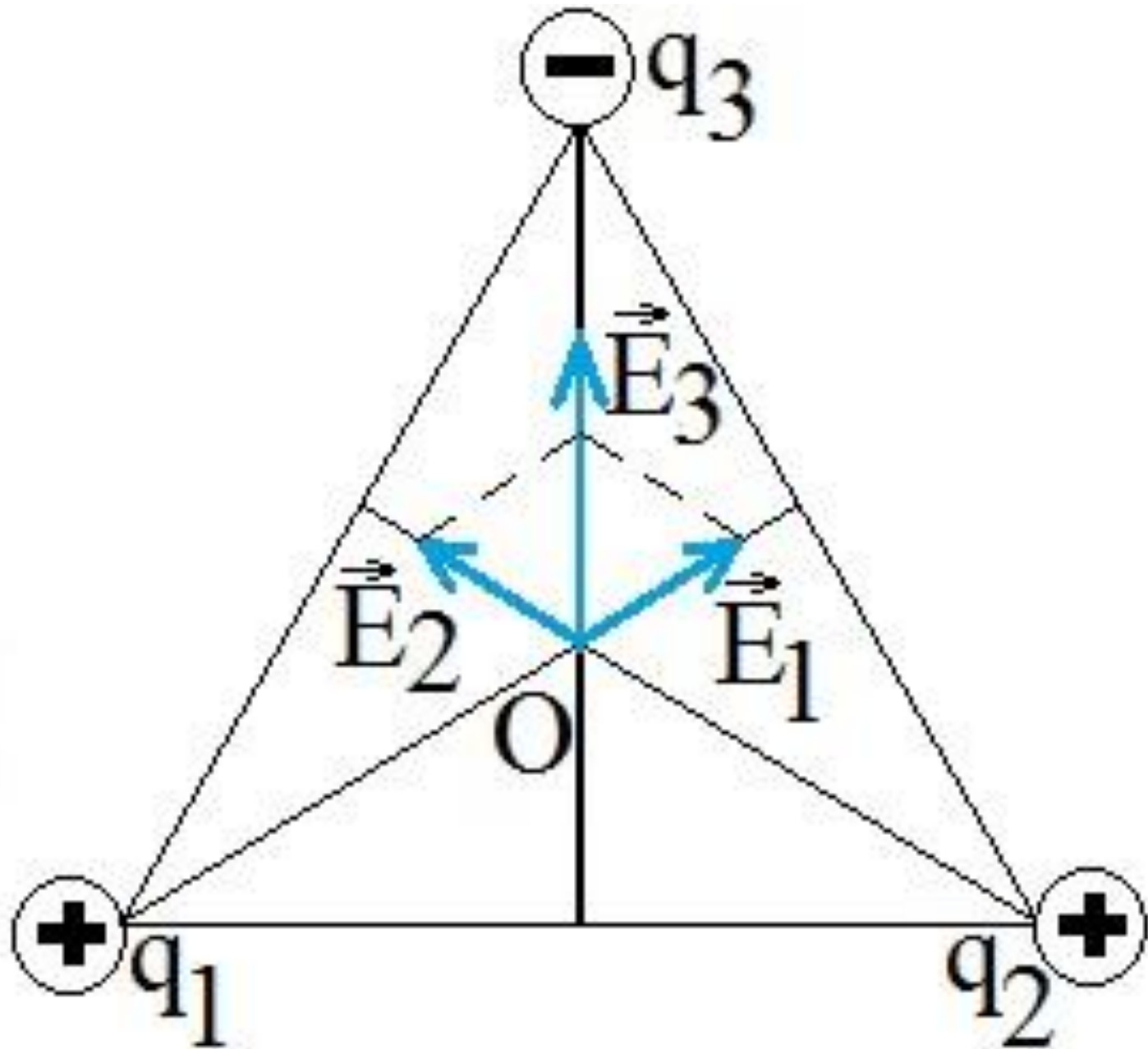
$E_1 = k \frac{q}{r^2}$  Определите напряжённость

электрического поля в точке А, находящейся на расстоянии  $r = 3 \text{ см}$  от точечного заряда.

Отрезок, соединяющий заряд и точку А перпендикулярен силовым линиям однородного электрического поля.

$$E_A = \sqrt{\left(3 \cdot 10^3 \frac{\text{кН}}{\text{Кл}}\right)^2 + \left(9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н}}{\text{Кл} \cdot \text{м}^2} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-10}}{(3 \cdot 10^{-2})^2}\right)^2} \approx 3 \frac{\text{кН}}{\text{Кл}}$$

$E_0$   
 $E_1$   
 $E_3$   
 $r =$   
 $E_1$   
 $E_0$   
 $= k$   
 $E_0$



$K\lambda^- \quad 9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^-$

$\frac{H}{K\lambda}$

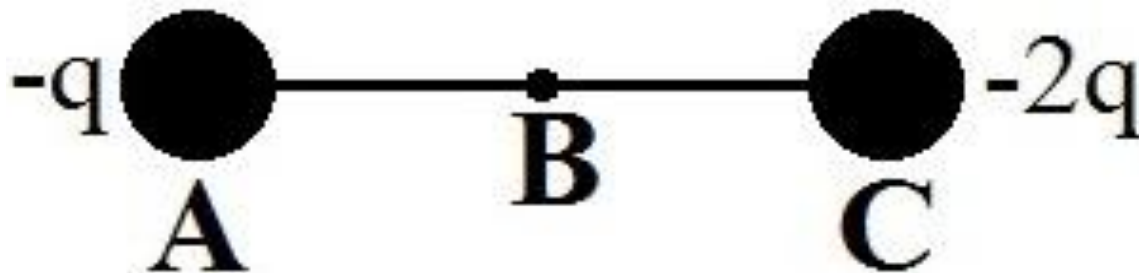


# *Образцы заданий* *ЕГЭ*

**К содержанию**

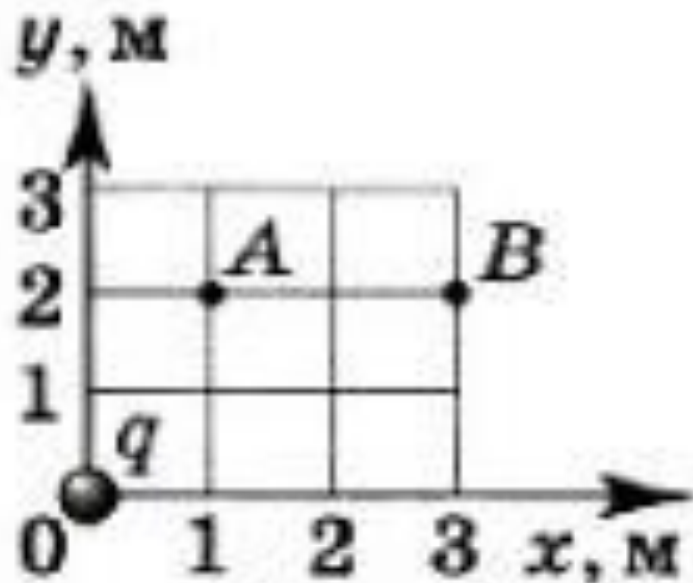
**A1.** Точка В находится в середине отрезка АС. Неподвижные точечные заряды  $-q$  и  $-2q$  расположены в точках А и С соответственно. Какой заряд надо поместить в точку С взамен заряда  $-2q$ , чтобы напряжённость электрического поля в точке В увеличилась в 2 раза?

- 1)  $-5q$     2)  $4q$     3)  $-3q$     4)  $3q$



**С2.** Точечный заряд  $q$ , помещённый в начало координат, создаёт в точке  $A$  электростатическое поле напряжённостью  $E_A = 65 \text{ Н/Кл}$ . Чему равна напряженность  $E_B$  в точке  $B$ ?

- 1) 25 Н/Кл   2) 15 Н/Кл   3) 0   4) 2.5 Н/Кл



$$r_A^2 = 5 \text{ м}, r_B^2 = 13 \text{ м}$$

$$E_2 = E_1 \frac{r_A^2}{r_B^2}$$

$$E_2 = 65 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \frac{5 \text{ м}}{13 \text{ м}} = 25 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$$

1) вкл

С3. В однородном электрическом поле, вектор напряжённости которого направлен вертикально вверх, висит шарик массой 10

г и зарядом 5 мКл. При выключении поля сила натяжения нити увеличивается в два раза. Определите напряжённость поля.

1) 15 Н/Кл   2) 10 Н/Кл   3) 0   4) 20 Н/Кл

$$\Rightarrow \frac{mg}{2} = mg - E \cdot Q \Rightarrow -\frac{mg}{2} = -E \cdot Q$$
$$E = \frac{mg}{2Q} = \frac{0.01 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}}{2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}} = 10 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$$

# *Проводники и диэлектрики*

[К содержанию](#)

## *Проводники* –

вещества, в которых электрические заряды могут свободно перемещаться.

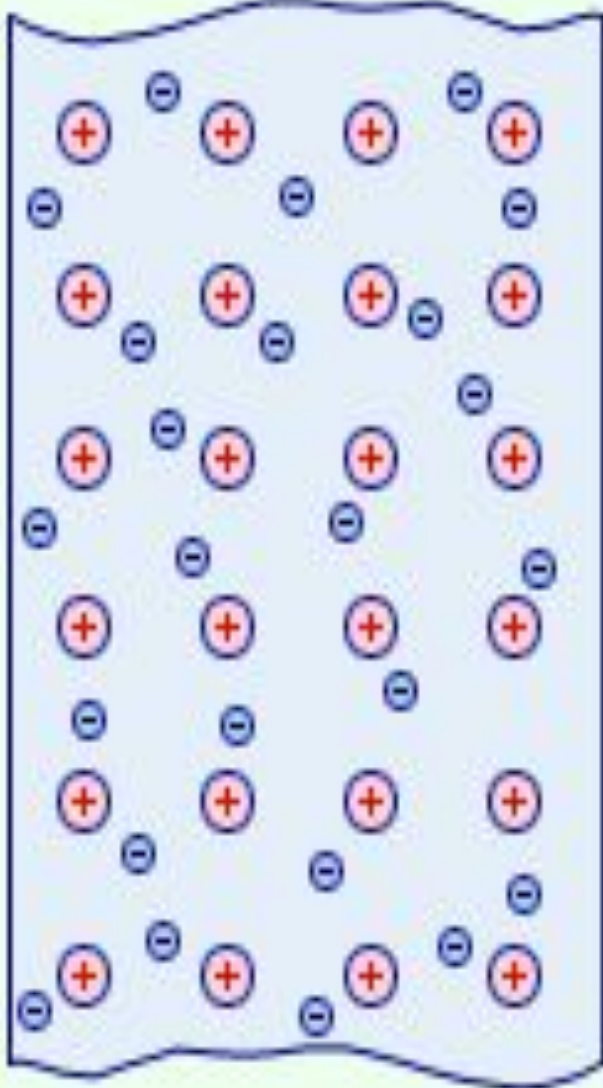
Примеры:

металлы (проводники I рода),  
водные растворы солей и кислот –  
**электролиты** (проводники II рода),  
раскалённые газы.

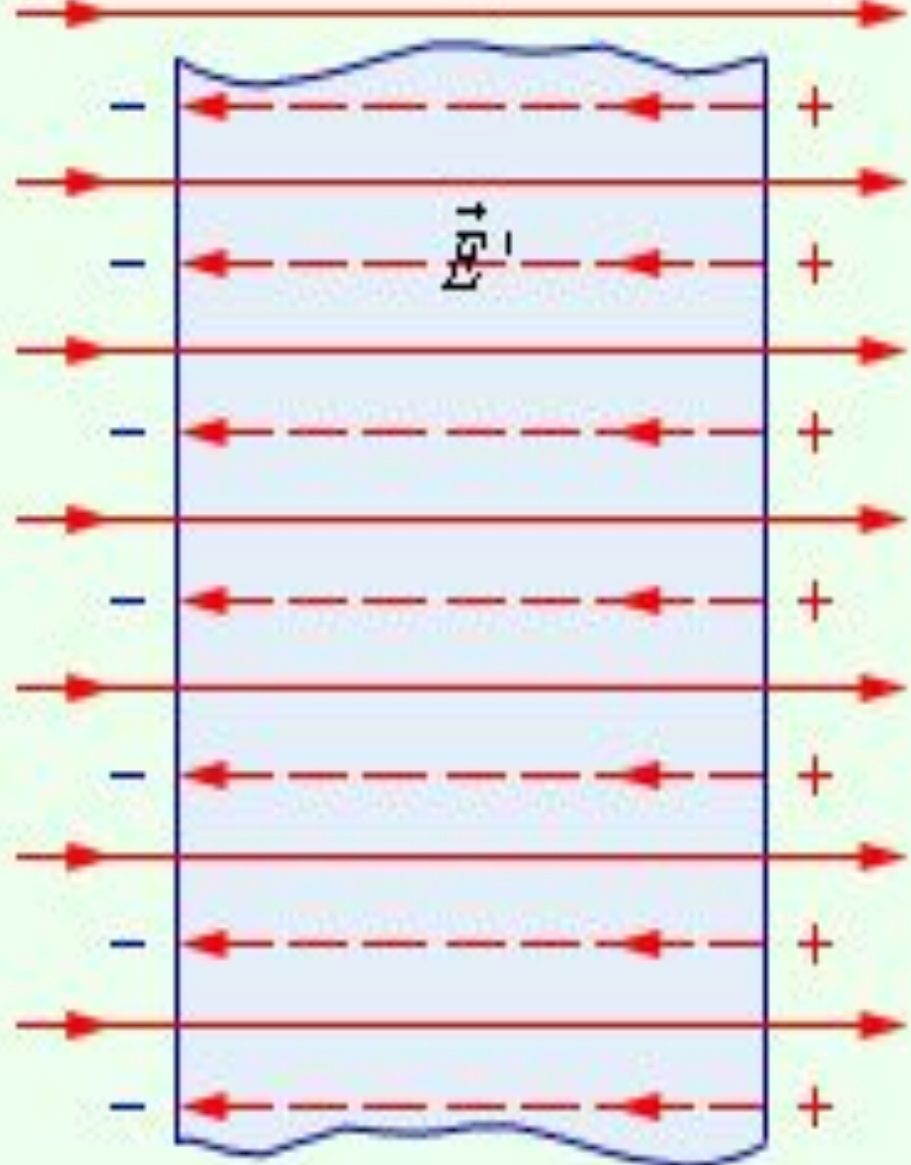
***Свободные заряды*** –  
заряженные частицы, способные  
свободно перемещаться в проводнике  
под влиянием электрического поля.

Свободные электроны участвуют  
в тепловом движении и могут  
перемещаться по металлу в любом  
направлении.

$$\vec{E}_0 = 0$$



$$\vec{E}_0$$



$$0 = \vec{E}_0 + \vec{E}_1$$



**Иоганн Карл  
Вильке**  
(06.09.1732 – 18.04.1796)



Шведский физик-экспериментатор.  
Внёс значительный вклад в теорию  
теплоты, теплоёмкости и электростатику.

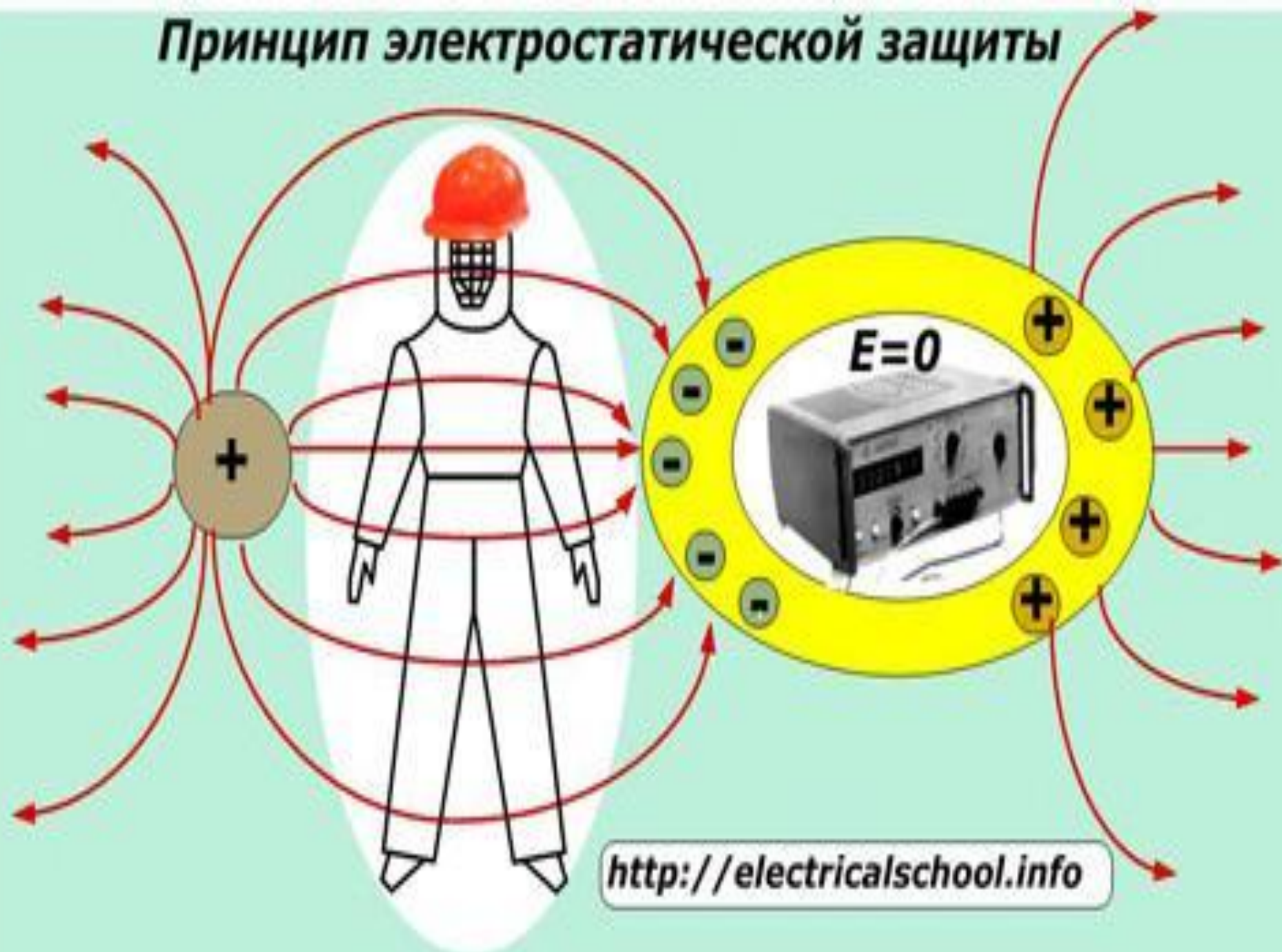
Выполнил первые измерения удельной теплоёмкости твёрдых тел по собственной методике.

Предложил первую единицу измерения тепла – **калория**.

Проводил эксперименты в области электричества и магнетизма. Совместно с Эпинусом обнаружил и детально исследовал пироэлектрический эффект в кристаллах турмалина.

Создал первую карту магнитного склонения. Предложил первый трибоэлектрический ряд.

# Принцип электростатической защиты



<http://electricalschool.info>

## Заземление

Земля действует как резервуар зарядов, принимая и отдавая электроны.

Если поднесем к заземленному металлическому предмету отрицательно заряженный стержень, свободные электроны в металле будут отталкиваться и уходить в Землю.

Если отсоединить стержень от этого предмета, на металле останется избыточный положительный заряд.

Так мы зарядим тело положительным зарядом.

Происходит процесс  
появления электрического заряда на  
поверхности проводника  
при внесении его в область действия  
внешнего электрического поля.

Электрический заряд, скопившийся на  
проводнике, называют **наведенным** или  
**индуцированным**.

На противоположных сторонах проводящего  
тела скапливаются **противоположные** по  
знаку заряды – с одной стороны  
отрицательные, а с другой – положительные.



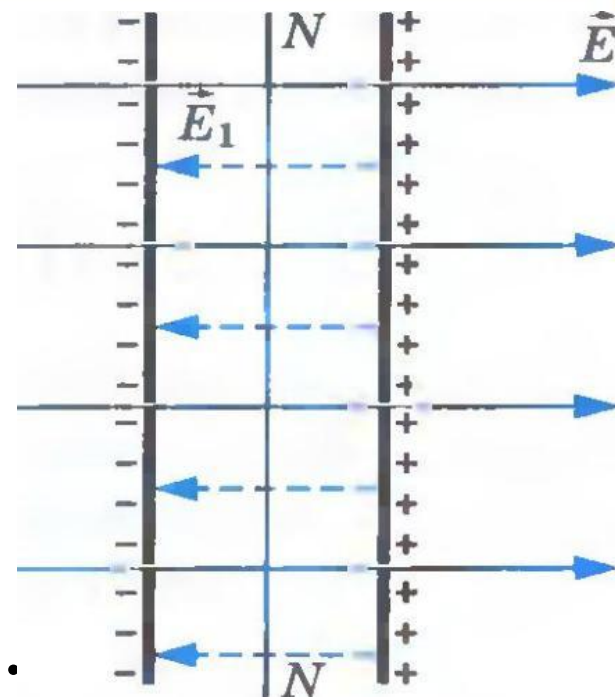
Заряд на проводнике при электростатической индукции накапливается до тех пор, пока собственное электростатическое поле практически полностью не компенсирует внешнее.

