

**7-9 классы, подготовка к теоретическому туру
олимпиады школьников «Робофест» по физике**

Теоретический обзор к занятию к вводу к занятию «электростатика».

Понятие «электричество» сейчас знакомо каждому из повседневной жизни. Интересно разобраться, как «устроены» электрические явления. В основе этих явлений лежат фундаментальные свойства материи. Атомы и молекулы всех веществ состоят из *электрически заряженных* частиц – ядер атомов и электронов. Электрический заряд – характеристика частицы, описывающая ее участие в *электромагнитном взаимодействии*. «По-настоящему» электрические явления – только частный случай более обширного класса явлений – электромагнитных. В течении многих веков люди изучали электрические и магнитные явления как разные типы явлений, и только тогда, когда они начали их изучать их на фундаментальном уровне, они узнали, что природа у них общая. Впрочем, в этом занятии мы сосредоточимся на рассмотрении электрических явлений. Такое «отдельное» описание электрических явлений – это приближенный подход. Его называют *«электростатикой»*, поскольку в этом приближении мы изучаем взаимодействие *покоящихся* зарядов. Для полного изучения взаимодействия движущихся зарядов необходимо рассмотрение не только электрических, но и магнитных явлений. Однако, если скорости движения частиц не очень велики (а большими скоростями в электромагнетизме считают скорости, по порядку величины приближающиеся к скорости света в вакууме, которая примерно равна 300000 км/с!), и сами движущиеся заряды не слишком большие, то роль «магнитной» составляющей взаимодействия зарядов мала, и в рамках приближенного изучения можно считать, что взаимодействие у таких движущихся зарядов не отличается от взаимодействия покоящихся.

Взаимодействие покоящихся зарядов описывается законом Кулона: **величина силы, с которой две неподвижные точечные» заряженные частицы взаимодействуют между собой в вакууме, прямо пропорциональна произведению модулей их зарядов и обратно**

пропорциональна квадрату расстояния r между ними: $|\vec{F}_{эл}| = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}$. При этом сами

заряды – величины алгебраические: они могут быть положительными и отрицательными. При этом **силы взаимодействия зарядов направлены вдоль соединяющих их прямой, и являются силами притяжения для разноименных зарядов (знаки зарядов различны) и силами отталкивания – для одноименных (знаки одинаковы).**

В настоящее время мы связываем знаки зарядов с фундаментальными частицами: заряд атомного ядра мы считаем положительным, а заряд электронов – отрицательным. Исторически определение знаков зарядов тел производилось на основании электризации тел трением: положительным называли заряд, приобретаемый стеклянной палочкой при трении о шелк, а отрицательным – заряд, приобретаемый эбонитовой палочкой при трении о мех. Явление электризации трением связано с тем, что один из видов заряженных частиц (электроны, которые могут отделяться от одного атома и переходить к другому) значительно более подвижны, чем другой (ядра атомов более массивны, и отделение от атома ядра попросту разрушает атом, ибо электроны удерживаются в атоме именно притяжением со стороны ядра). Поэтому при трении в результате переходов электронов от атомов одного тела к атомам другого тело, теряющие электроны, заряжается положительно, а тело, получающие электроны – отрицательно. Даже само слово «электрон» произошло от греческого названия янтаря, так как явление электризации хорошо заметно при трении кусочков янтаря о шерсть.

Значение коэффициента пропорциональности k в законе Кулона зависит от выбора единиц измерений. В системе единиц СИ единицей заряда является *кулон* (обозначение Кл) и в этом случае $k \approx 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$. 1 Кл – это очень большой заряд для электростатики: заряд одного электрона равен $q_e \equiv -e \approx -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Пример 1: Найдите величину силы взаимодействия двух зарядов величиной 1 Кл каждый, расположенных на расстоянии 100 м друг от друга и величину силы отталкивания двух электронов в атоме, находящихся на расстоянии 10^{-8} см друг от друга.

