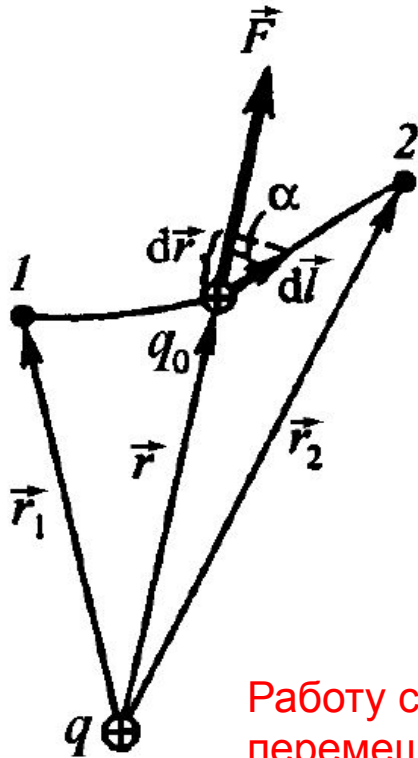


Работа электростатического поля



Постановка задачи. Точечный заряд q создает эл/ст поле. В этом поле из точки 1 в точку 2 по произвольной траектории перемещается другой заряд q_0 .
Чему равна работа, совершаемая полем?

Согласно определению введенному в механике работа (dA) определяется скалярным произведением:

$$dA = (\vec{F} \cdot d\vec{r});$$

dA – элементарная работа (элемент работы);

F – сила совершающая работу;

$d\vec{r}$ – перемещение в направлении действия силы;

Работу совершает, только та компонента силы, которая совпадает с перемещением

Согласно рисунку и определению работа электростатической силы равна:

$$dA = (\vec{F} \cdot d\vec{r}) = F dl \cos \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} dr;$$

dr – элементарное перемещение заряда в направлении действия силы (сила центральная действует радиально);
 dl –элемент траектории по которой перемещается заряд;

Работа при движении по всей траектории из точки 1 в точку 2 равна;

$$A_{12} = \int_{r_1}^{r_2} dA = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = -\frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Т.Е. работа определяется только **положениями** начальной и конечной точек.

Из этого следует, что работа электростатического поля по перемещению заряда в по любому замкнутому контуру равна нулю.

Такие поля называются потенциальными, а силы их создающие консервативными

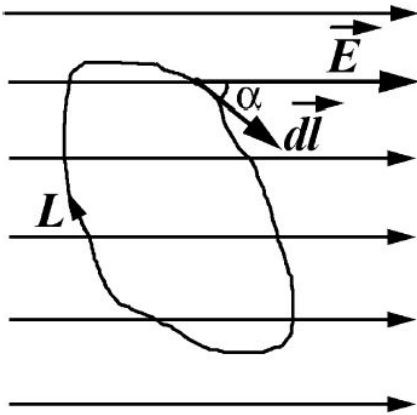
Вывод: Электростатическое поле точечного заряда является потенциальным, а электростатические силы - консервативными

Работу можно представить еще следующим образом:

$$A_{12} = q \int_{r_1}^{r_2} \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = q \int_{r_1}^{r_2} E(r) dr = q \int_{r_1}^{r_2} E(l) \cdot \cos \alpha \cdot dl = q \int_{r_1}^{r_2} (\vec{E}(l) \cdot d\vec{l})$$

Величина $\int_{r_1}^{r_2} (\vec{E}(l) \cdot d\vec{l})$

т.е. линейный интеграл (т.е. взятый по линии) называется **циркуляцией вектора напряженности**, и представляет собой работу при перемещении единичного положительного заряда.



$$\oint_L (\vec{E}(l) \cdot d\vec{l}) = 0$$

Теорема о циркуляции вектора E . *Циркуляция вектора напряженности электростатического поля вдоль любого замкнутого контура равна нулю.*

Потенциальная энергия заряда

В потенциальном поле тела обладают потенциальной энергией и тела могут совершать работу за счет убыли потенциальной энергии .

Представим выражение для работы A_{12} на слайде (1) при переходе тела из 1-2 в виде:

$$A_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r_1} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r_2} = W_1 - W_2$$

тогда правая часть это разность потенциальных энергий заряда q_0 (пробного заряда) в начальной и конечной точках поля заряда q :

Поскольку потенциальную энергию заряда q_0 , находящегося в поле заряда q можно определить с точностью до константы, то выражение для энергии : $W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r} + const$

При удалении заряда на бесконечность, W обращается в нуль, получаем: $const = 0$.

Для **одноименных** зарядов потенциальная энергия их взаимодействия **положительна (отталкивание)**, для **разноименных** зарядов – **отрицательна (притяжения)**.

Потенциальная энергия W заряда q_0 находящемся в поле системы из n точечных зарядов равна сумме его энергий, создаваемых каждым из зарядов в отдельности U :

$$W_0 = q_0 \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i}$$

10. Потенциал и разность потенциалов электростатического поля заряда

Энергетическая характеристика поля, **независящая** от пробного заряда q_0 и равная:

$$\varphi = \frac{\text{энергия}}{\text{заряд}} = \frac{W}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \quad \text{называется -потенциал.}$$

Потенциал - скалярная величина, определяемая потенциальной энергией единичного положительного заряда, помещенного в эту точку.

Работа с помощью этого понятия выражается **разностью потенциалов** в начальной и конечной точках:

$$A_{12} = W_1 - W_2 = q_0 (\varphi_1 - \varphi_2) = q_0 \Delta\varphi$$

Тогда разность потенциалов: $\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi = \frac{A_{12}}{q_0} = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l}$ Интегрировать можно по любому пути.