Это работает только с хорошо проводящими металлами.

Заряды в проводнике могут располагаться только на его поверхности.

Силловые линии  
электростатического поля  
вне проводника  $\perp$   
поверхности в  
непосредственной  
близости к его поверхности.

Касательная составляющая  
вектора напряженности электрического  
поля не равна нулю. Т.е. на свободные  
заряды действует сила, перемещающая их  
по поверхности проводника.



## *Диэлектрики/изоляторы*

(гр. *dia* – через, англ. *electric* –  
электрический) –

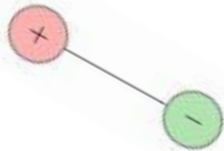
вещества, в которых электрические  
заряды не могут свободно перемещаться.

Примеры:

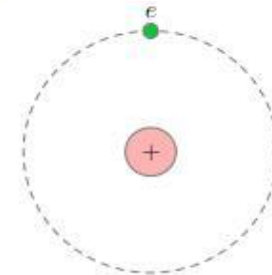
фарфор, стекло, янтарь,  
эбонит, резина, шёлк,

газы при комнатных температурах.





# Диэлектрики



## Полярные

## Неполярные

Состоят из молекул,  
у которых центры  
распределения  
положительных  
и отрицательных  
зарядов  
не совпадают

Поваренная соль, вода,  
спирты.

Состоят из атомов  
или молекул, у которых  
центры распределения  
положительных и  
отрицательных зарядов  
совпадают.

Инертные газы, масло,  
воздух,  $O_2$ ,  $H_2$ , бензол

***Электрический диполь*** –

идеализированная электронейтральная система, состоящая из точечных и равных по абсолютной величине положительного и отрицательного электрических зарядов.

***Поляризация*** –

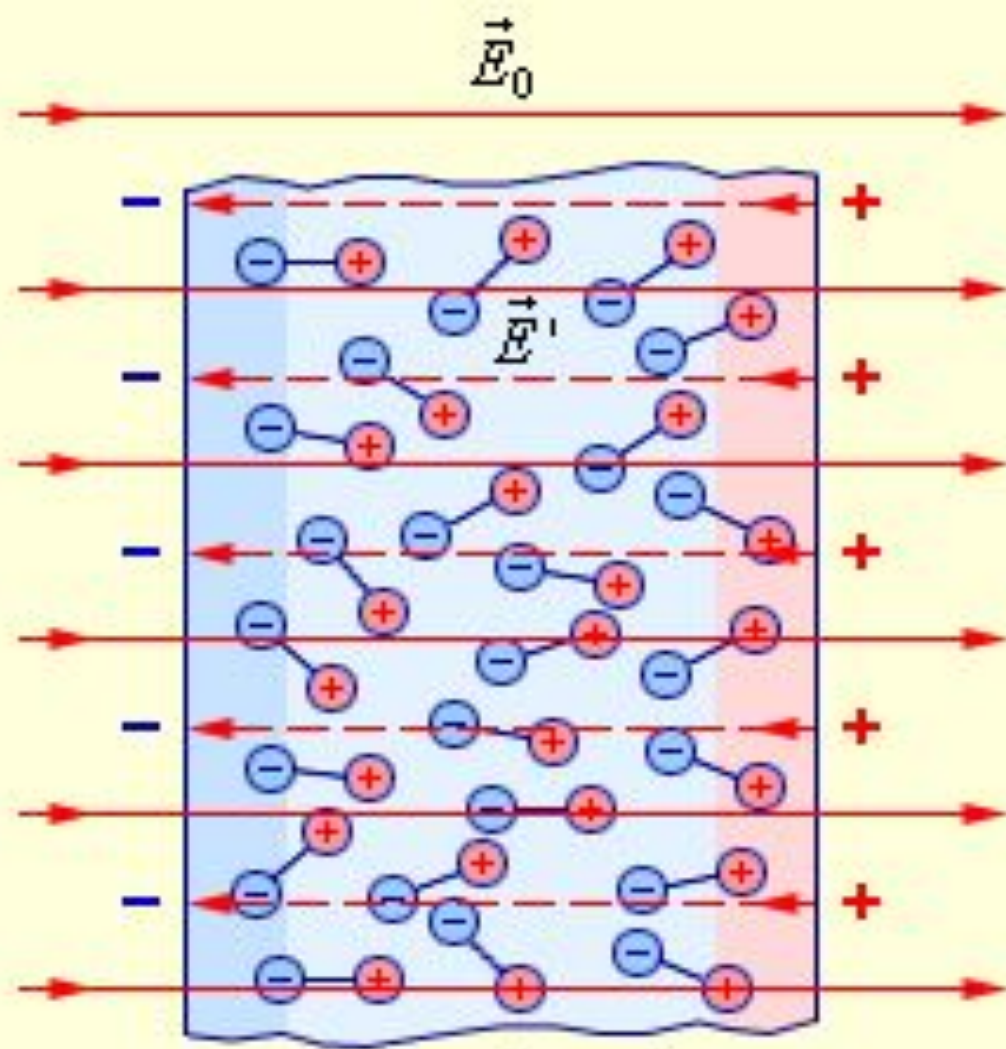
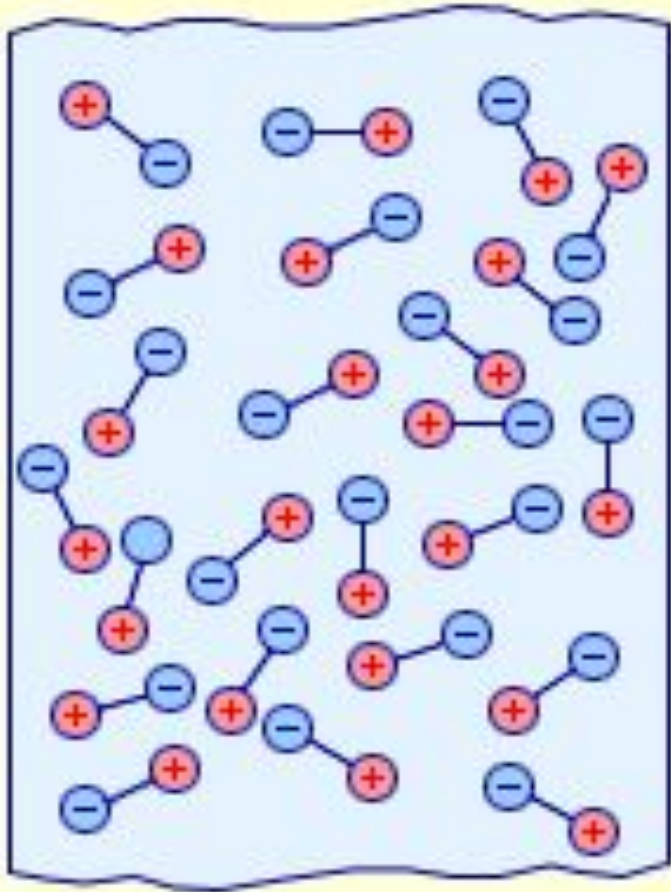
смещение положительных и отрицательных связанных зарядов диэлектрика в противоположные стороны.

При отсутствии внешнего электрического поля молекулы-диполи **полярного диэлектрика**, совершая хаотическое тепловое движение, ориентированы в самых разных направлениях.

Электрические поля этих диполей полностью компенсируют друг друга, и результирующее поле равно нулю во всех областях диэлектрика.

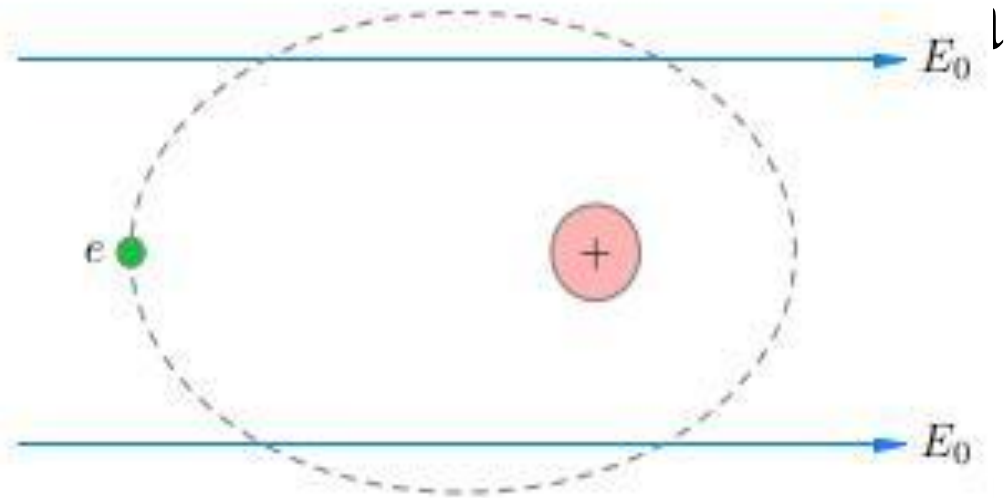
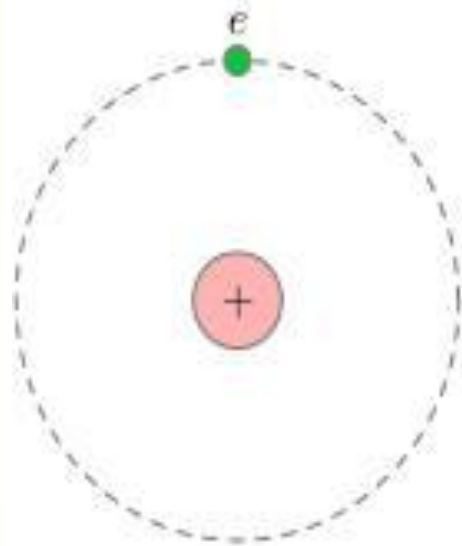
Но если поместить такой диэлектрик во внешнее поле  $E_0$ , то оно «развернёт» диполи так, что они окажутся ориентированными вдоль линий напряжённости

$$\vec{E}_0 = 0$$



$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

На поверхности диэлектрика появляются нескомпенсированные связанные заряды, создающие свое поле  $E'$  направленное навстречу внешнему полю  $E_0$ .



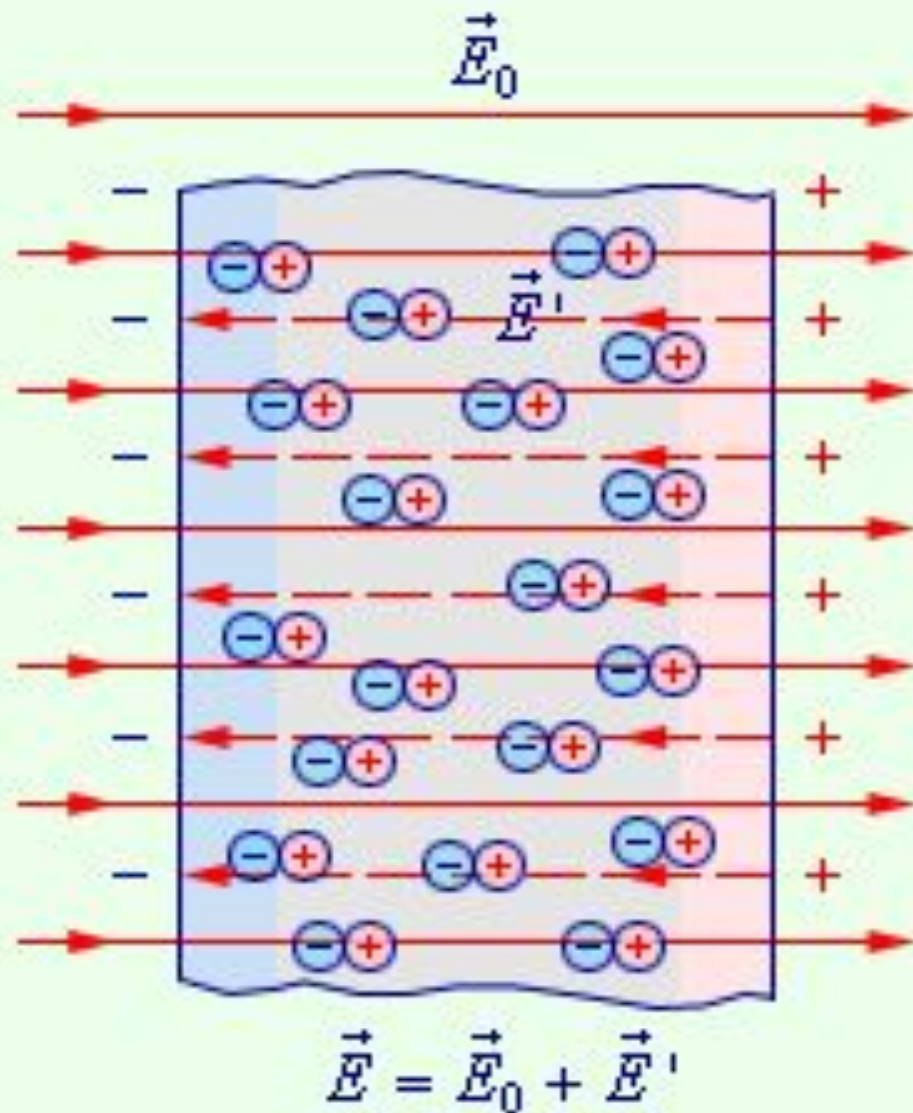
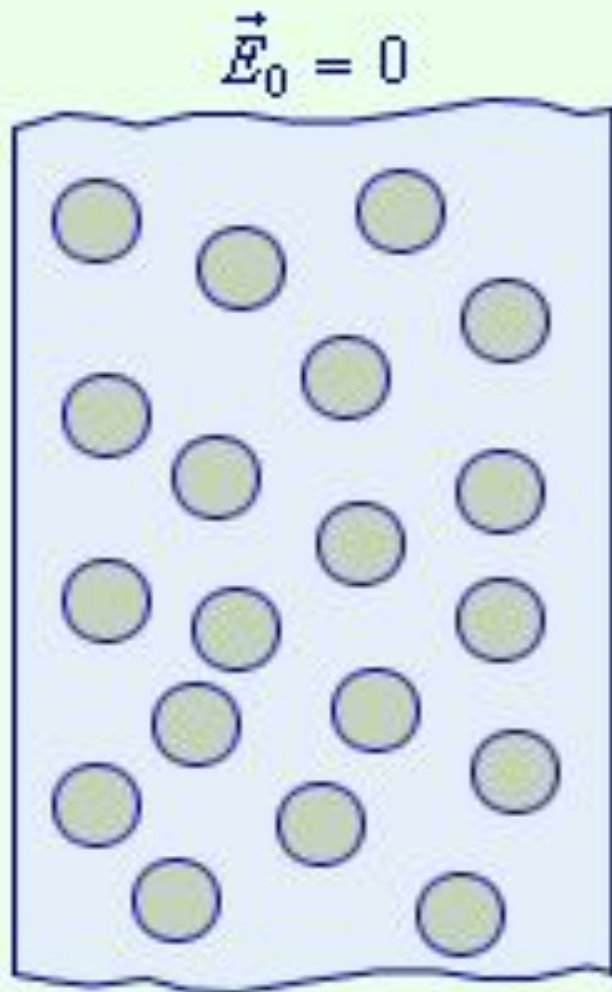
Деформация неполярных молекул под действием внешнего электрического поля не зависит от их теплового движения, поэтому поляризация неполярного диэлектрика не зависит от температуры.

Все свободные заряды одного знака  
устремляются в одну сторону,  
заряды противоположного знака  
в противоположную сторону.

Внутреннее поле, которое при этом  
образуется внутри проводника,  
"гасит" внешнее поле.

Поле внутри диэлектрика ослабляется,  
в зависимости от свойств диэлектрика.





В результате поляризации возникает поле, создаваемое связанными поляризованными зарядами и направленное против внешнего поля.

*Диэлектрическая проницаемость  
вещества –*

физическая величина, равная отношению  
модуля напряжённости поля  $E_0$  в вакууме  
к модулю напряжённости поля  $E$   
в диэлектрике.

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



Определение относительной диэлектрической проницаемости среды используется для характеристики изоляционных свойств вещества.

Она оценивает соотношение силы взаимодействия между двумя точечными зарядами при двух различных условиях: в вакууме и рабочей среде.

При этом показатели вакуума принимаются за 1 ( $\epsilon=1$ ), у реальных веществ они всегда выше ( $\epsilon>1$ ).

Чем выше значение диэлектрической проницаемости среды, тем сильнее проявляются изоляционные свойства.

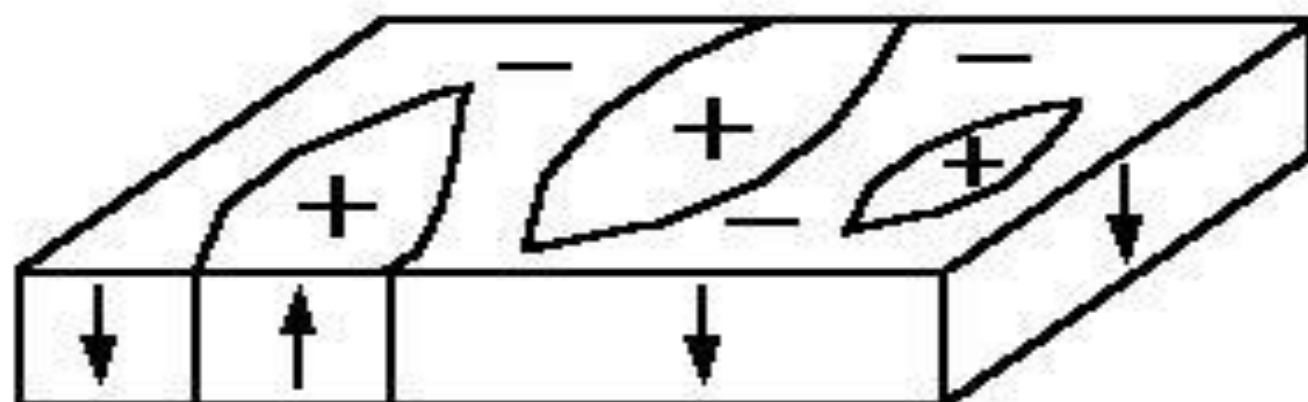
Материал	$\epsilon$
Бумага сухая	2 – 2.5
Янтарь	2.8
Капрон	3.6
Стекло	4 – 16
Фарфор	4.5 – 4.7
Масло касторовое	4.8
Мрамор	8-10
Спирт этиловый	27
Вода дистиллированная	81
Титанат бария	1200

$BaTiO_3$  – бария титанат –  
**сегнетоэлектрик.**

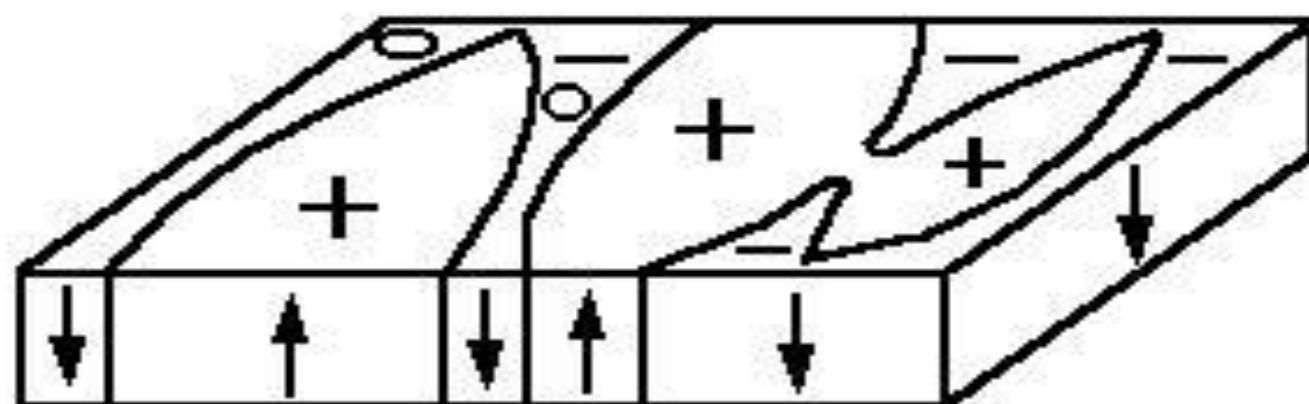
В его кристаллах наблюдаются три фазовых перехода, сопровождающиеся изменением структуры и свойств.

Сегнетова соль была первым кристаллом, у которого обнаружены и изучены **сегнетоэлектрические свойства**, и она дала название целому классу материалов.

***Сегнетоэлектрик, ферроэлектрик***  
(англ. *ferroelectric material*) –  
диэлектрик, обладающий в определенном  
интервале температур собственным  
СПОНТАННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ  
ДИПОЛЬНЫМ МОМЕНТОМ.



а



б

Схема доменной структуры триглицинсульфата

а) - в отсутствие электрического поля.