Решение: Пользуясь законом Кулона, находим: для первого случая $|\vec{F}_{qq}| = k \frac{q^2}{r^2} \approx 9 \cdot 10^9 \text{ Н}$, а для второго $|\vec{F}_{ee}| = k \frac{e^2}{r^2} \approx 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$. Нужно отметить, что для электронов с массой около 10^{-30} кг эта сила должна считаться огромной.

Интересно, что закон Кулона по форме напоминает закон всемирного тяготения Ньютона, только вместо масс в нем фигурируют заряды. Иногда эта аналогия используется для того, чтобы результаты, полученные для сил гравитации, использовать для электростатических сил или наоборот.

Важно отметить, что заряд каждой конкретной фундаментальной частицы – фиксированная величина: заряды всех электронов одинаковы, как и заряды всех протонов ($q_p = +e$) и всех нейтронов ($q_n = 0$). Отметим: протоны и нейтроны – наиболее легкие частицы среди «осколков» атомных ядер. При этом во всех процессах на фундаментальном уровне суммарный заряд всех частиц, участвующих в процессе, не изменяется с течением времени. Вследствие этого и у макроскопических тел, заряды которых есть сумма зарядов всех частиц, из которых они состоят, заряды могут только переходить от одного тела к другому, но не могут «рождаться» или «исчезать». Таким образом, **если в некоторую систему тел не поступают электрические заряды извне и не происходит «ухода» зарядов к внешним телам, то алгебраическая сумма электрических зарядов тел системы остается неизменной.** Это утверждение называют «законом сохранения электрического заряда».

При взаимодействии нескольких зарядов закон Кулона описывает силы, возникающие для каждой пары зарядов, и суммарная сила, действующая на выбранный заряд, является **векторной суммой** сил, действующих на него со стороны остальных зарядов. Это обстоятельство вместе с тем фактом, что сила пропорциональна величине каждого из участвующих во взаимодействии зарядов, позволяет построить описание электростатического взаимодействия с помощью понятия *электрического поля*. В рамках такого описания мы считаем, что поле – это материальный посредник, передающий взаимодействие от одного заряда к другому. То есть один из зарядов создает поле, и это поле действует на другой заряд. Если ввести силовую характеристику поля (ее называют *напряженностью* поля в данной точке пространства и обозначают \vec{E}) как **отношение силы \vec{F}_q , действующий со стороны электрического поля на помещенный в данную точку**

пробный заряд q , к этому заряду: $\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}_q}{q}$, то эта величина не будет зависеть от q ! В самом

деле, если поле создается положительным точечным зарядом q_0 , а наш пробный заряд будет находиться на расстоянии r от него, то величина силы, действующей на пробный заряд,

будет равна $|\vec{F}_q| = k \frac{|q_0| |q|}{r^2}$, и эта сила будет направлена от q_0 , если $q > 0$, и к заряду q_0

при $q < 0$. В соответствии с приведенным определением, вектор напряженности поля, создаваемого положительным точечным зарядом q_0 на расстоянии r равен по модулю

$|\vec{E}| = k \frac{|q_0|}{r^2}$ и направлен *от* этого *заряда*. Рассуждая аналогично, понимаем, что

отрицательный заряд создает поле, величина напряженности которого определяется той же формулой, но вектор теперь будет направлен *к заряду*, создающему поле. По определению, единицей измерения напряженности в системе единиц СИ является Н/Кл.

В определении напряженности введено важное понятие – «*пробный заряд*». Так мы будем называть «маленькое» тело (чтобы можно было считать, что он размещен в некоторой «точке» пространства). Имеющее отличный от нуля заряд (чтобы «чувствовать» поля других зарядов), но настолько маленький, что влиянием его собственного поля на окружающие тела можно пренебречь.

Отметим, что напряженность поля линейно зависит от создающего его заряда, и поэтому в электростатике оказывается справедлив *принцип суперпозиции*: **суммарная напряженность \vec{E} электрического поля, создаваемого системой зарядов q_1, q_2, \dots, q_N в данной точке пространства, равна векторной сумме напряженностей, создаваемой в этой точке каждым из зарядов системы: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_N$.**

Пример 2: Найти величину напряженности электрического поля двух точечных зарядов $q_1 = +4 \text{ мкКл}$ и $q_2 = -2 \text{ мкКл}$ в точке, расположенной между ними на равных расстояниях. Расстояние между зарядами равно $r = 3 \text{ м}$.