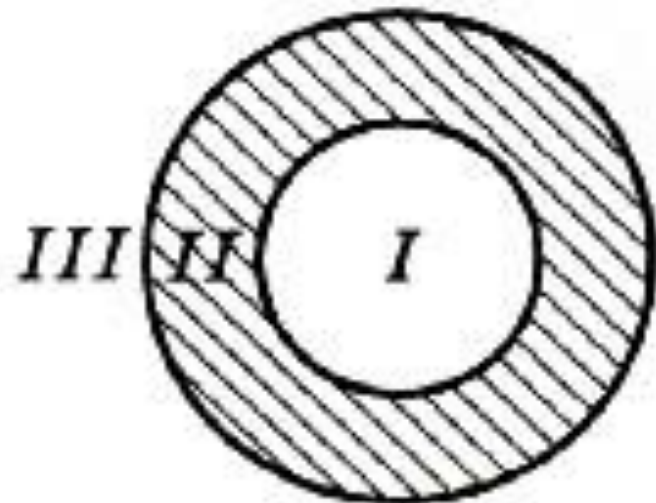
б) - изменение доменной структуры в электрическом поле.

# *Образцы заданий* *ЕГЭ*

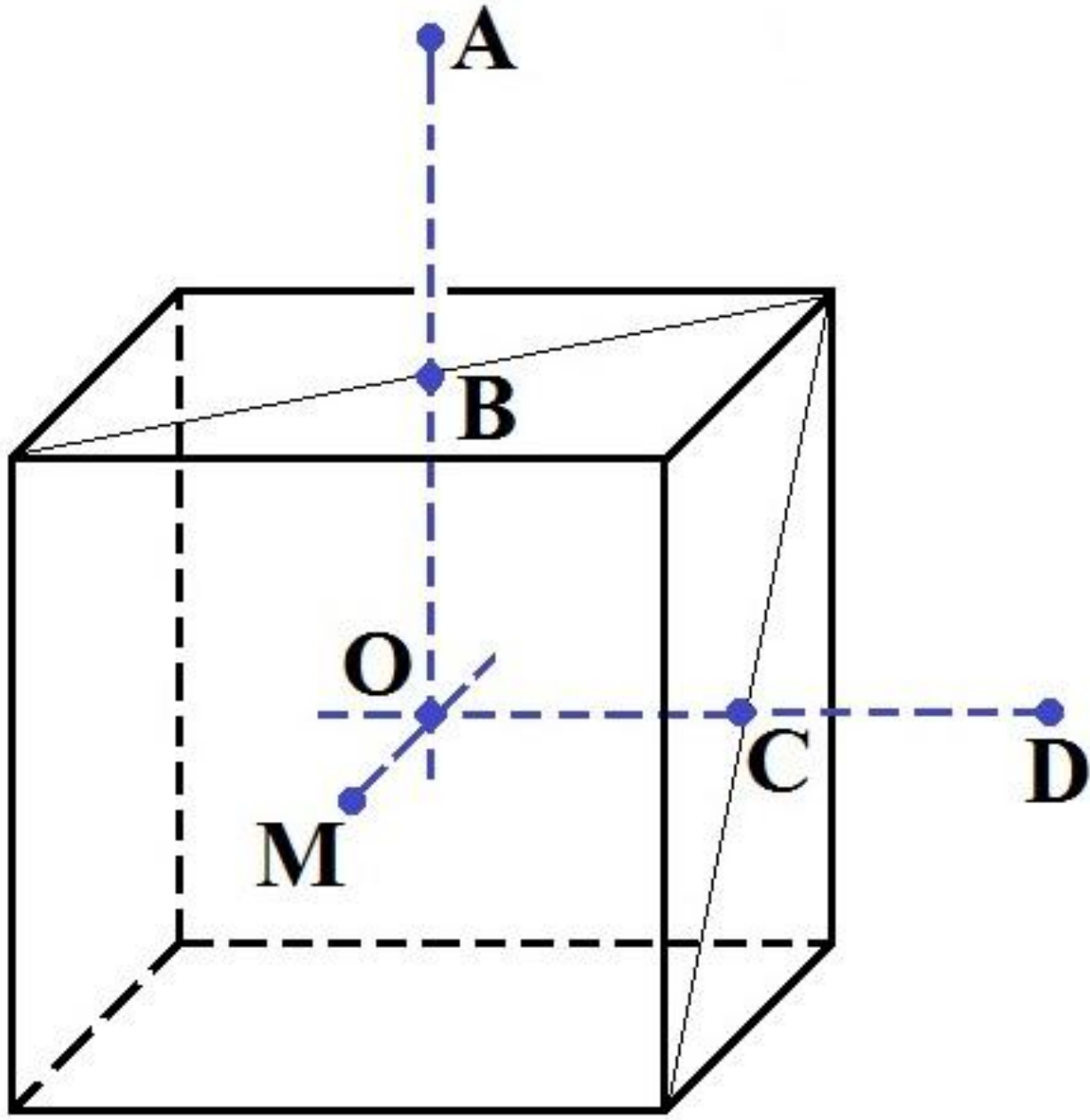
**К содержанию**

**A1.** На рисунке изображено сечение уединённого проводящего полого шара. Шару сообщили отрицательный заряд. В каких областях пространства напряжённость электростатического поля, создаваемого шаром, отлична от нуля?

- 1) только в I
- 2) только во II
- 3) только в III
- 4) в I и II



В2. На  
Физи  
уедин  
Точка  
А) Мо  
центр  
электр  
ОМТ  
в точк  
электр  
А рав  
Б) Мо  
Напря  
электр  
заряд  
в точк  
соотв  
велич



ие  
Q.  
-  
С,  
точке  
поля  
вите



# *Работа и энергия электростатического поля*

[К содержанию](#)

Энергия взаимодействия электронов с ядром  
в атоме и энергия взаимодействия атомов  
друг с другом в молекулах –  
это в основном электрическая энергия.

С точки зрения теории близкодействия  
на заряд непосредственно действует  
электрическое поле, созданное другим  
зарядом.

При перемещении заряда действующая на него  
со стороны поля сила совершает работу.

Работа сил электростатического поля  
при перемещении заряда  
из одной точки поля в другую  
не зависит от формы траектории,  
а определяется только положением  
начальной и конечной точек  
и величиной заряда.

$$A = qE\Delta d$$

Потенциальная энергия заряда в однородном электростатическом поле, где  $d$  — расстояние от точки 2 до любой точки, находящейся с точкой 2 на одной силовой линии.

$$W_{II} = qEd$$

Физический смысл имеет не сама  $W_{II}$ , а разность ее значений в двух точках пространства.

Работа, совершаемая электростатическое полем при перемещении точечного заряда  $q$  из точки (1) в точку (2), равна разности значений потенциальной энергии в этих точках и не зависит от пути перемещения заряда и от выбора точки (0):

$$A = W_{П1} - W_{П2} = -\Delta W_{П}$$

На замкнутой траектории, когда заряд возвращается в начальную точку, работа поля равна нулю

$$A = -\Delta W_{II} = 0$$

***Потенциальное поле*** –  
поле, работа которого по перемещению  
заряда по замкнутой траектории всегда  
равна нулю.

Работа потенциального поля

$$A = -(W_{П2} - W_{П1})$$

Формула справедлива для **любого**  
электростатического поля

Потенциальная энергия заряда  
в электростатическом поле  
пропорциональна заряду.

Это справедливо как для однородного  
поля, так и для неоднородного.

Отношение потенциальной энергии к  
заряду не зависит от помещённого  
в поле заряда.

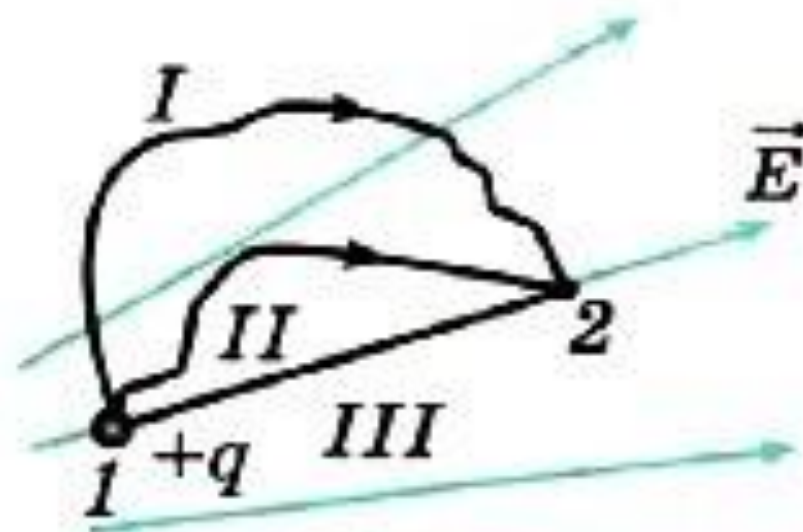


# *Образцы заданий* *ЕГЭ*

**К содержанию**

**A1.** В неоднородном электростатическом поле перемещается положительный заряд из точки 1 в точку 2 по разным траекториям. В каком случае работа сил поля меньше?

- 1) работа сил электростатического поля по траекториям, II, III одинакова
- 2) I
- 3) II
- 4) III



# *Потенциал электростатического поля*

[К содержанию](#)

***Потенциал точки  
электростатического поля –  
отношение потенциальной энергии  
заряда, помещённого в данную точку,  
к этому заряду.***

**Напряжённость поля – силовая  
характеристика.**

**Потенциал – энергетическая  
характеристика.**

Потенциал точки электростатического  
поля

$$\varphi = \frac{W_{\Pi}}{q} \left[ \frac{Дэж}{Кл} = В \right]$$

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

$$\varphi = \frac{W_{\Pi}}{q} = Ed$$

Потенциал поля неподвижного точечного заряда  $q$  в данной точке поля, находящейся на расстоянии  $r$  от заряда

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r} = k \frac{q}{r}$$

Изменение потенциала не зависит от выбора нулевого уровня отсчёта потенциала.

**Алессандро  
Джузеппе Антонио  
Анастасио  
Джероламо Умберто  
Вольта**  
(18.02.1745 – 05.03.1827)



Итальянский физик, химик и физиолог.  
Один из основоположников учения  
об электричестве.

Впервые поместил пластины из цинка и меди в кислоту, чтобы получить непрерывный электрический ток, создав первый в мире химический источник тока - «Вольтов столб».

Благодаря этому был изобретён

**«элемент Вольта»** –

первый гальванический элемент.

Именем Вольты названа единица измерения электрического напряжения – вольт.



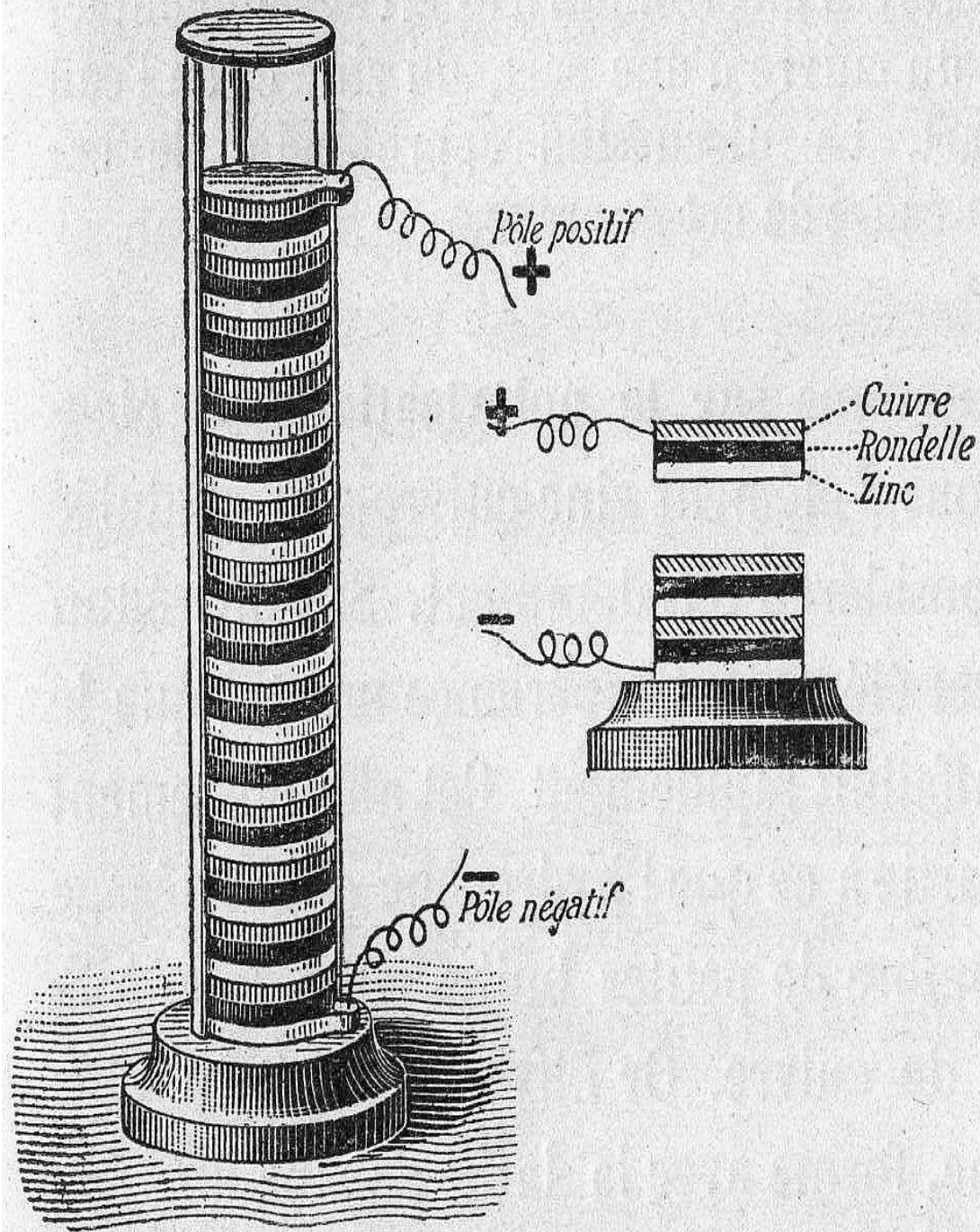


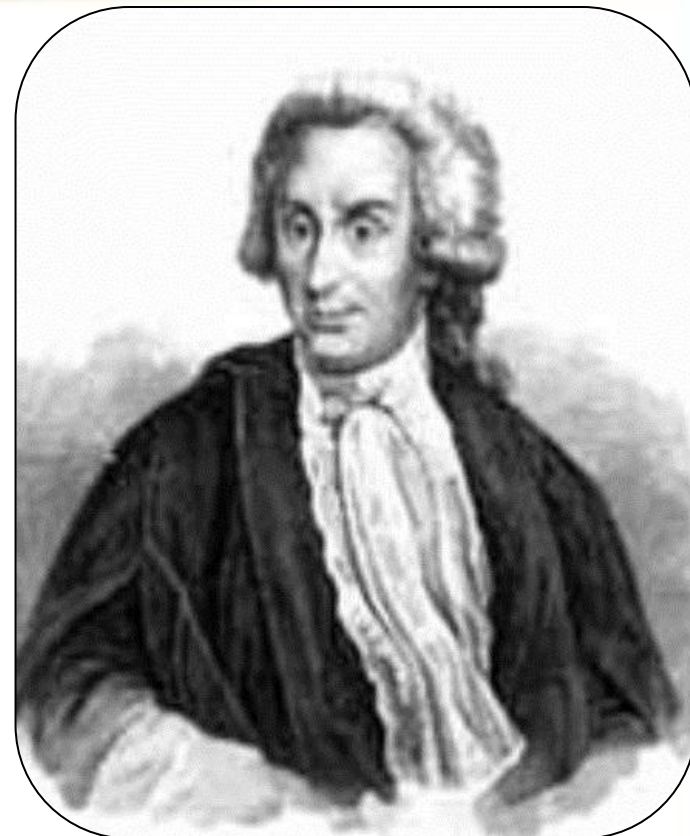
Fig. 283. — Pile de Volta.

*Гальванический элемент* – химический источник электрического тока, основанный на взаимодействии двух металлов и/или их оксидов в электролите, приводящем к возникновению в замкнутой цепи электрического тока.

Назван в честь Луиджи Гальвани.

# Луиджи Гальвани

(09.09.1737 – 04.12.1798)



Итальянский врач, анатом,  
физиолог, физик.

Один из основателей электрофизиологии  
и учения об электричестве,  
основоположник экспериментальной электрофизиологии.

Первым исследовал электрические явления при  
мышечном сокращении («животное электричество»)  
Обнаружил возникновение разности потенциалов при  
контакте разных видов металла и электролита.

Гальвани предположил, что мышца является  
своеобразной батареей лейденских банок,  
непрерывно возбуждаемой действием мозга,  
которое передается по нервам.

Именно так и была рождена теория животного  
электричества!



Значение потенциала в данной точке **зависит** от выбора нулевого уровня для отсчета потенциала, т. е. от выбора точки, потенциал которой принимается равным нулю.

Изменение потенциала **не зависит** от выбора нулевого уровня отсчета потенциала.

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

$$A = -(W_{\Pi 2} - W_{\Pi 1}) = -(q \cdot \varphi_2 - q \cdot \varphi_1)$$

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

$$U = \varphi_1 - \varphi_2$$

*Напряжение* – разность потенциалов.

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 \text{ [В]}$$

*Электрическое напряжение* – это отношение работы электрического поля зарядов при передаче пробного заряда из точки 1 в точку 2.

$$U = \frac{A}{q} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В} \right]$$

$$A = qE\Delta d \Rightarrow E = \frac{A}{q\Delta d}$$

$$A = qU \Rightarrow E = \frac{qU}{q\Delta d}$$

$$E = \frac{U}{\Delta d} \left[ \frac{B}{\text{м}} \right]$$

$$\left[ \frac{B}{\text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \frac{1}{\text{м}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл}} \frac{1}{\text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \right]$$

$$U = Ed \cos \alpha$$



Чем меньше меняется потенциал  
на расстоянии  $\Delta d$ ,  
тем меньше напряжённость  
электростатического поля.

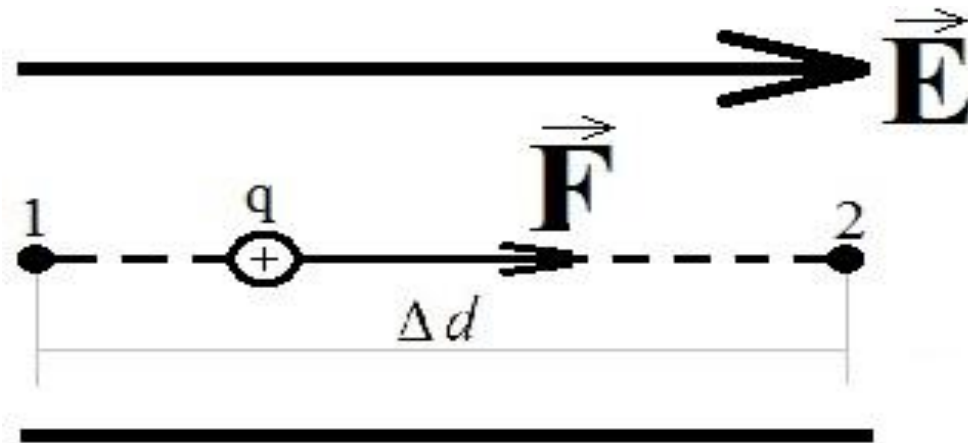
Если потенциал не меняется совсем,  
то напряжённость поля равна нулю.

Напряжённость электрического поля  
направлена в сторону убывания  
потенциала.

При перемещении положительного заряда в направлении вектора напряжённости электростатическое поле совершает положительную работу

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) > 0$$

$$\Rightarrow \varphi_1 > \varphi_2$$



Если электрическое поле действует на **положительный заряд**, направление силы совпадает с направлением вектора напряженности

$$+q \Rightarrow \overset{\text{поля.}}{\overbrace{F}^{\uparrow}} \uparrow \uparrow \overbrace{E}^{\downarrow}$$

Если электрическое поле действует на **отрицательный заряд**, направление силы противоположно направлению вектора напряженности электрического поля.

$$-q \Rightarrow \overbrace{F}^{\downarrow} \uparrow \downarrow \overbrace{E}^{\downarrow}$$

Если поле совершает положительную работу,  
то потенциальная энергия заряда уменьшается.

$$\vec{F} \uparrow \uparrow \vec{S}, \quad A > 0 \Rightarrow W_{\Pi} \downarrow$$

Если поле совершает отрицательную работу,  
то потенциальная энергия заряда увеличивается.

$$\vec{F} \uparrow \downarrow \vec{S}, \quad A < 0 \Rightarrow W_{\Pi} \uparrow$$

Если работа поля равна нулю, то потенциальная  
энергия заряда не изменяется.

$$\vec{F} \perp \vec{S}, \quad A = 0 \Rightarrow W_{\Pi} = \text{const}$$

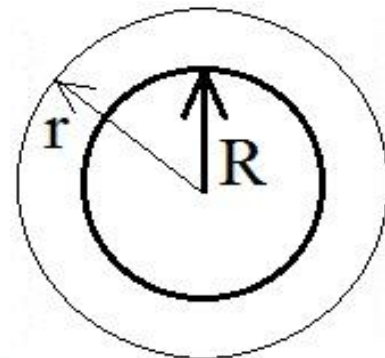
$$E = \frac{F}{q_{\text{пробный}}} \text{ напряженность электрического поля}$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} = k \frac{Q}{r^2} \text{ напряженность электрического поля точечного заряда}$$

$$E = 0 \text{ напряженность поля **внутри** заряженной проводящей сферы}$$

$$E = k \frac{Q}{r^2} \text{ напряженность поля **снаружи** заряженной проводящей сферы}$$

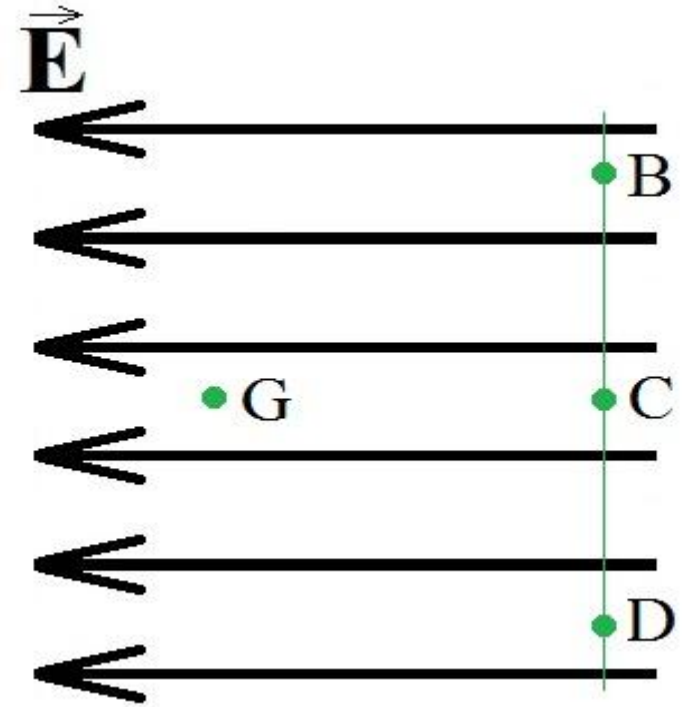
$$E = k \frac{Q}{R^2} \text{ напряженность поля **на поверхности** заряженной проводящей сферы}$$



# *Образцы заданий* *ЕГЭ*

**К содержанию**

**A1.** Выберите правильное соотношение разности потенциалов между точкой G и точками B, C и D в электростатическом однородном поле.



- 1)  $\varphi_G - \varphi_B = \varphi_G - \varphi_D > \varphi_G - \varphi_C$
- 2)  $\varphi_G - \varphi_B = \varphi_G - \varphi_D < \varphi_G - \varphi_C$
- 3)  $\varphi_G - \varphi_B = \varphi_G - \varphi_C = \varphi_G - \varphi_D < 0$
- 4)  $\varphi_G - \varphi_B = \varphi_G - \varphi_C = \varphi_G - \varphi_D > 0$

**A2.** Работа поля по перемещению заряда  $q = 10^{-5}$  Кл из одной точки в другую равна 10 Дж. Разность потенциалов между этими точками равна

1)  $10^{-4}$  В    2)  $10^4$  В    ③  $-10^6$  В    4)  $10^6$  В

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

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q} = \frac{10 \text{ Дж}}{10^{-5} \text{ Кл}} = -10^6 \text{ В}$$



**А3.** Для перемещения заряда  $10^6$  Кл из точки, потенциал которой равен 2 В, в точку, потенциал которой равен 6 В, надо совершить работу, равную

1)  $4 \cdot 10^{-6}$  Дж

2)  $4 \cdot 10^6$  Дж

3)  $-4 \cdot 10^{-6}$  Дж

4)  $-2 \cdot 10^6$  Дж

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

$$A = 10^6 \text{ Кл}(2\text{ В} - 6\text{ В}) = -4 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

# *Эквипотенциальные поверхности*

**К содержанию**

*Эквипотенциальные поверхности*

(лат. *экус* – равный) –

поверхности равного потенциала.

Силовые линии электростатического поля  
всегда перпендикулярны ЭкП.

## **Общие свойства геометрии электростатического поля:**

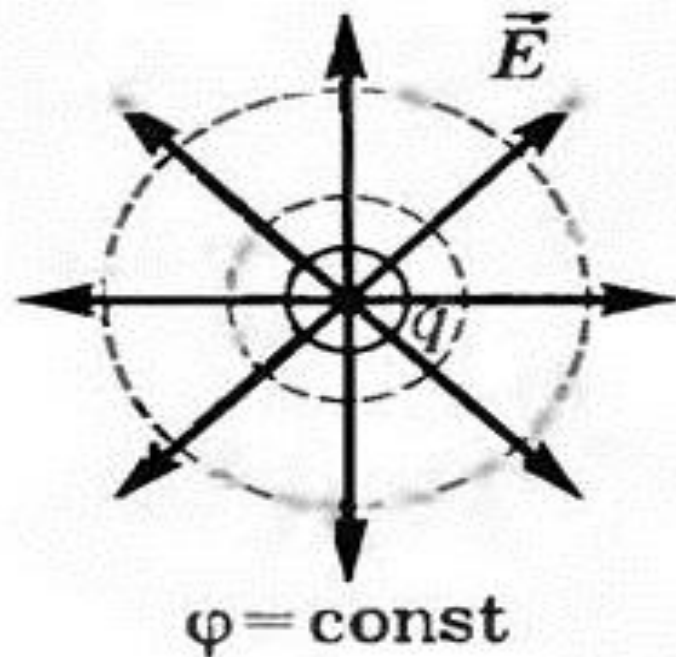
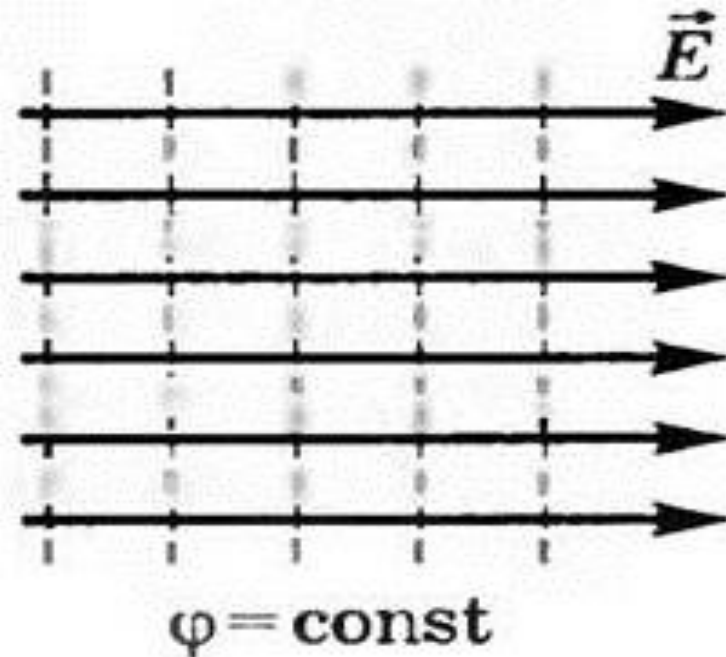
- 1) силовые линии начинаются на зарядах, и либо уходят на бесконечность, либо заканчиваются на других зарядах;
- 2) в потенциальном поле силовые линии не могут быть замкнуты. В противном случае можно было бы указать такой замкнутый контур, что работа электрического поля при перемещении заряда по этому контуру не равна нулю;
- 3) силовые линии пересекают любую эквипотенциаль по нормали к ней;
- 4) силовые линии нигде не пересекаются за исключением точек, где  $\vec{E} = 0$ .

Вектор напряжённости перпендикулярен  
ЭкП и направлен в сторону уменьшения  
потенциала.

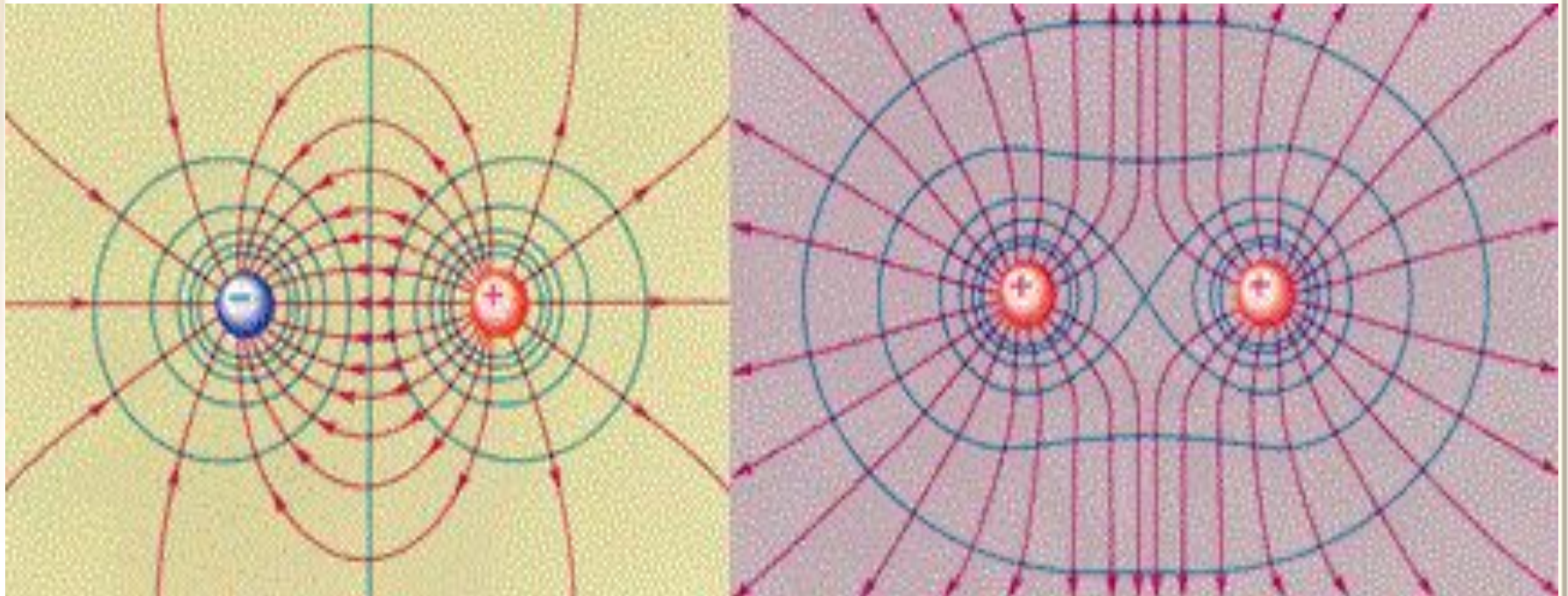
ЭкП строятся обычно так, что разность  
потенциалов между двумя соседними  
поверхностями постоянна.

ЭкП однородного поля расположены на  
равных расстояниях друг от друга.

ЭкП качественно характеризуют  
распределение поля в пространстве.  
ЭкП кулоновского поля точечного заряда –  
концентрические сферы.  
ЭкП однородного поля представляют собой  
плоскости.



**ЭкП** и **силовые линии** электрических полей электрического диполя и двух равных положительных зарядов.



$$\sigma = \frac{q}{S} \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} \right] \begin{array}{l} \text{поверхностная плотность} \\ \text{заряда} \end{array}$$

$$E = \frac{q}{S\epsilon_0} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \begin{array}{l} \text{напряженность поля} \\ \text{бесконечной заряженной} \\ \text{плоскости} \end{array}$$

Коэффициент 2 появляется, т.к. плоскость окружена двумя поверхностями площадью  $S$ .

Поле бесконечной заряженной плоскости не зависит от расстояния от плоскости!

Можно пользоваться, когда расстояние много меньше размеров плоскости.



# *Решение задач*

**К содержанию**

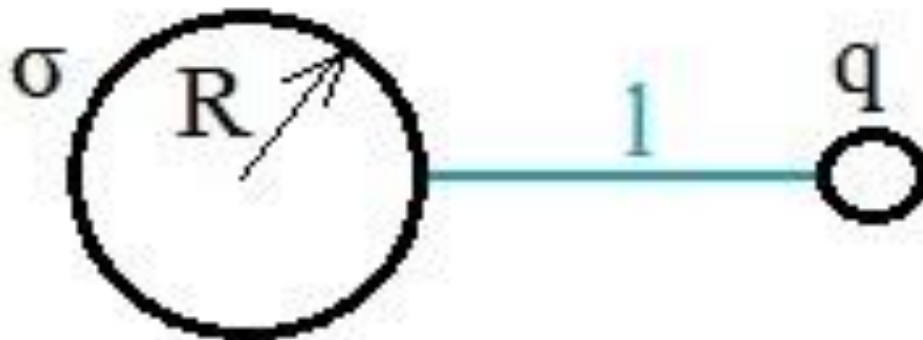
$$E_A = k \frac{q}{(R+l)^2} = \varphi_0 = k \frac{q}{R} \Rightarrow q = \frac{\varphi_0 R}{k}$$

**№1.** Определите значение напряжённости  $E_A$  и потенциала  $\varphi_A$  поля в точке А, находящейся на расстоянии  $l = 20$  см

от поверхности заряженной проводящей сферы радиусом  $R = 10$  см, если потенциал сферы  $\varphi_0 = 240$  В.

$$\varphi_A = \frac{k \varphi_0 R}{R+l} = \frac{\varphi_0 R}{R+l} = \frac{240 \text{ В} \cdot 0.1 \text{ м}}{0.1 \text{ м} + 0.2 \text{ м}} = 80 \text{ В}$$

**№2.** Какую работу необходимо совершить, чтобы перенести заряд  $q = 3 \cdot 10^{-8}$  Кл из бесконечности в точку, находящуюся на расстоянии  $l = 90$  см от поверхности сферы радиусом  $R = 10$  см, если поверхностная плотность заряда сферы  $\sigma = 2 \cdot 10^{-6}$  Кл/м<sup>2</sup>?



Работа, совершаемая при перенесении заряда  $q$  из бесконечности в точку 1, равна увеличению потенциальной энергии заряда

$$A = \Delta W_{\Pi} = W_{\Pi 1} - W_{\Pi \infty}$$

$$\left. \begin{array}{l} S = 4\pi R^2 \\ \sigma = \frac{q}{S} \end{array} \right\} \Rightarrow q = \sigma \cdot 4\pi R^2$$

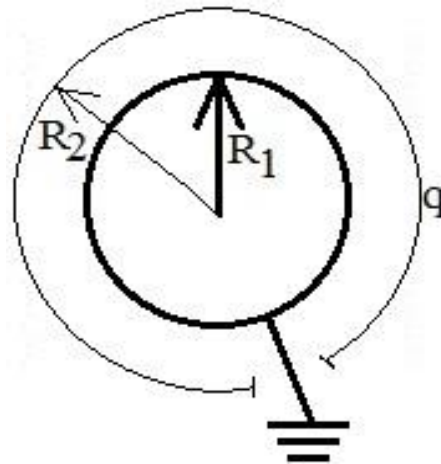
$$\varphi_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R+l} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma \cdot 4\pi R^2}{R+l} = \frac{\sigma R^2}{\epsilon_0 (R+l)}$$

$$A = q\varphi_1 = \frac{q\sigma R^2}{\epsilon_0 (R+l)} = \frac{3 \cdot 10^{-8} \text{ Кл} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} \cdot (0.1 \text{ м})^2}{8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} (0.1 \text{ м} + 0.9 \text{ м})} =$$

$$= 0.00677 \cdot 10^{-2} \text{ Дж} = 68 \text{ мкДж}$$

**№3.** Металлический шарик радиусом  $R_1 = 20$  см окружили тонкой сферической заряженной оболочкой, радиус которой  $R_2 = 40$  см и заряд  $q = 2 \cdot 10^{-6}$  Кл.

Определите потенциал оболочки и заряд шарика после того, как его заземлили.



После заземления шарика в системе будет происходить перетекание заряда до тех пор, пока потенциал шарика не станет равным нулю.

$$\varphi = k \frac{q_{ш}}{R_1} + k \frac{q}{R_2} = 0 \Rightarrow k \frac{q_{ш}}{R_1} = -k \frac{q}{R_2}$$

$$q_{ш} = -\frac{qR_1}{R_2} = -\frac{2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \cdot 0.2 \text{ м}}{0.4 \text{ м}} = 10^{-6} \text{ К}$$

$$\varphi_{оболочки} = k \frac{q_{ш}}{R_2} + k \frac{q}{R_2} = \frac{k}{R_2} \left( -\frac{qR_1}{R_2} + q \right) = \frac{qk}{R_2} \left( 1 - \frac{R_1}{R_2} \right)$$

$$\varphi_{оболочки} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \cdot 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}}{0.4 \text{ м}} \left( 1 - \frac{0.2 \text{ м}}{0.4 \text{ м}} \right) = 22.5 \text{ кВ}$$

**№4.** К закреплённому заряженному шарiku зарядом  $+q$  движется протон.

На расстоянии  $r = r_1$  скорость протона  $v_1$ .

Определите, на какое минимальное расстояние приблизится протон к шарiku.

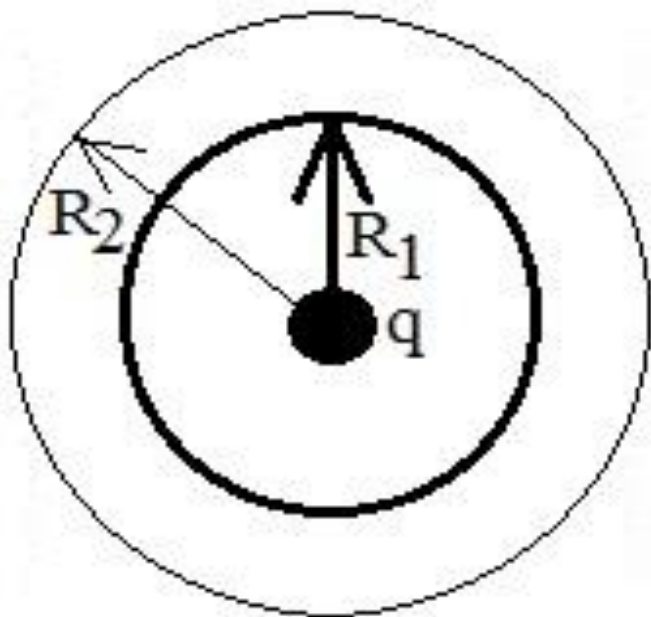
$$W_1 = k \frac{qq_p}{r_1} + \frac{mv_1^2}{2}$$

$$W_2 = k \frac{qq_p}{r_{\min}}$$

$$W_1 = W_2 \Rightarrow \frac{kqq_p}{r_1} + \frac{mv_1^2}{2} = \frac{kqq_p}{r_{\min}}$$

$$r_{\min} = \frac{kqq_p}{\frac{kqq_p}{r_1} + \frac{mv_1^2}{2}}$$

**№5.** В центр незаряженной металлической сферической оболочки с внутренним радиусом  $R_1$  и внешним радиусом  $R_2$  помещают заряд  $q$ . Определите напряжённость и потенциал поля как функции расстояния от центра сферы.

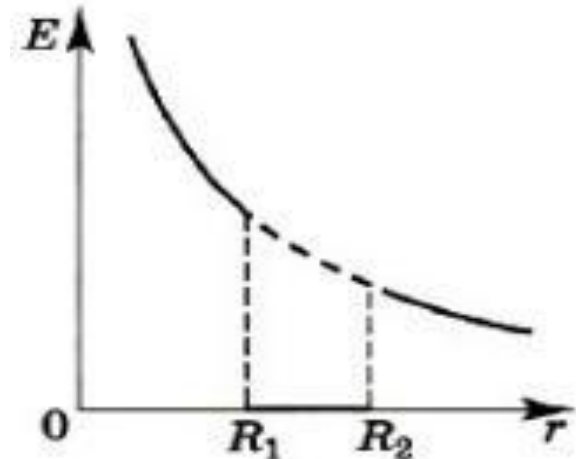




Если заряд находится в центре,  
на внутренней поверхности металлической оболочки  
индуцируется заряд противоположного знака,  
а на внешней – того же знака, что и заряд  $q$ .  
Сумма индуцированных зарядов равна нулю.  
Силовые линии поля начинаются на заряде  $q$  и  
заканчиваются на внутренней поверхности оболочки,  
затем опять начинаются на внешней  
поверхности оболочки.  
Напряжённость ЭП внутри проводника равна нулю.

$$E = k \frac{q}{r^2}, r \leq R_1, r \geq R_2$$

$$E = 0, R_1 < r < R_2$$



Картина силовых линий поля данной системы аналогична картине силовых линий поля точечного заряда за исключением области, занимаемой оболочкой.

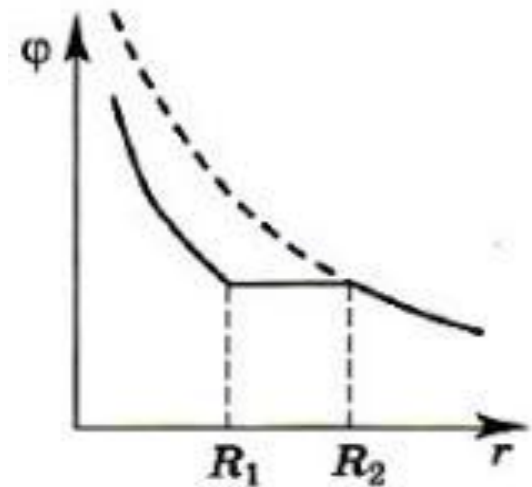
Здесь силовые линии терпят разрыв.