Решение: Ясно, что заданная точка находится на расстоянии $\frac{r}{2} = 1,5 \text{ м}$ от каждого заряда.

Поэтому величина напряженности поля, создаваемого в ней первым зарядом, равна

$|\vec{E}_1| = k \frac{|q_1|}{(r/2)^2} \approx 16000 \text{ Н/Кл}$. Вектор \vec{E}_1 направлен от заряда 1. Аналогично

$|\vec{E}_2| = k \frac{|q_2|}{(r/2)^2} \approx 8000 \text{ Н/Кл}$, причем вектор \vec{E}_2 направлен к заряду 2, то есть тоже от заряда 1.

Таким образом, при сложении векторов напряженностей их величины складываются, и $|\vec{E}| = |\vec{E}_1 + \vec{E}_2| = 24000 \text{ Н/Кл}$.

Важное обстоятельство: формула $|\vec{E}| = k \frac{|q_0|}{r^2}$ на самом деле описывает не только поле точечного заряда, но и поле любого сферически-симметричного заряженного тела (например, шара, однородно заряженного по объему или по поверхности) **вне** него.

Когда под действием электрических сил пробный заряд совершает перемещение, то можно говорить о том, что электрическое поле совершает работу.

Пример 3: Рассмотрим однородное электрическое поле: это поле, напряженность которого одинакова во всех точках области, где такое поле создано: $\vec{E} = \text{const}$. Величина напряженности этого поля $|\vec{E}| = 5000 \text{ Н/Кл}$. Пробный заряд $q = +20 \text{ мкКл}$ удерживают в этом поле, а затем отпускают без начальной скорости. Пренебрегая всеми потерями, найдите кинетическую энергию пробного заряда к тому моменту, когда он пройдет расстояние $s = 4 \text{ м}$. На пробный заряд не действуют никакие другие (неэлектрические) силы.

Решение: Ясно, что под действием электрической силы $\vec{F}_q = q\vec{E}$ пробный заряд начнет двигаться по направлению \vec{E} . Поэтому работа электрической силы будет равна $A_q = F \cdot s = qEs$. Эта работа идет на увеличение кинетической энергии пробного заряда и на компенсацию возможных потерь. Пренебрегая всеми потерями, приходим к выводу, что увеличение кинетической энергии в точности равно работе, то есть $E_K = qEs = 0,4 \text{ Дж}$.

На самом деле при ускоренном движении заряда потери всегда есть – это потери на *электромагнитное излучение*. Однако, как отмечалось в самом начале, при «не очень быстрых» движениях «небольших» зарядов эти потери чрезвычайно малы, и в приближении электростатики мы считаем, что этими потерями можно пренебречь, и тогда изменение кинетической энергии заряда в электрическом поле действительно равно работе электростатических сил по перемещению заряда от начальной до конечной точки. Как мы заметили, величина этой работы пропорциональна величине перемещаемого заряда, и можно ввести *энергетическую* характеристику электрического поля между начальной и конечной точками траектории заряда, разделив работу на заряд. Такая величина называется *напряжением*. Итак, **напряжение U_{AB} между точками А и В – это отношение работы A_q**

электрических сил по при перемещении пробного заряда q из А в В к заряду: $U_{AB} \equiv \frac{A_q}{q}$.

В системе единиц СИ единицей измерения напряжения является вольт (обозначение В). Ясно, что $1\text{В} = \frac{1\text{Дж}}{1\text{Кл}}$. Поэтому единицами измерения напряженности электрического поля можно

считать не только Н/Кл, но и В/м: $\frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл} \cdot \text{м}} = \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Пример 4: В области пространства, в которой создано однородное электрическое поле \vec{E} , величина напряженности которого $E = 300\text{В/м}$, расположен равнобедренный прямоугольный треугольник ABC. Вектор \vec{E} направлен вдоль катета АВ (от А к В), длина которого $|\text{AB}| = 40\text{см}$. Найдите напряжение между вершинами А и С.