Согласно принципу суперпозиции потенциал любой точки поля складывается из потенциала поля заряда  $q$ , проводящей сферы радиусом  $R_1$ , с зарядом  $-q$  и проводящей сферы радиусом  $R_2$  с зарядом  $+q$ .

$$\varphi = k \frac{q}{r} - k \frac{q}{R_1} + k \frac{q}{R_2}, r < R_1$$

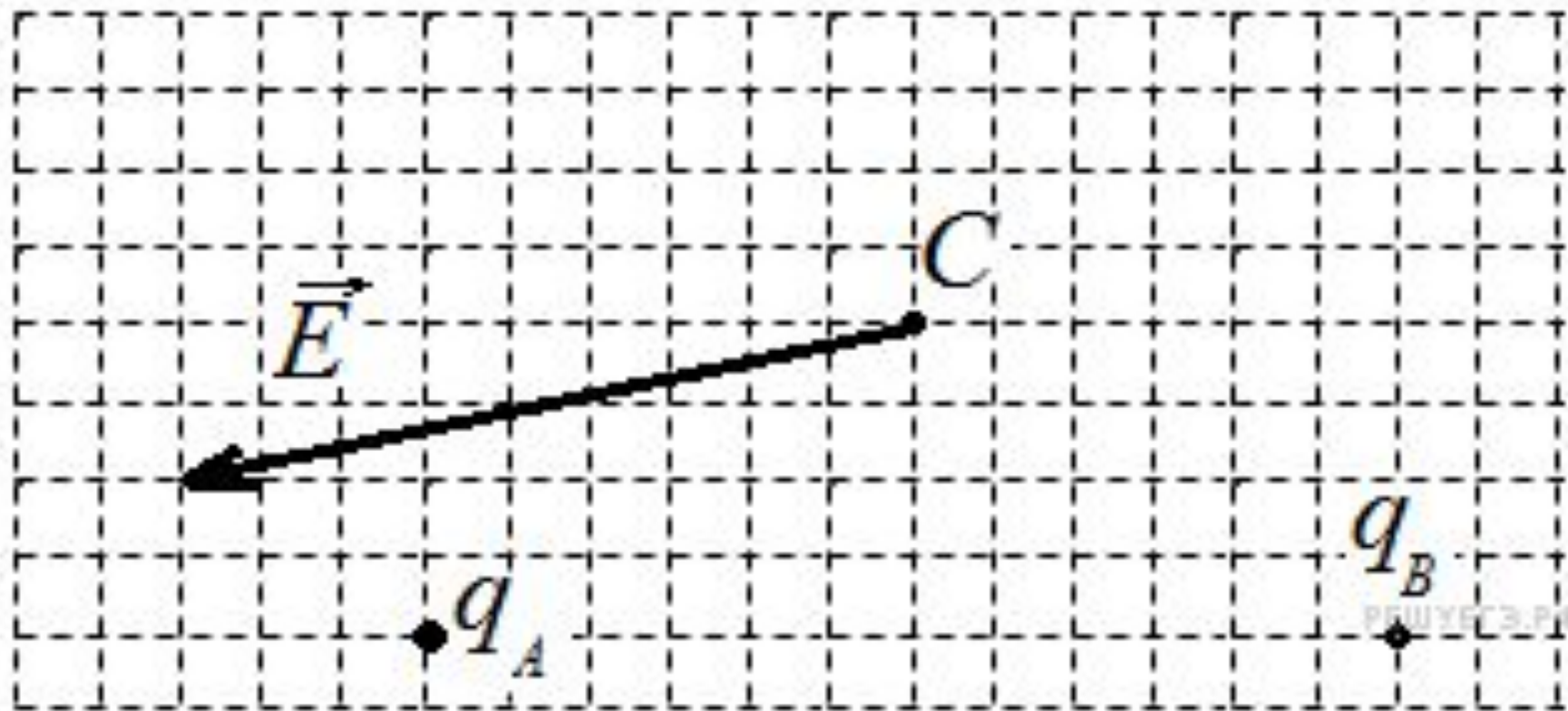
$$\varphi = k \frac{q}{r} - k \frac{q}{r} + k \frac{q}{R_2} = k \frac{q}{R_2}, R_1 < r < R_2$$

$$\varphi = k \frac{q}{r} - k \frac{q}{r} + k \frac{q}{r} = k \frac{q}{r}, r > R_2$$

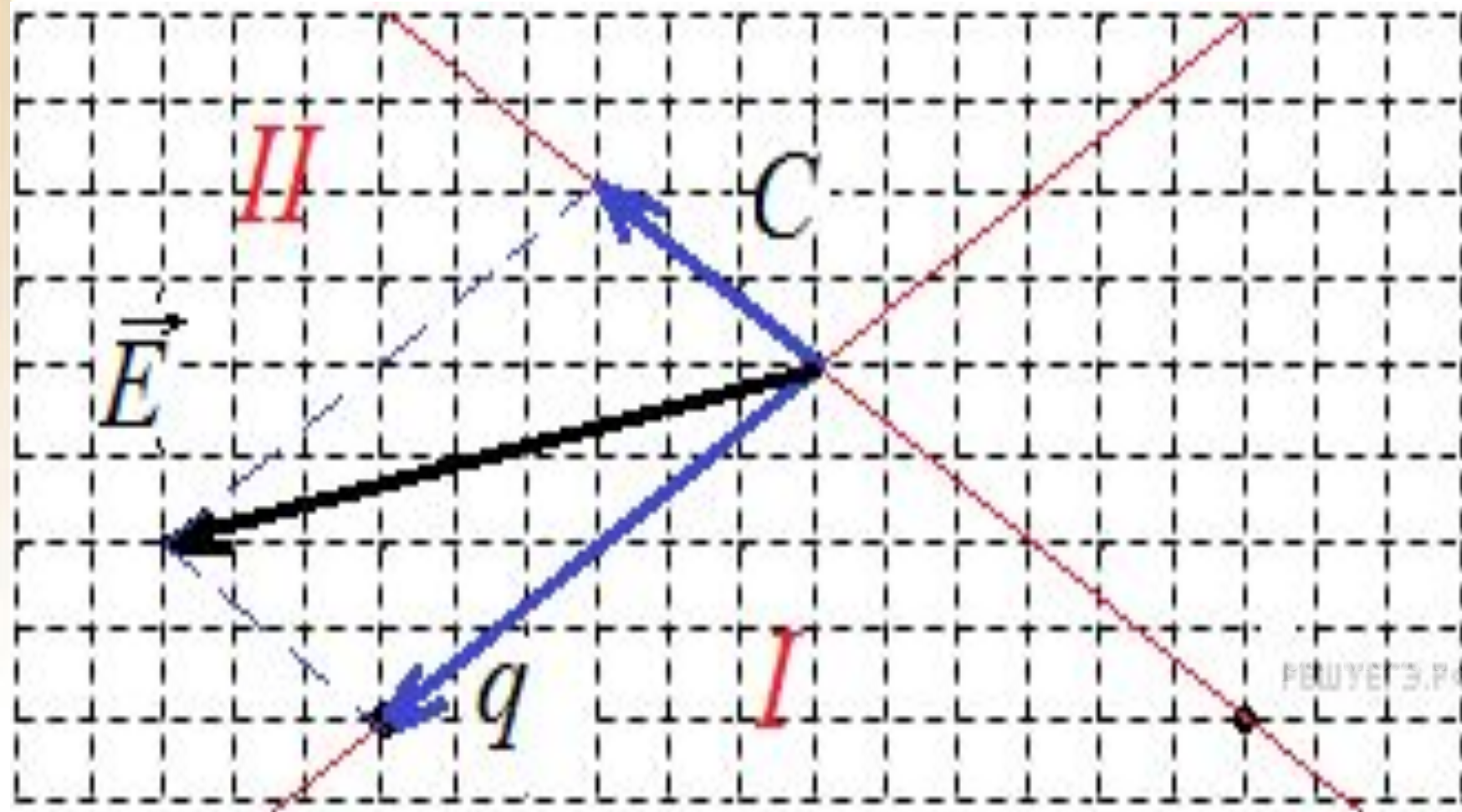


№6. На рисунке изображен вектор напряженности  $E$  электрического поля в точке  $C$ , которое создано двумя неподвижными точечными зарядами  $q_A$  и  $q_B$ .

Чему равен заряд  $q_B$ , если заряд  $q_A = -2$  нКл?



Вектор напряженности электрического поля в точке  $C$ , по принципу суперпозиции, есть векторная сумма полей, создаваемых зарядами  $A$  и  $B$  по отдельности.



зарядом  $A$ , в 2 раза больше.

$$E = E_1 - E_2$$

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} = \frac{kq_1}{R^2} = \frac{4kq_1}{R^2}$$

№74. Между двумя точечными зарядами  $+4 \cdot 10^{-9}$  Кл и  $-5 \cdot 10^{-9}$  Кл

расстояние равно 0.6 м.

$$E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} = \frac{kq_2}{R^2}$$

Найдите напряженность поля в средней точке между зарядами.

$$E = \frac{4kq_1}{R^2} - \frac{4kq_2}{R^2} = \frac{4k}{R^2} (q_1 - q_2)$$

$$E = \frac{4 \cdot 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}}{(0.6 \text{ м})^2} (4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} + 5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}) = 900 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

1) №8. В однородном поле напряженностью 60 кВ/м переместили заряд 5 нКл.

$$U = Ed \cos \alpha = 6 \cdot 10^4 \frac{В}{Кл} \cdot 0,2 м \cdot 0,5 = 6 \cdot 10^3 В$$

Вектор перемещения равен по модулю 20 см и образует угол  $60^\circ$  с направлением силовой линии.

$$A = qU = 5 \cdot 10^{-9} Кл \cdot 6 \cdot 10^3 В = 3 \cdot 10^{-5} Дж$$

Найдите работу поля, изменение потенциальной энергии взаимодействия

$$U = 6 \cdot 10^3 В \quad \text{заряда и поля}$$

и напряжение между начальной и конечной точками перемещения.

$$A = -3 \cdot 10^{-5} Дж$$

Дайте ответы на те же вопросы для случая перемещения отрицательного заряда.

№9. В вертикально направленном однородном электрическом поле находится пылинка массой  $1 \cdot 10^{-9}$  г и зарядом  $3.2 \cdot 10^{-17}$  Кл.

Какова напряженность поля, если сила тяжести пылинки уравновешена силой электрического поля?

$$F_{\text{тяж}} = F_{\text{эл}}$$

$$mg = qE$$

$$E = \frac{mg}{q} = \frac{1 \cdot 10^{-12} \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}}{3.2 \cdot 10^{-17} \text{ Кл}} = 3.125 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$$



$$F_{\text{тяж}} = F_{\text{эл}} \Rightarrow mg = qE$$

**№10.** Каков диаметр масляной капли  
 $\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho V = \rho \frac{\pi d^3}{6}$   
 плотностью 900 кг/м<sup>3</sup>,

которую с помощью одного лишнего  
 $\rho \frac{\pi d^3}{6} \cdot g = qE$   
 электрона можно уравновесить в поле

напряженностью 10 000 В/м?

$$d = \sqrt[3]{\frac{6qE}{\rho\pi g}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^4 \frac{\text{В}}{\text{м}}}{900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 3.14 \cdot 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}}} \approx 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

# *Образцы заданий* *ЕГЭ*

**К содержанию**

**A1.** Заряженная пылинка движется между двумя одинаковыми заряженными вертикальными пластинами, расположенными напротив друг друга. Разность потенциалов между пластинами 500 В, масса пылинки столь мала, что силой тяжести можно пренебречь. Какую кинетическую энергию приобретает пылинка при перемещении от одной пластины до другой, если её заряд 4 нКл?

- 1) 2 мкДж      3) 4 мкДж  
2) 1 мкДж      4) 0.08 мкДж

$$W_k = A = Uq$$

$$W_k = 5 \cdot 10^2 \text{ В} \cdot 4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Дж} = 2 \text{ мкДж}$$

**A2.** Заряженная пылинка движется вертикально между двумя одинаковыми горизонтальными пластинами размером  $5 \times 5$  см, расположенными напротив друг друга на расстоянии 0.5 см, разность потенциалов между которыми 300 В. Её кинетическая энергия при перемещении от одной пластины до другой изменяется на 1.5 мкДж. Чему равен заряд пылинки? Силу тяжести не учитывайте.

1) 10 нКл 2) 1,5 нКл **3) 5 нКл** 4) 0,25 нКл

$$W_k = A = Uq \Rightarrow q = \frac{W}{U}$$

$$q = \frac{1.5 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}}{3 \cdot 10^2 \text{ В}} = 0.5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} = 5 \text{ нКл}$$

$E = \frac{F}{q} \rightarrow F = Eq$   
 $Ea = ma \rightarrow m = \frac{Eq}{a}$   
 С3. Песчинка, имеющая заряд  $10^{-11}$  Кл,

влетела в однородное электрическое поле  
 вдоль его силовых линий с начальной  
 скоростью  $0.4 \text{ м/с}$  и переместилась на

расстояние 4 см. Чему равна масса  
 песчинки, если её скорость

увеличилась на  $0.2 \text{ м/с}$  при  
 напряженности поля  $10^5 \text{ В/м}$ ?

Силу тяжести не учитывайте

$$= 1 \cdot 10^{-6} \text{ кг} = 1 \text{ мкг}$$

# *Пробой диэлектрика*

**К содержанию**

При электризации двух проводников между ними  
появляется электрическое поле  
и возникает разность потенциалов.

С увеличением заряда проводников электрическое  
поле между ними усиливается.

В сильном электрическом поле возможен так  
называемый *пробой* диэлектрика:  
между проводниками проскакивает искра,  
и они разряжаются.

Чем меньше увеличивается напряжение и  
напряжённость поля между проводниками  
с увеличением их зарядов,  
тем больший заряд можно на них накопить.





## *Электрический пробой –*

явление резкого возрастания силы тока в твёрдом, жидком или газообразном диэлектрике, возникающее при приложении напряжения выше критического (напряжение пробоя);

резкое падение их электрического сопротивления при достаточно высоком приложенном к образцу напряжении.

Электрический пробой отличается от теплового тем, что на подготовительной стадии пробоя ни разогрев, ни химические процессы не имеют существенного значения, а также малым временем развития пробоя (порядка  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  с), слабой зависимостью пробивного напряжения от температуры. Обусловлен ударной ионизацией атомов и молекул электронами.

## *Тепловой пробой –*

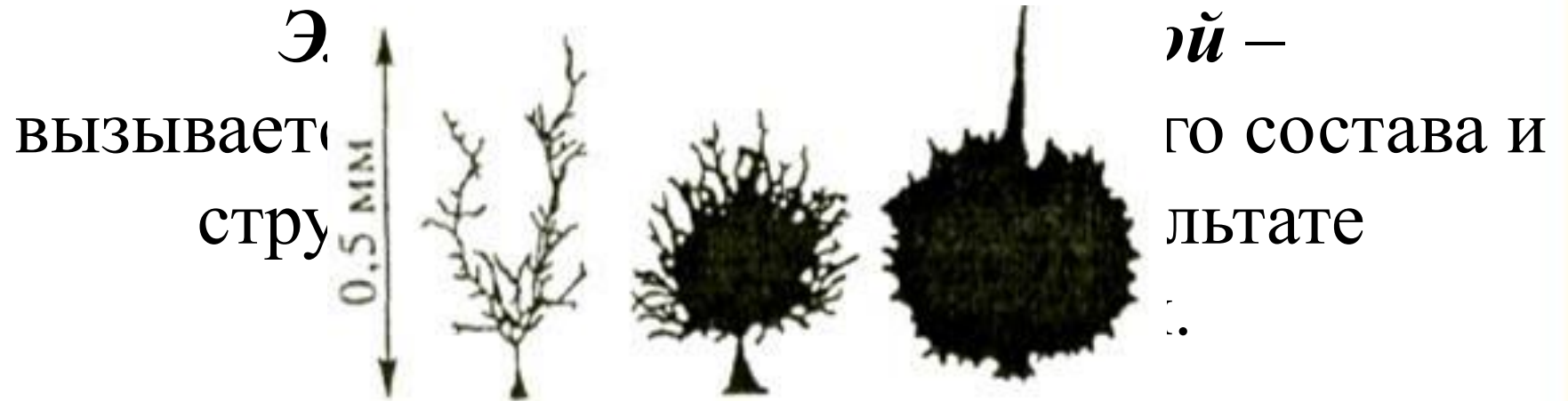
это необратимый вид пробоя р-п-перехода, являющийся следствием увеличения обратного напряжения;

резкое увеличение электропроводности при прохождении через него ЭТ, обусловленное джоулевым разогревом и нарушением теплового равновесия образца с окружающей средой.

Возникает при повышенной проводимости твердых диэлектриков и больших диэлектрических потерях, а также при подогреве диэлектрика посторонними источниками тепла или при плохом теплоотводе.

Необходимым условием является резкое возрастание проводимости с ростом температуры.

Незначительная в первый момент (комнатная температура) проводимость вследствие выделения джоулева тепла приводит к небольшому повышению температуры, вследствие чего проводимость увеличивается.



В монослойной полимерной изоляции электрическое старение обусловлено образованием ветвистых каналов неполного пробоя, называемых *электрическими дендритами*, которые под действием частичного разряда постепенно прорастают в направлении от одного электрода к другому

Наблюдается при постоянном и переменном напряжении низкой частоты, когда в материале развиваются процессы, обуславливающие необратимое уменьшение сопротивления изоляции (электрохимическое старение).

Может иметь место при высоких частотах, если в закрытых порах материала происходит ионизация газа, сопровождающаяся тепловым эффектом и восстановлением, например, в керамике, окислов металлов переменной валентности.

***Поверхностный пробой*** –  
пробой газа или жидкости вблизи  
поверхности твердого диэлектрика.

Электрическая прочность  
твердого диэлектрика не нарушается,  
однако образование проводящего канала  
на поверхности существенно  
ограничивает рабочие напряжения  
изолятора.

***Пробивное напряжение*** –  
величина напряжения, при котором  
происходит пробой диэлектрика.

***Электрическая прочность***  
(пробивная напряжённость) –  
характеристика диэлектрика,  
минимальная напряжённость  
электрического поля,  
при которой наступает электрический  
пробой.



Для равномерного электрического поля электрическая прочность диэлектрика определяется по формуле

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{d}$$

где  $d$  – толщина диэлектрика в месте пробоя, м.

# *Электроёмкость. Конденсатор*

[К содержанию](#)

***Електроёмкость*** –  
физическая величина, характеризующая  
способность проводников накапливать  
электрический заряд.

***Електроёмкость двух проводников*** –  
отношение заряда одного из проводников  
к разности потенциалов между ними.

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

Чем больше ёмкость, тем больший заряд скапливается на проводниках при одном и том же напряжении.

Ёмкость **не зависит** от сообщённых проводникам зарядов, от возникающего между ними напряжения, от рода вещества.

Ёмкость **зависит** от его формы и размеров проводника, а также от наличия вблизи других проводников или диэлектриков.

## 1 фарад –

это электроёмкость двух проводников в том случае, если при сообщении им зарядов +1 Кл и -1 Кл между ними возникает разность потенциалов 1 В.

$$1\Phi = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}} = \frac{A^2 \cdot c^4}{кг \cdot м^2}$$

$$1\text{мк}\Phi = 1 \cdot 10^{-6} \Phi$$

$$1\text{н}\Phi = 1 \cdot 10^{-9} \Phi$$

$$1\text{п}\Phi = 1 \cdot 10^{-12} \Phi$$

## *Конденсатор*

(лат. *condensare* – «сгущать»,  
лат. *condensatio* – «накопление»)

- двухполюсник с постоянным или переменным значением ёмкости и малой проводимостью;
- устройство для накопления заряда и энергии электрического поля.

*Лейденская банка* –  
первый электрический конденсатор.

Изобретён голландским учёным  
Питером ван Мушенбруком и его  
учеником Кюнеусом в 1745 г. в Лейдене.

Параллельно и независимо от них  
сходный аппарат под названием  
«медицинская банка» изобрёл немецкий  
учёный Эвальд Юрген фон Клейст.





**Эвальд Юрген  
фон Клейст**  
(10.06.1700 – 11.12.1748)



Немецкий физик, юрист,  
лютеранский клирик,  
один из создателей первого конденсатора.

11 октября 1745 г. самостоятельно изобрёл  
«медицинскую банку»,  
которая может хранить электрический заряд  
в больших количествах.

В конце 1745 г. сообщил о своем открытии группе  
немецких учёных.

Новость была передана в Лейденский университет,  
где была тщательно исследована.

Изобретение стало более известно как «лейденская  
банка» благодаря труду  
Питера ван Мушенбрука.

**Питер ван  
Мушенбрук**

(14.03.1692 – 19.09.1761)



Голландский физик,  
один из создателей первого конденсатора.

Провел первые опыты по тепловому расширению  
твёрдых тел,  
в 1731 г. изобрел для этих целей пирометр, который  
позже использовал для определения температуры  
плавления ряда металлов.

В 1751 г. построил таблицы удельных весов  
многих веществ.

Занимался исследованием прочности строительных  
материалов, проблемой поглощения света различных  
цветов в воздухе.

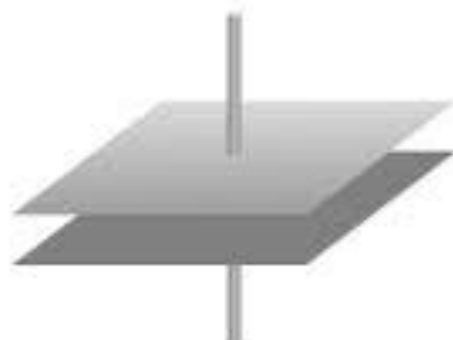
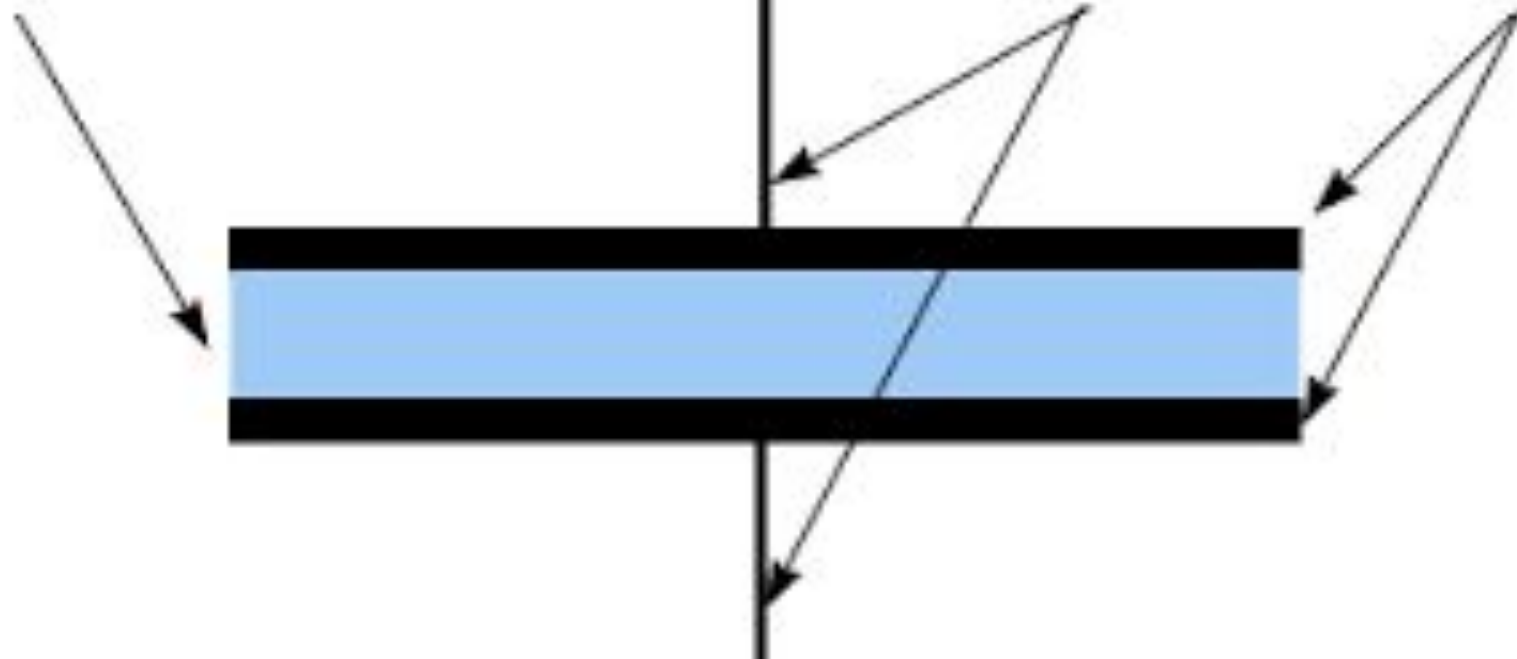
В простейшем варианте конденсатор  
состоит из:  
двух электродов в форме пластин,  
разделённых диэлектриком,  
толщина которого мала по сравнению с  
размерами обкладок

*Обкладки* –  
проводники конденсатора  
(электроды).

Диэлектрик

Выводы

Обкладки



Устройство  
плоского конденсатора



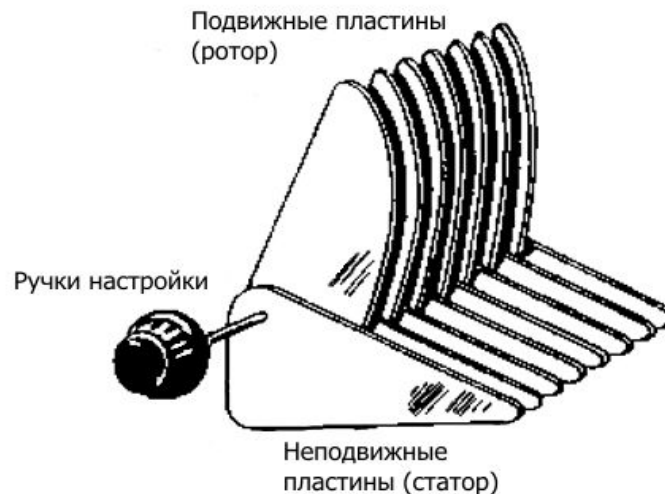
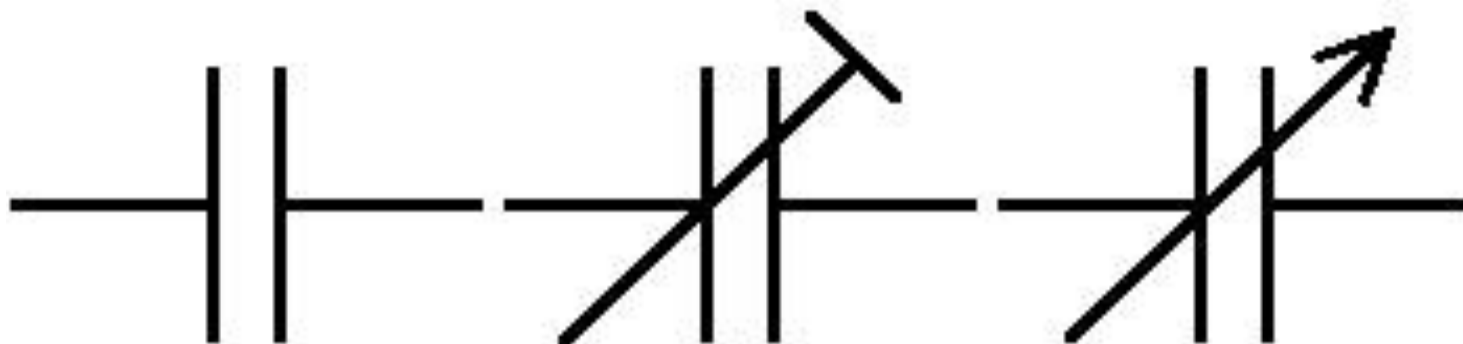
Обозначение  
конденсатора на схеме

# Конденсаторы различаются по возможности изменения своей ёмкости:

постоянные

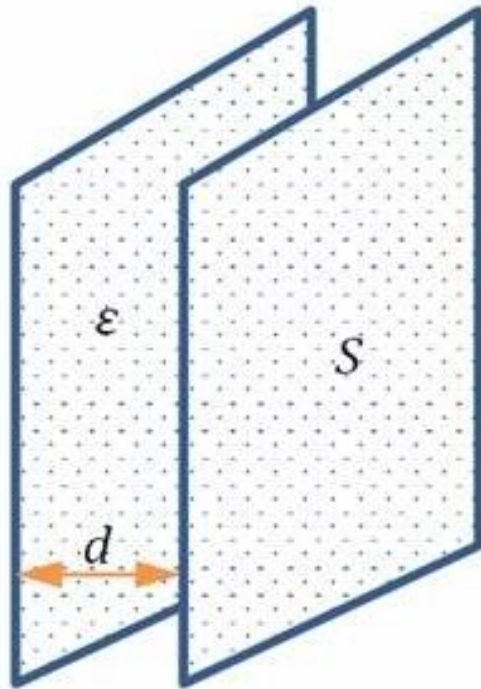
переменные

подстроечные



# Конденсаторы различаются по форме

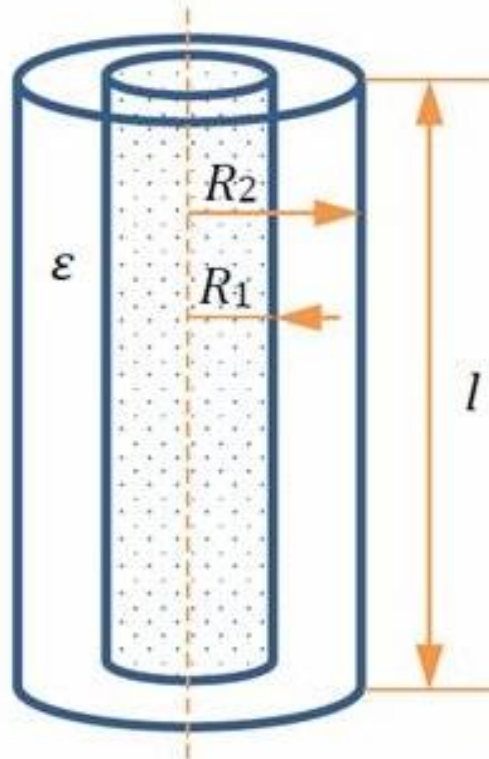
Плоский



$d \ll$  размеров пластин

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

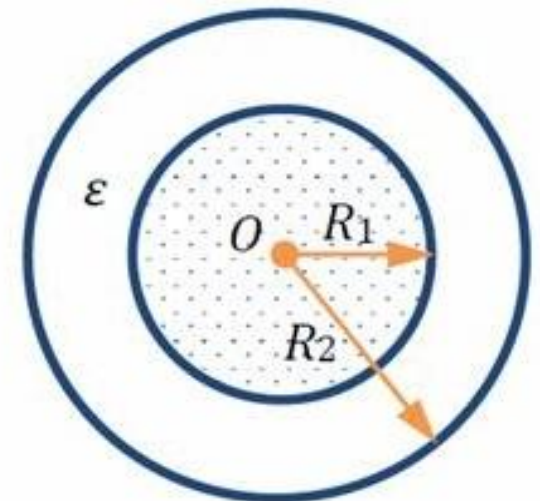
Цилиндрический



$R_2 - R_1 \ll l$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$

Сферический

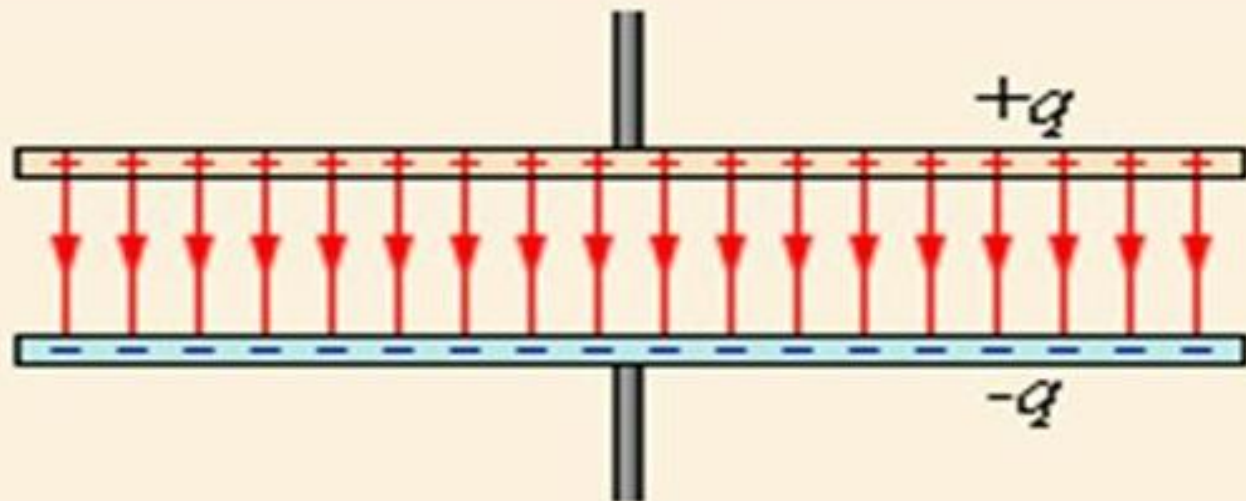


$$C = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$

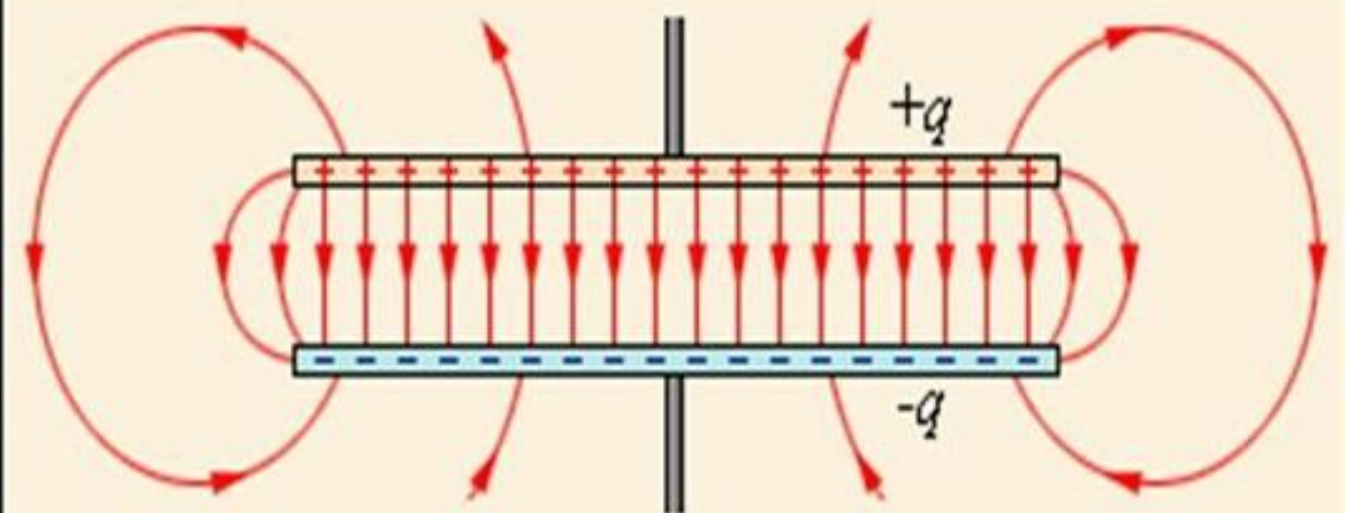


Между обкладками находится диэлектрик, т.е. заряженные частицы не могут «перескочить» на противоположную сторону конденсатора. Тем не менее, электроны передвигаются от источника питания до пластины конденсатора. Поэтому в цепи идет электрический ток.



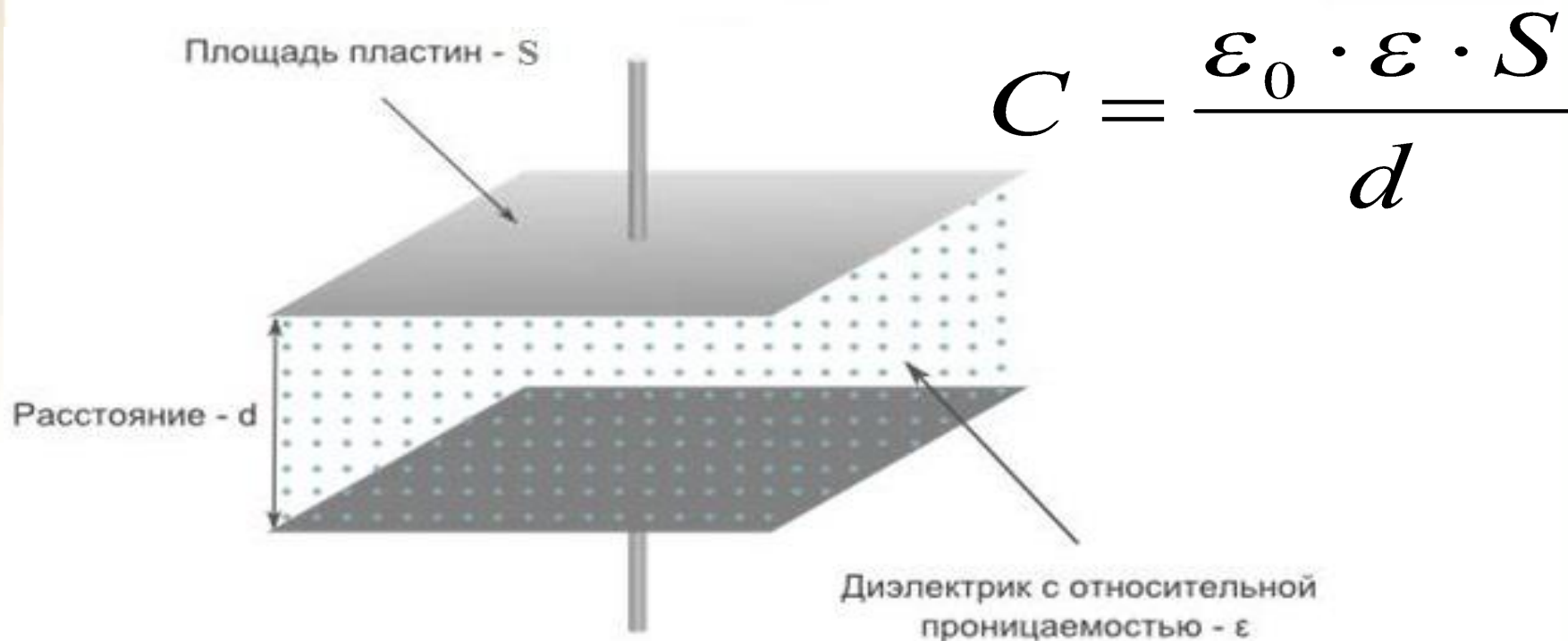


Идеализированное  
представление поля  
плоского  
конденсатора



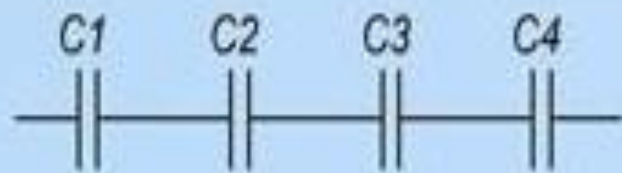
Поле  
плоского  
конденсатора

Емкость плоского конденсатора зависит от площади пластин  $S$ , расстояния между пластинами  $d$  и относительной диэлектрической проницаемости вещества между пластинами  $\epsilon$ .