Решение: Так как угол В в нашем треугольнике прямой, то перемещение пробного заряда (для определенности будем считать его заряд $q > 0$) от А к С вдоль гипотенузы АС смещение пробного заряда вдоль направления силы будет как раз равно $|\text{AB}|$. Поэтому $A_q = qE|\text{AB}|$.

Следовательно, $U_{AB} = \frac{qE|\text{AB}|}{q} = E|\text{AB}| = 120\text{В}$.

Отметим, что мы получили формулу для напряжения между двумя точками в однородном электрическом поле: оно равно произведению величины напряженности на проекцию вектора перемещения из начальной точки в конечную на направление вектора \vec{E} . Те, кто знаком с понятием скалярного произведения векторов, могут с его помощью записать общую формулу: при $\vec{E} = \text{const}$ напряжение между А и В $U_{AB} = \vec{E} \cdot \overline{\text{AB}}$.

Важное свойство электрического поля – его *потенциальность*. Оно означает, что работа электростатических сил не зависит от пути перемещения из начальной точки в конечную. Например, в примере 4 можно было посчитать работу на пути А-В-С, и она получилась бы точно такой же, как и на пути А-С. Поэтому можно ввести *потенциальную энергию* пробного заряда в электростатическом поле – функцию координат точек, разность значений которой в начальной и конечной точке равна работе по перемещению заряда между этими точками: $E_q(\text{A}) - E_q(\text{B}) = A_q$. Ясно, что потенциальная энергия заряда в поле, как и работа, пропорциональна заряду, поэтому отношение потенциальной энергии к заряду есть энергетическая характеристика самого поля в точке. Ее называют **потенциалом поля** в

данной точке: $\varphi(\text{A}) \equiv \frac{E_q(\text{A})}{q}$. Обратим внимание, что потенциальная энергия «привязана» к

измеряемой величине (работе) через *разность* своих значений. Поэтому добавление к потенциальной энергии некой постоянной величины в каждой точке не изменяет рассчитываемых через нее измеряемых величин. Точно таким же свойством, естественно, обладает и потенциал. Поэтому обычно в электростатике при введении потенциала договариваются о его *калибровке*, то есть о выборе точки, в которой этот потенциал принят равным нулю. Нетрудно заметить, что напряжение между двумя точками равно разности их потенциалов: $U_{AB} = \varphi(\text{A}) - \varphi(\text{B})$.

Потенциал поля точечного заряда q_0 в точке на расстоянии r от него определяется формулой

$\varphi(r) = \frac{kq_0}{r}$, если считать, что ноль потенциала соответствует «бесконечно удаленным»

точкам. Как и в случае напряженности, эта формула пригодна не только для точечного заряда, но и для любого сферически-симметричного заряженного тела **вне** него.

Пример 5: С поверхности шара радиуса $R = 0,5\text{м}$, в котором равномерно распределен заряд $q_0 = -20\text{нКл}$ (нанокулон – это 10^{-9}Кл), отрывается практически без начальной скорости электрон. Какую скорость наберет электрон к тому моменту, когда он удалится от поверхности шара на расстояние, равное его радиусу? Масса электрона $m \approx 9 \cdot 10^{-31}\text{кг}$.

Решение: Электрон заряжен отрицательно ($q_e \equiv -e \approx -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), так что он будет отталкиваться от шара и разгоняться. Увеличение его кинетической энергии равно работе электростатических сил, а работу можно вычислить через потенциал:

$\frac{mv_e^2}{2} = \Delta E_K = A_e = (-e) \cdot [\varphi(R) - \varphi(2R)]$. Используя формулу для потенциала, находим, что

$\frac{mv_e^2}{2} = \frac{k(-q_0)e}{R} - \frac{k(-q_0)e}{2R} = \frac{k(-q_0)e}{2R}$. Поэтому $v_e = \sqrt{\frac{k(-q_0)e}{mR}} \approx 8 \cdot 10^6$ м/с. То есть 8000 км/с!