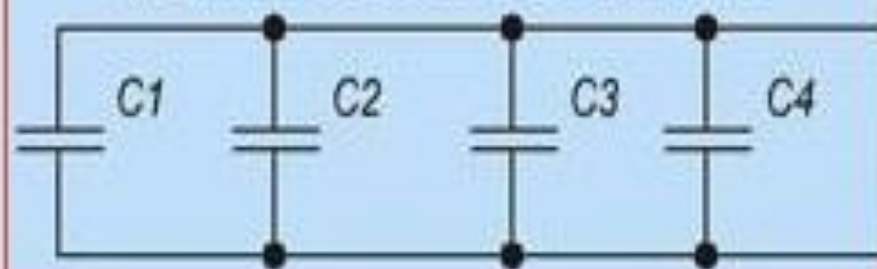


## Соединение конденсаторов

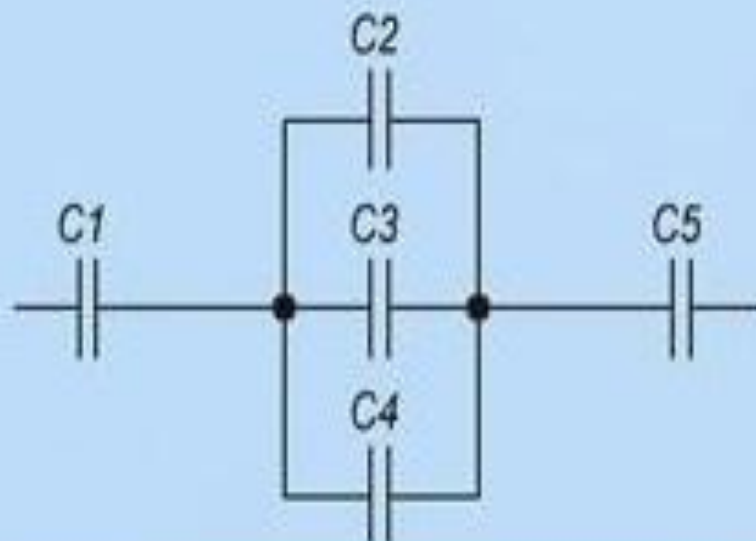
### Последовательное соединение



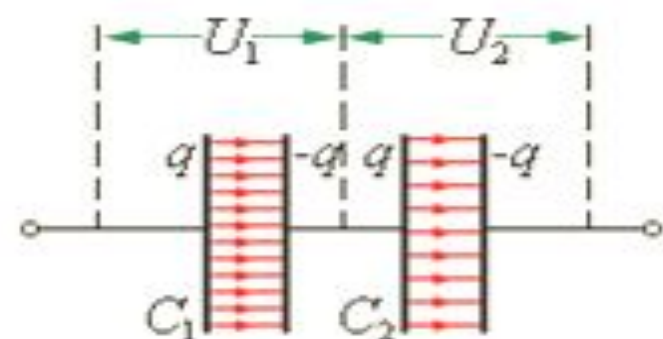
### Параллельное соединение



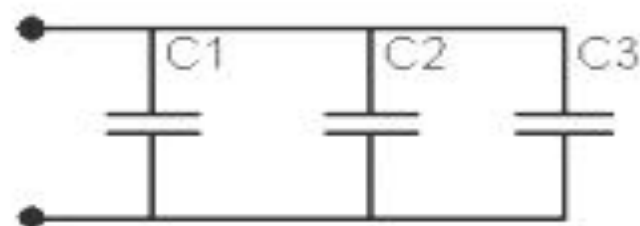
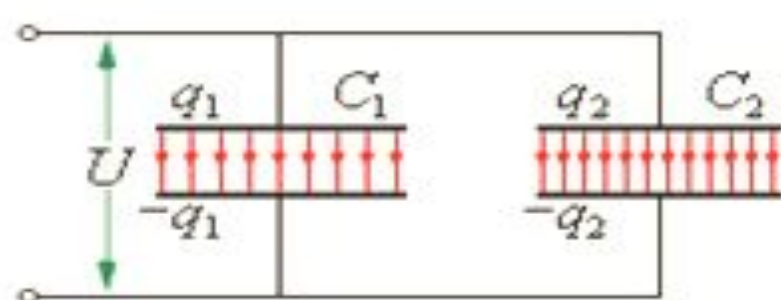
### Смешанное соединение



## Последовательное соединение



## Параллельное соединение



$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_i$$

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_i$$

$$q = q_1 = q_2 = \dots = q_i$$

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_i$$

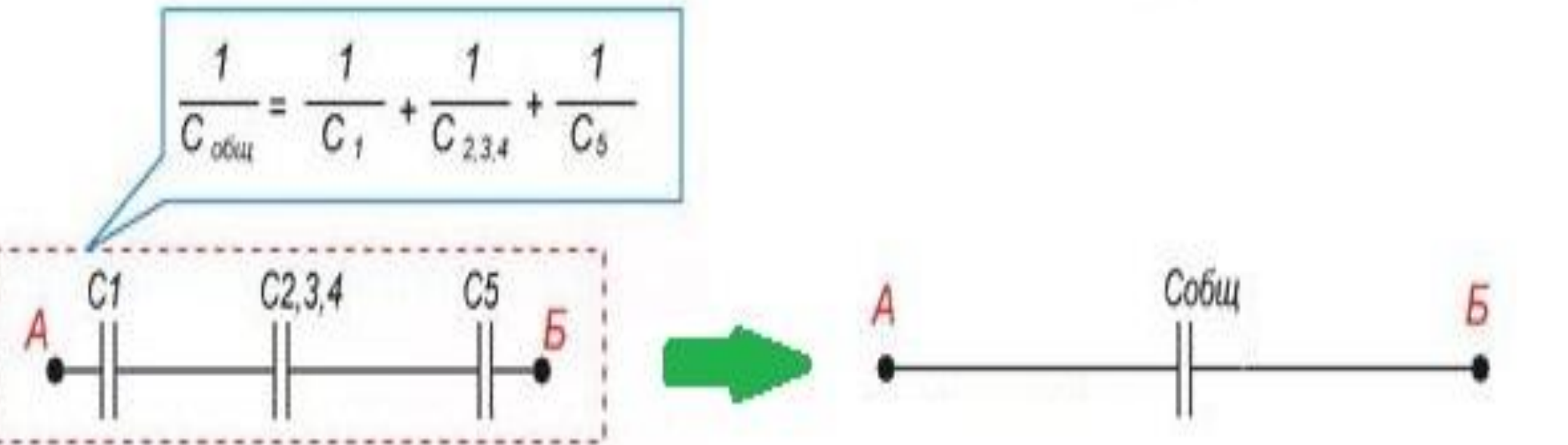
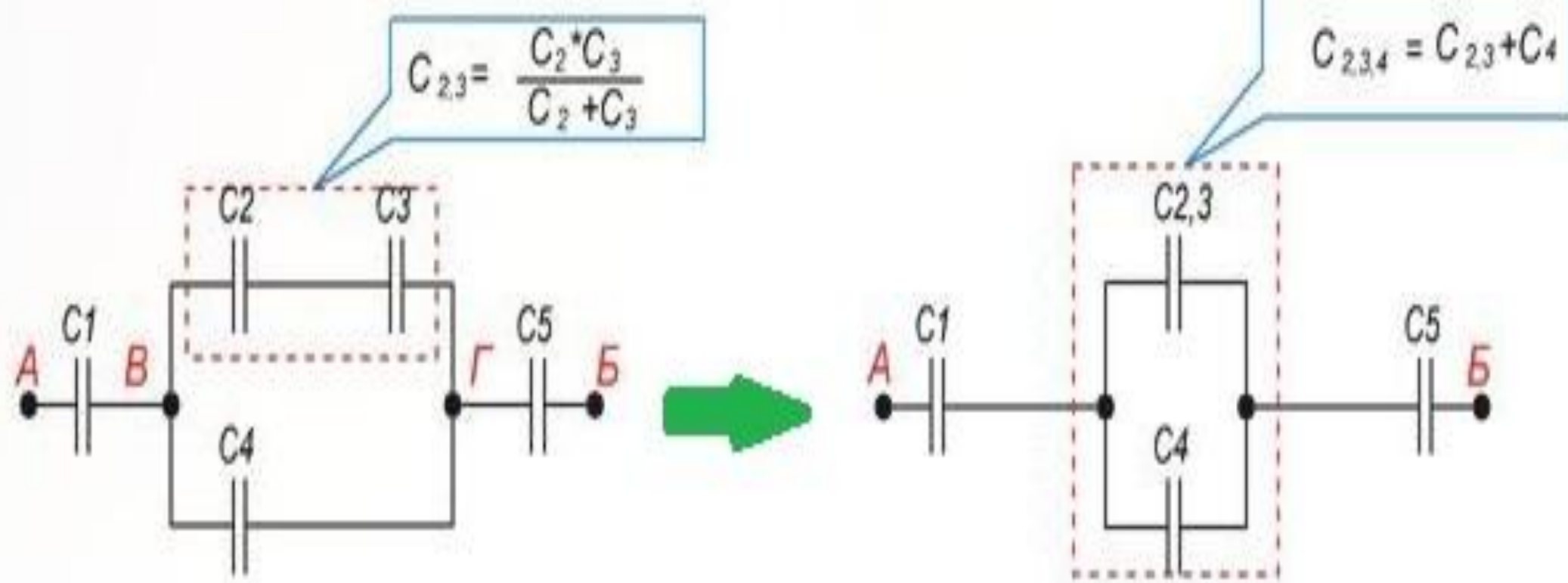
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_i}$$

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_i$$

***Определить эквивалентную  
электроёмкость —***

это значит определить электроёмкость  
такого конденсатора,  
который при той же разности  
потенциалов будет накапливать тот же  
заряд  $q$ , что и система конденсаторов.





# Применение конденсаторов

Фильтрующий конденсатор используется для снятия сигнала с сенсора, который передаёт его в форме изменяющегося напряжения.

Примерами таких сенсоров являются микрофон или активная Wi-Fi антенна.

Колебательные контуры электронной аппаратуры. Их работа основана на том, что при включении конденсаторов в совокупности с катушкой индуктивности в цепи возникают периодические напряжения и токи.

Конденсатор улучшает параметры усилителя и качество звучания сабвуфера.



## Применение конденсаторов

Формирователи импульсов, таймеры,  
аналоговые вычислительные устройства.

В работе этих систем используется зависимость времени  
заряда конденсатора от величины емкости.

Выпрямители с умножением напряжения, применяемые в том  
числе в рентгентехнических установках, лазерах,  
ускорителях заряженных частиц.

Здесь важнейшую роль играет свойство емкостного  
компонента накапливать энергию,  
сохранять и отдавать ее.

В фотовспышках – электрическая энергия,  
накопленная в конденсаторе, преобразуется в световую  
энергию газового разряда.

***Ионистор*** (суперконденсатор) – это энергонакопительный конденсатор, заряд в котором накапливается на границе раздела двух сред - электрода и электролита.

Энергия в ионисторе содержится в виде статического заряда. Накопление совершается, если к его обкладкам будет приложена разность потенциалов (постоянное напряжение).

Обычный конденсатор представляет собой обкладки из фольги, разделенные сухим сепаратором, а ионистор – это комбинация конденсатора с электрохимической батареей.

Для того чтобы зарядить конденсатор, нужно совершить работу по разделению положительных и отрицательных зарядов.

Согласно закону сохранения энергии эта работа не пропадает, а идёт на увеличение энергии конденсатора.

$$\left. \begin{array}{l} W_{\Pi} = \frac{qEd}{2} \\ U = Ed \\ C = \frac{q}{U} \end{array} \right\} \Rightarrow W_{\Pi} = \frac{qU}{2} \left\{ \Rightarrow W_{\Pi} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} \right.$$

Согласно теории близкодействия вся энергия взаимодействия заряженных тел сконцентрирована в электрическом поле этих тел. Т.е. энергия может быть выражена через основную характеристику поля – напряжённость.

$$\left. \begin{array}{l} W_{\Pi} = \frac{CU^2}{2} \\ U = Ed \end{array} \right\} \Rightarrow W_{\Pi} = \frac{CE^2 d^2}{2}$$

$$W_{\Pi} \sim E^2$$

# *Образцы заданий* *ЕГЭ*

**К содержанию**

**A1.** Как изменится энергия электрического поля конденсатора, если заряд на его обкладках уменьшить в 2 раза?

- 1) не изменится
- 2) уменьшится в 2 раза
- 3) уменьшится в 4 раза
- 4) увеличится в 2 раза

$$W_{\Pi 1} = \frac{q^2}{2C}, W_{\Pi 2} = \frac{\left(\frac{q}{2}\right)^2}{2C} = \frac{q^2}{8C}$$

$$\frac{W_{\Pi 2}}{W_{\Pi 1}} = \frac{q^2}{8C} \cdot \frac{2C}{q^2} = \frac{1}{4} \Rightarrow W_{\Pi 2} = \frac{W_{\Pi 1}}{4}$$

**A2.** Конденсатор подключён к источнику постоянного напряжения. Как изменится энергия электрического поля внутри конденсатора, если увеличить в 2 раза расстояние между обкладками конденсатора?

1) не изменится

2) увеличится в 2 раза

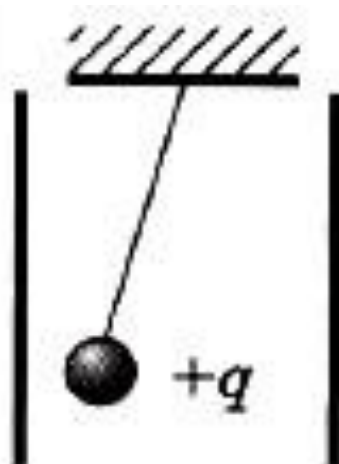
3) уменьшится в 2 раза

4) правильный ответ не приведён

$$W_{\Pi} = \frac{CU^2}{2}, C = \frac{\epsilon A}{d} \Rightarrow W_{\Pi} = \frac{\epsilon AU^2}{2d}$$

$$W_{\Pi} \sim \frac{1}{d} \Rightarrow d \uparrow \Rightarrow W_{\Pi} \downarrow$$

**С1.** Маленький шарик с зарядом  $q = 4 \cdot 10^{-7}$  Кл и массой 3 г, подвешенный на невесомой нити с коэффициентом упругости 100 Н/м, находится между вертикальными пластинами воздушного конденсатора. Расстояние между обкладками конденсатора 5 см. Чему равна разность потенциалов между обкладками конденсатора, если удлинение нити 0.5 мм?





$$k^2 \Delta x^2 = \frac{q^2 U^2}{d^2} + m^2 g^2 \Rightarrow \frac{q^2 U^2}{d^2} = 0 \Rightarrow m \underline{\underline{g}} + m \underline{\underline{F}}_{\text{эл}}^2 + \underline{\underline{F}}_H = 0$$

$$U^2 = \frac{d^2}{q^2} (k^2 \Delta x^2 - m^2 g^2) \Rightarrow \begin{cases} F_H \sin \alpha - F_{\text{эл}} = 0 \\ F_H \cos \alpha - mg = 0 \end{cases}$$

$$U = \frac{5 \cdot 10^{-2} \text{ М}}{4 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}} \sqrt{\left(100 \frac{\text{В}}{\text{М}}\right)^2 \left\{ \begin{array}{l} F_H \sin \alpha = F_{\text{эл}} \\ F_H \cos \alpha = mg \end{array} \right\} \left(10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}\right)^2} =$$

$$= \frac{5 \text{ М}}{4 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}} \sqrt{10^4 \frac{\text{В}^2}{\text{М}^2} \cdot 25 \cdot 10^{-8} \text{ М}^2 = F_{\text{эл}}^2 \cdot 10^{-6} (mg)^2 \cdot 10^2 \frac{\text{М}^2}{\text{с}^4} =}$$

$$= \frac{5 \text{ М}}{4 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}} \sqrt{25 \cdot 10^{-4} \text{ В}^2 - F_{\text{эл}}^2 = q E, E = \frac{U}{d}, F_H = k \Delta x}$$

$$= \frac{5 \text{ М}}{4 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}} \sqrt{16 \cdot 10^{-4} \text{ В}^2} = \frac{5 \text{ М} \cdot 4 \cdot 10^{-2} \text{ В}}{4 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}} = 5 \text{ кВ}$$

5

**C2.** В плоский конденсатор длиной  $L = 5$  см влетает электрон под углом  $\alpha = 15^\circ$  к пластинам. Энергия электрона  $W = 2.4 \cdot 10^{-16}$  Дж. Расстояние между пластинами  $d = 1$  см. Определите разность потенциалов между пластинами конденсатора  $U$ , при которой электрон на выходе из конденсатора будет двигаться параллельно пластинам. Заряд электрона  $q_e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

$$v_x = \text{const}, v_y \neq \text{const}$$

$$\Rightarrow v_{\text{вылет}} = v_x = v_{0x}$$

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha, v_{0y} = v_0 \sin \alpha$$

$$v_x = v_{0x}, v_y = v_{0y} - at$$

$$a = \frac{v_{0y}}{t} = \frac{v_0 \sin \alpha}{t} \rightarrow v_y = 0$$

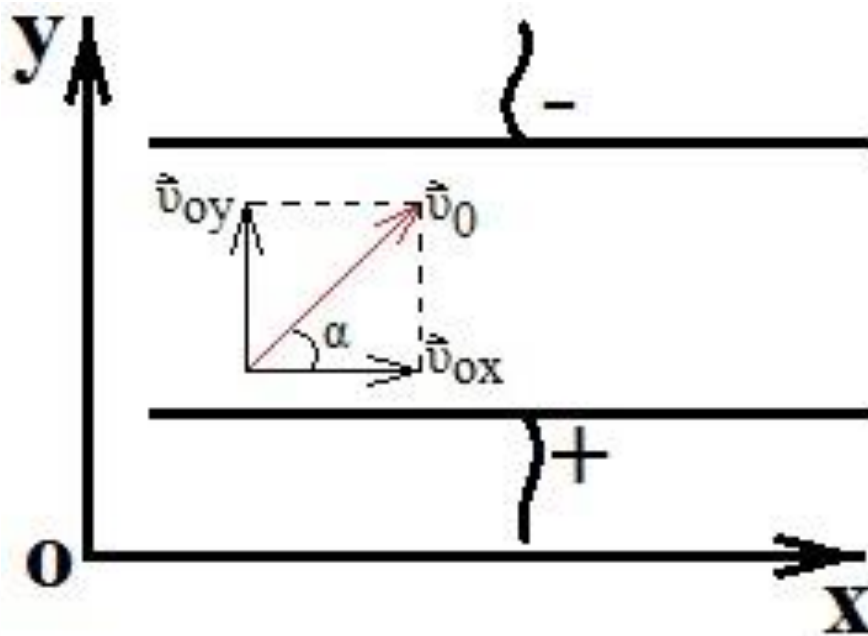
$$v_x = \frac{l}{t} \Rightarrow t = \frac{l}{v_x}$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{qE}{m} = \frac{|e|E}{m} = \frac{|e|U}{md}$$

$$\frac{|e|U}{md} = \frac{v_0^2 \sin \alpha \cos \alpha}{l} \Rightarrow U = \frac{\langle v_0^2 \rangle \sin 2\alpha \cdot \langle m \rangle d}{\langle 2 \rangle |e| l} = \frac{Wd \sin 2\alpha}{|e| l}$$

$$1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$U = \frac{1500 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \sin 2(15^\circ)}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = \frac{1500 \text{ Дж} \cdot 1 \text{ м} \cdot 0.5}{1 \text{ Кл} \cdot 5 \text{ м}} = 150 \text{ В}$$



**С3.** Конденсаторы, электрическая ёмкость которых 2 мкФ и 10 мкФ, заряжают до напряжения 5 В каждый, а затем «плюс» одного из них подключают к «минусу» другого и соединяют свободные выводы резистором 1000 Ом. Определите количество теплоты, которая выделится в резисторе.

Не задумывайтесь о способе соединения конденсаторов!

Напряжения на конденсаторах одинаковые по итогу:

«заряжают до напряжения 5 В каждый»

$$q = |q_1 - q_2| = |C_1U - C_2U| = U|C_1 - C_2|$$

$$C_{\text{после соедин}} = C_1 + C_2$$

$$W_{\text{ДО}} = \frac{C_1U^2}{2} + \frac{C_2U^2}{2}$$

$$W_{\text{ПОСЛЕ}} = \frac{q^2}{2(C_1 + C_2)} = \frac{U^2(C_1 - C_2)^2}{2(C_1 + C_2)}$$

$$Q = W_{\text{ДО}} - W_{\text{ПОСЛЕ}} = \frac{C_1U^2}{2} + \frac{C_2U^2}{2} - \frac{U^2(C_1 - C_2)^2}{2(C_1 + C_2)} =$$

$$= \frac{2U^2C_1C_2}{C_1 + C_2}$$

$$Q = \frac{2 \cdot 25\text{В}^2 \cdot 2\text{мкФ} \cdot 10\text{мкФ}}{2\text{мкФ} + 10\text{мкФ}} = \frac{50\text{В}^2 \cdot 20\text{мкФ}}{12\text{мкФ}} = 83.3 \text{ Дж}$$

# *Решение задач*

**К содержанию**

$C = \frac{q}{U}$  №1. Электроёмкость конденсатора,

подключённого к источнику постоянного

напряжения  $U = 1000 \text{ В}$ , равна  $C_1 = 5 \text{ пФ}$ .

$\Delta q = (3 \cdot 5 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} - 5 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}) 10^3 \text{ В}$   
 Расстояние между его обкладками  
 $= 10^{-12} \text{ Ф} \cdot 10^3 \text{ В} = 10^{-8} \text{ Кл}$

уменьшили в  $n = 3$  раза.

Определите изменение заряда на

$\Delta W_{II} = \frac{q_2 U}{2} - \frac{q_1 U}{2} = \frac{U}{2} (q_2 - q_1) = \frac{U}{2}$   
 обкладках конденсатора и энергии  
 электрического поля.

$$\Delta W_{II} = \frac{10^3 \text{ В}}{2} \cdot 10^{-8} \text{ Кл} = 0.5 \cdot 10^{-5} \text{ Дж} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Дж} = 5 \text{ мкДж}$$

$$W_{K_{НА}} = 0, W_{K_{ЭЛ}} = \frac{mv^2}{2}$$

№2. Заряд конденсатора  $q = 3 \cdot 10^{-8}$  Кл.

Ёмкость конденсатора  $C = 10$  пФ.

Определите скорость,

которую приобретает электрон,

проблывая в конденсаторе путь от одной

пластины к другой.

Начальная скорость электрона

$$v = \sqrt{\frac{2q_{\text{КОНД}}|e|}{Cm}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}}{10 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}}{9.1 \cdot 10^{-23} \text{ Кл}}} = 1.76 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$$

равна нулю.

Удельный заряд электрона

$$\Phi = \frac{A^4 \cdot c^4}{\text{кг} \cdot \text{м}^2}, A = \frac{q}{m} = 1.76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

$$= \sqrt{1 \cdot 10^{14} \frac{A^2 \cdot c^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2}{A^2 c^4 \cdot \text{кг}}} = 10^7 \text{ м/с}$$



№3. Четыре конденсатора ёмкостями

$$C_1 = 1 \text{ мкФ}, C_2 = 1 \text{ мкФ}, C_3 = 3 \text{ мкФ}, C_4 = 2 \text{ мкФ}$$

$$\frac{1}{C_{1-4}} = \frac{1}{1 \text{ мкФ}} + \frac{1}{1 \text{ мкФ} + 3 \text{ мкФ}} + \frac{1}{2 \text{ мкФ}} = \frac{7}{4 \text{ мкФ}}$$

К точкам А и В подводится напряжение

$$U = 140 \text{ В. Определите заряд } q_1 \text{ и}$$

напряжение на каждом из конденсаторов.

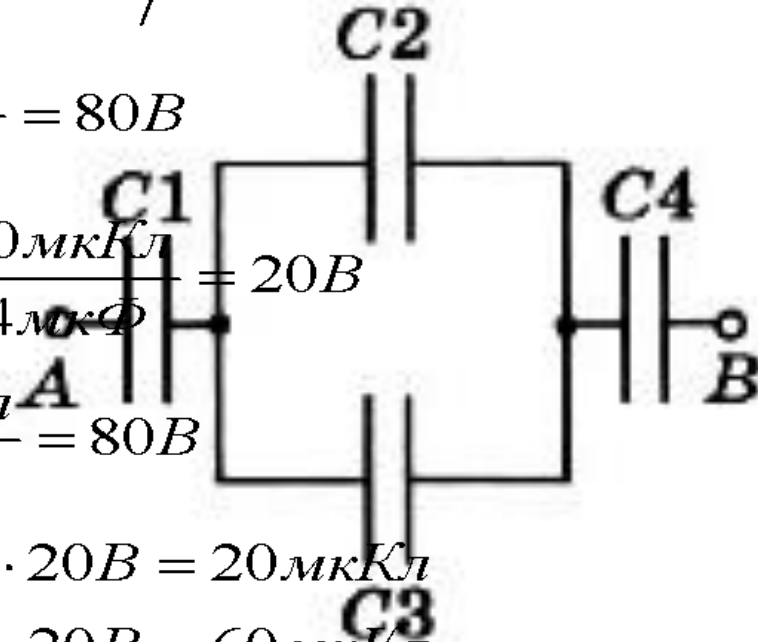
$$U_1 = \frac{q_1}{C_1} = \frac{80 \text{ мкКл}}{1 \text{ мкФ}} = 80 \text{ В}$$

$$U_2 = U_3 = \frac{q_{23}}{C_{23}} = \frac{80 \text{ мкКл}}{4 \text{ мкФ}} = 20 \text{ В}$$

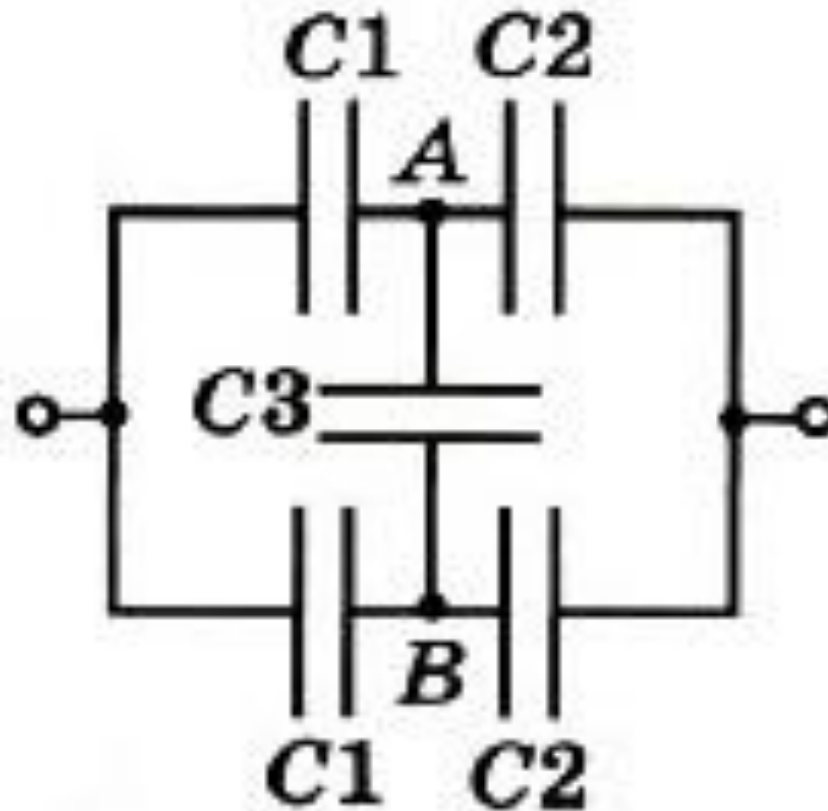
$$U_4 = \frac{q_4}{C_4} = \frac{80 \text{ мкКл}}{2 \text{ мкФ}} = 40 \text{ В}$$

$$q_2 = C_2 U_2 = 1 \text{ мкФ} \cdot 20 \text{ В} = 20 \text{ мкКл}$$

$$q_3 = C_3 U_3 = 3 \text{ мкФ} \cdot 20 \text{ В} = 60 \text{ мкКл}$$

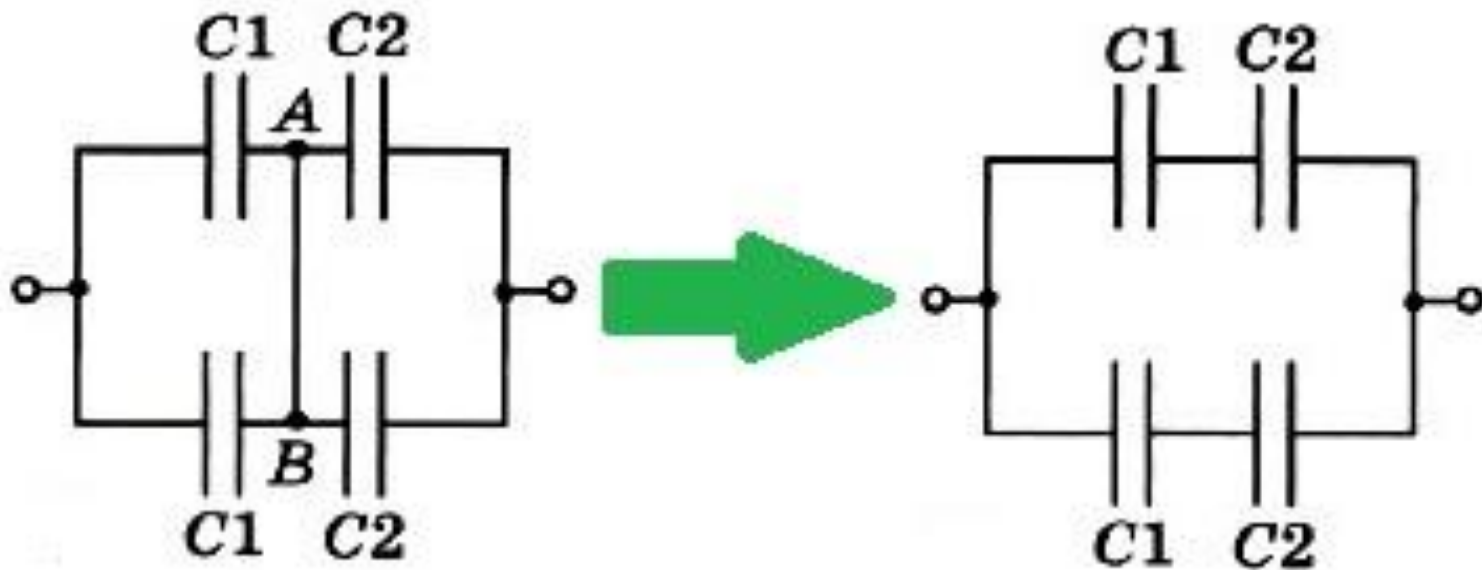


**№4.** Определите эквивалентную электрическую ёмкость в цепи, если ёмкости конденсаторов известны.



Если удаётся определить точки цепи, в которых потенциалы равны, то можно соединить эти точки или исключить конденсаторы, присоединённые к этим точкам, так как они не могут накапливать заряд и не играют роли при распределении зарядов.

В силу симметрии и равенства ёмкостей соответствующих конденсаторов потенциалы точек А и В равны.



$$\frac{1}{C_v} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \Rightarrow C_v = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$\frac{1}{C_H} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \Rightarrow C_H = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$C_{\text{общее}} = C_v + C_H = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{2C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

**№5.** Энергия плоского воздушного конденсатора  $W_1 = 2 \cdot 10^{-7}$  Дж. Определите энергию конденсатора после заполнения его диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2$ , если:

- 1) конденсатор отключён от источника;
- 2) конденсатор подключён к источнику питания.

$$1) q = \text{const}, W_1 = \frac{q^2}{2C_1}$$

$$2) W_2 = \frac{\varepsilon C_1 U_0^2}{2} = \varepsilon W_1 \Rightarrow W_2 = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ Дж} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}$$

**№6.** Разность потенциалов между обкладками конденсатора ёмкостью 0.1 мкФ изменилась на 175 В. Определите изменение заряда конденсатора.

$$q_1 = U_1 C, q_2 = U_2 C$$

$$\Delta q = q_2 - q_1 = U_2 C - U_1 C = C(U_2 - U_1) = C \Delta U$$

$$\Delta q = 0.1 \text{ мкФ} \cdot 175 \text{ В} = 17.5 \text{ мкКл}$$

**№7.** Найти емкость плоского конденсатора, состоящего из двух круглых пластин диаметром 20 см, разделенных парафиновой прослойкой толщиной 1 мм.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{воздух}} \cdot S}{d} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{воздух}} \cdot \pi R^2}{d} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{воздух}} \cdot \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2}{d}$$

$$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}, \varepsilon_{\text{парафина}} = 2.1$$

$$C = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \cdot 2.1 \cdot 3.14 \cdot 0.01 \text{ м}^2}{0.001 \text{ м}} \approx 584 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 584 \text{ нФ}$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{воздух}} \cdot S}{d} \Rightarrow d = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{воздух}} \cdot S}{C}$$

№8. Площадь пластин конденсатора равна  $520 \text{ см}^2$ . На каком расстоянии нужно разместить пластины в воздухе, чтобы емкость конденсатора была равна  $50 \text{ пФ}$ ?

$$d = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \cdot 1.00025 \cdot 520 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2}{50 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}} = 92 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$\frac{\frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \cdot \text{м}^2}{\text{Ф}} = \frac{\frac{\text{А}^2 \cdot \text{с}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м}^2}{\text{А}^2 \cdot \text{с}^4} = \text{м}$$

$$\text{Ф} = \frac{\text{А}^2 \cdot \text{с}^4}{\text{кг} \cdot \text{м}^2}, \text{Кл}^2 = \text{А}^2 \cdot \text{с}^2, \text{Н} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$$



№9. Плоский конденсатор состоит из двух пластин площадью  $50 \text{ см}^2$  каждая.

Между пластинами находится слой стекла.

Какой наибольший заряд можно накопить на этом конденсаторе,

если при напряженности поля  $10 \text{ МВ/м}$  в стекле происходит пробой конденсатора?

Диэлектрическая проницаемость стекла 7.

# *Тестовые задания*

**К содержанию**

## Тест №1

I вариант		II вариант	
1	Электростатика – это...	1	Электрический заряд – это...
2	Виды частиц:	2	Как взаимодействуют заряженные частицы?
3	Что такое «электрон», кто его открыл?	3	Что такое «протон», кто его открыл?
4	Что такое «нейтрон», кто его открыл?	4	Масса электрона:
5	Масса протона:	5	Заряд протона:
6	Способы электризации:	6	Электризация – это...
7	Электроскоп – это...	7	Электромметр – это...
8	Формула закона Кулона:	8	Коэффициент пропорциональности:
9	Формула для нахождения заряда любого тела:	9	Один кулон – это...
10	Два точечных заряда действуют друг на друга с силой 10 Н. Какой будет сила взаимодействия между ними, если уменьшить значение каждого заряда в 4 раза, не меняя расстояние между ними?	10	Два точечных электрических заряда действуют друг на друга с силами 27 мН. Какими станут силы взаимодействия между ними, если, не меняя расстояние между зарядами, увеличить модуль каждого из них в 4 раза?
<b>На «3»</b>		<b>На «4»</b>	
5,6		7,8	
		<b>На «5»</b>	
		9,10	

## Тест №2

I вариант		II вариант	
1	Электрическое поле заряда – это...	1	Электростатическое поле – это...
2	Идея Фарадея:	2	Идея Максвелла:
3	Напряженность электростатического поля – это ...	3	Формула напряженности электростатического поля:
4	Что представляют собой силовые линии?	4	Силовые линии электростатического поля – это...
5	Что позволяет определить направление силовых линий?	5	Что позволяет определить густота силовых линий?
6	Однородное поле – это...	6	Где можно наблюдать однородное поле?
7	Формула напряженности электростатического поля точечного заряда:	7	Формула напряженности электростатического поля шара:
8	Чему равна напряженность электростатического поля внутри шара?	8	Принцип суперпозиции полей:

На «3»

На «4»

На «5»

3,4

5,6

7,8



## Тест №3

I вариант		II вариант			
1	Проводники – это ...	1	Диэлектрики – это ...		
2	Свободные заряды – это ...	2	Электростатическая индукция – это ...		
3	Какое поле существует внутри проводника при подключенном внешнем поле?	3	Индукцированный заряд – это ...		
4	Виды диэлектриков:	4	Как располагаются заряды в проводнике?		
5	Электрический диполь – это ...	5	Поляризация – это ...		
6	Диэлектрическая проницаемость вещества – это ...	6	Чему равна диэлектрическая проницаемость вакуума? Реального вещества?		
7	Формула работы сил электростатического поля:	7	Формула потенциальной энергии заряда в однородном электростатическом поле:		
8	Чему равна работа на замкнутой траектории?	8	Формула работы потенциального поля:		
<b>На «3»</b>		<b>На «4»</b>		<b>На «5»</b>	
3,4		5,6		7,8	

## Тест №4

I вариант		II вариант	
1	Потенциал точки электростатического поля – это...	1	Формула потенциала точки электростатического поля:
2	Формула потенциала однородного поля в точке, отстоящей на расстоянии $d$ от неё:	2	Формула потенциала поля неподвижного точечного заряда:
3	Кто изобрёл первый гальванический элемент?	3	Напряжение – это...
4	Формулы напряжения:	4	Формула работы поля по перемещению заряда:
5	Чему равна напряженность поля, если потенциал не меняется?	5	Эквипотенциальные поверхности – это...
6	Как расположены силовые линии относительно эквипотенциальных поверхностей?	6	Как изменяется напряженность поля, если потенциал на расстоянии $d$ изменяется мало?
7	Что представляют собой эквипотенциальные поверхности кулоновского поля точечного заряда?	7	Что представляют собой эквипотенциальные поверхности однородного поля?
8	Формула поверхностной плотности заряда:	8	Формула напряженности поля бесконечной заряженной плоскости:

На «3»

На «4»

На «5»

3,4

5,6

7,8



## Тест №5

I вариант		II вариант	
1	Пробой диэлектрика – это...	1	Основные виды пробоя диэлектрика:
2	Пробивное напряжение – это...	2	Пробивная напряжённость – это...
3	Электроёмкость – это...	3	Формула электроёмкости двух проводников:
4	От чего зависит электроёмкость?	4	От чего не зависит электроёмкость?
5	1 Фарад – это...	5	Как назывался первый электрический конденсатор?
6	Нарисовать устройство конденсатора в простейшем варианте.	6	Обкладки – это...
7	Виды конденсаторов по ёмкости:	7	Виды конденсаторов по форме:
8	Изобразить поле реального плоского конденсатора.	8	Формула ёмкости конденсатора:
9	<p>Определите емкость батареи конденсаторов, изображенной на рисунке. Емкость каждого конденсатора <math>C = 2 \text{ мкФ}</math>.</p> 	9	<p>Определите емкость батареи конденсаторов, изображенной на рисунке. Емкость каждого конденсатора <math>C = 1 \text{ мкФ}</math>.</p> 
<b>На «3»</b>		<b>На «4»</b>	
4,5		6,7	
		<b>На «5»</b>	
		8,9	

# *Табличные данные*

**К содержанию**



# Диэлектрическая проницаемость вещества

Материал	$\epsilon$
Бумага сухая	2 – 2.5
Янтарь	2.8
Капрон	3.6
Стекло	4 – 16
Фарфор	4.5 – 4.7
Масло касторовое	4.8
Мрамор	8-10
Спирт этиловый	27
Вода дистиллированная	81
Титанат бария	1200



# *Литература*

**К содержанию**

**Физика. 10 класс:** учеб, для общеобразоват. организаций с прил. на электрон, носителе : базовый уровень / Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев, Н. Н. Сотский; под ред. Н. А. Парфентьевой. — М. : Просвещение, 2014. — 416 с. : ил. — (Классический курс). — ISBN 978-5-09-028225-3.

**Краткий конспект по электродинамике**  
[znaemfiz.ru/fizika-v-shkole/elektrodinamika](http://znaemfiz.ru/fizika-v-shkole/elektrodinamika)

**Открытая Физика 2.6. Часть II 1. Электродинамика**  
[physics.ru/textbook1/content.html](http://physics.ru/textbook1/content.html)

**Образовательный портал для подготовки к ЕГЭ**  
[phys-ege.sdangia.ru/?redir=1](http://phys-ege.sdangia.ru/?redir=1)

**Электризация тел**  
[fizikabook.ru/articles/elektrizatsiya-tel.html](http://fizikabook.ru/articles/elektrizatsiya-tel.html)

**Опыт Резерфорда**

[www.physics.ru/courses/op25part2/content/chapter6/section/paragraph1/theory.html#.WQwcNGnyhu0](http://www.physics.ru/courses/op25part2/content/chapter6/section/paragraph1/theory.html#.WQwcNGnyhu0)

**Силовые линии электростатического поля. Теорема Гаусса. Применение теоремы Гаусса к расчету электрических полей.**  
[gigabaza.ru/doc/85337.html](http://gigabaza.ru/doc/85337.html)

**Проводники и диэлектрики в электрическом поле**

[www.physics.ru/courses/op25part2/content/chapter1/section/paragraph5/theory.html#.WQwdVGnyhu0](http://www.physics.ru/courses/op25part2/content/chapter1/section/paragraph5/theory.html#.WQwdVGnyhu0)

**Все, что обязательно надо знать про заземление**  
[electricalschool.info/main/electrobezopasnost/225-vse-chto-objazatelno-nado-znat-pro.html](http://electricalschool.info/main/electrobezopasnost/225-vse-chto-objazatelno-nado-znat-pro.html)

**Сегнетоэлектрики**

[dssp.petrus.ru/p/tutorial/ft/Part8/part8\\_6.htm](http://dssp.petrus.ru/p/tutorial/ft/Part8/part8_6.htm)

**Эквипотенциальные поверхности**  
[infofiz.ru/joom1/index.php?option=com\\_content&view=article&id=135:lk30ft&catid=5:ml1s&Itemid=44](http://infofiz.ru/joom1/index.php?option=com_content&view=article&id=135:lk30ft&catid=5:ml1s&Itemid=44)

**Диэлектрики, поляризация и пробивная напряженность диэлектриков**  
[electricalschool.info/spravochnik/material/608-dielektriki-poljarizacija-i-probivnaja.html](http://electricalschool.info/spravochnik/material/608-dielektriki-poljarizacija-i-probivnaja.html)

**Пробой твердых диэлектриков**  
[ctl.mpei.ru/DocHandler.aspx?p=pubs/phd/3.3.html](http://ctl.mpei.ru/DocHandler.aspx?p=pubs/phd/3.3.html)

### **Пробой диэлектриков. Общая характеристика явления пробоя**

[studopedia.ru/3\\_159989\\_proboy-dielektrikov.html](http://studopedia.ru/3_159989_proboy-dielektrikov.html)

**Мушенбрук Питер Ван (Лейденская банка)**

[www.fizportal.ru/musenbruk](http://www.fizportal.ru/musenbruk)

### **Електроёмкость. Конденсаторы.**

[fizika.ayp.ru/4/4\\_6.html](http://fizika.ayp.ru/4/4_6.html)

**Зачем нужен конденсатор?**

[thedifference.ru/zachem-nuzhen-kondensator/](http://thedifference.ru/zachem-nuzhen-kondensator/)

### **Соединение конденсаторов**

[www.sxemotehnika.ru/soedinenie-kondensatorov.html](http://www.sxemotehnika.ru/soedinenie-kondensatorov.html)

### **Учёные**

[ru.wikipedia.org/wiki/Томсон,\\_Джозеф\\_Джон](http://ru.wikipedia.org/wiki/Томсон,_Джозеф_Джон)

[ru.wikipedia.org/wiki/Резерфорд,\\_Эрнест](http://ru.wikipedia.org/wiki/Резерфорд,_Эрнест), [elementy.ru/trefil/18/Opyt\\_Rezerforda](http://elementy.ru/trefil/18/Opyt_Rezerforda)

[ru.wikipedia.org/wiki/Чедвик,\\_Джеймс](http://ru.wikipedia.org/wiki/Чедвик,_Джеймс)

[ru.wikipedia.org/wiki/Кулон,\\_Шарль\\_Огюстен\\_де](http://ru.wikipedia.org/wiki/Кулон,_Шарль_Огюстен_де)

[ru.wikipedia.org/wiki/Фарадей,\\_Майкл](http://ru.wikipedia.org/wiki/Фарадей,_Майкл)

[ru.wikipedia.org/wiki/Максвелл,\\_Джеймс\\_Клерк](http://ru.wikipedia.org/wiki/Максвелл,_Джеймс_Клерк)

[ru.wikipedia.org/wiki/Вильке,\\_Иоганн\\_Карл](http://ru.wikipedia.org/wiki/Вильке,_Иоганн_Карл)

[ru.wikipedia.org/wiki/Вольт,\\_Алессандро](http://ru.wikipedia.org/wiki/Вольт,_Алессандро)

[ru.wikipedia.org/wiki/Гальвани,\\_Луиджи](http://ru.wikipedia.org/wiki/Гальвани,_Луиджи)

[ru.wikipedia.org/wiki/Клейст,\\_Эвальд\\_Юрген\\_фон](http://ru.wikipedia.org/wiki/Клейст,_Эвальд_Юрген_фон),

[commons.wikimedia.org/wiki/File:Ewald\\_Georg\\_von\\_Kleist.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ewald_Georg_von_Kleist.png)

[ru.wikipedia.org/wiki/Мушенбрук,\\_Питер\\_ван](http://ru.wikipedia.org/wiki/Мушенбрук,_Питер_ван)