Другое определение потенциала – **это работа по перемещению единичного положительно заряда из данной точки на бесконечность:**

$$A_\infty = q_0 \cdot \varphi \quad \Rightarrow \quad \varphi = \frac{A_\infty}{q_0}$$

Потенциальная энергия на бесконечности (т. е. за пределами поля) равна нулю, следовательно, и потенциал тоже и из формула для работы следует это определение :

Из определения потенциала видно, что это алгебраическая величина:

$$\varphi = \frac{W}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

$\varphi > 0$, если $q > 0$; $\varphi < 0$, если $q < 0$.

Если поле создается системой зарядов $q_1, q_2 \dots q_n$, то потенциал результирующего поля в любой точке найдется на основании принципа суперпозиции, т. е.

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n = \sum_{i=1}^n \varphi_i$$

где φ_i — потенциал поля в данной точке от заряда q_i . Т. о., при наложении электростатических полей потенциал результирующего поля равен алгебраической сумме потенциалов слагаемых полей. В этом состоит значительное преимущество энергетической характеристики поля — потенциала перед силовой характеристикой поля — напряженностью, являющейся векторной величиной.

Связь между напряженностью поля и потенциалом.

Поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал, называется **эквипотенциальной**:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3.$$

Если заряд q_0 по эквипотенциальной поверхности из точки 1 перемещается в точку 2. **Элементарная работа** совершаемая полем:

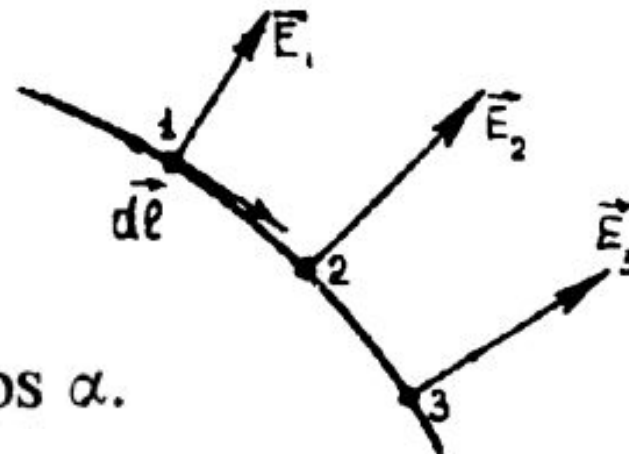
$$dA = -q_0 d\varphi = 0 \quad \text{т. к. } d\varphi = 0.$$

С другой стороны $dA = q_0 E dl \cos \alpha.$

Так как $q_0 \neq 0$, $\vec{E} \neq 0$, $\vec{dl} \neq 0$, то $\cos \alpha = 0.$

Следовательно, $\alpha = \frac{\pi}{2},$

т. е. вектор \vec{E} перпендикулярен к эквипотенциальной поверхности в каждой ее точке (см. рисунок)



Зададим две эквипотенциальные поверхности с потенциалами:

φ_1 и φ_2 – расстояние между ними Δn . Здесь Δn

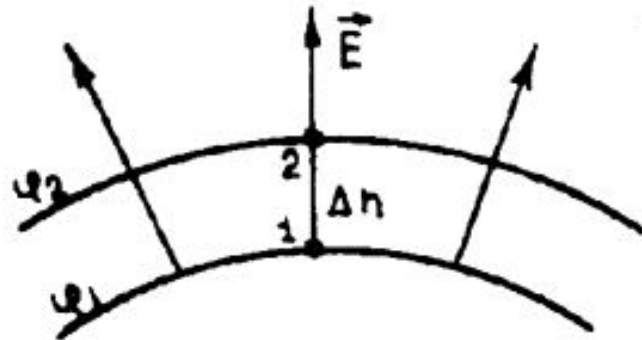
-взято, чтобы показать что расстояние по нормали.

Расстояние между поверхностями очень мало так, что напряженность не меняется

Работа перемещения через потенциал и напряженность поля:

$$\Delta A = -q_0 \Delta \varphi \text{ и } A = q_0 E \cdot \Delta n.$$

Следовательно $E \cdot \Delta n = -\Delta \varphi$ или $E = -\frac{\Delta \varphi}{\Delta n}$,



т. е. напряженность электростатического поля равна изменению потенциала на единицу длины вдоль линии напряженности. Знак «минус» означает, что вдоль линии напряженности потенциал убывает.

В пределе $E = -\frac{d\varphi}{dn}$

т. е. напряженность равна градиенту потенциала с обратным знаком.

1. Потенциал бесконечно заряженной плоскости между точками, лежащими на расстояниях x_1 и x_2 от плоскости:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{x_1}^{x_2} E dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} dx = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} (x_2 - x_1)$$

2. Разность потенциалов между заряженными плоскостями

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_0^d E dx = \int_0^d \frac{\sigma}{\varepsilon_0} dx = \frac{\sigma d}{\varepsilon_0}$$

3. Поле равномерно заряженной сферической поверхности

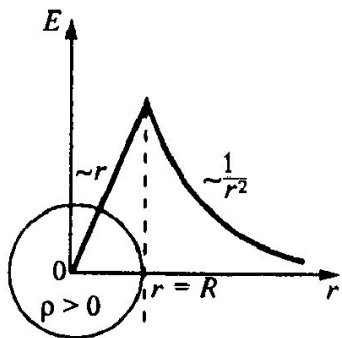
R - радиус сферы (внутри сферы зарядов нет)

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2} dr = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Внутри сферы
потенциал

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 R} = \frac{\sigma R}{\varepsilon_0}$$

4. Потенциал равномерно объемно заряженного шара R - радиус шара



$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r}, \quad \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Вне шара $r > R$

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 R} = \frac{\rho R^2}{3\varepsilon_0}$$

На поверхности шара $r = R$

Внутри шара $r < R$

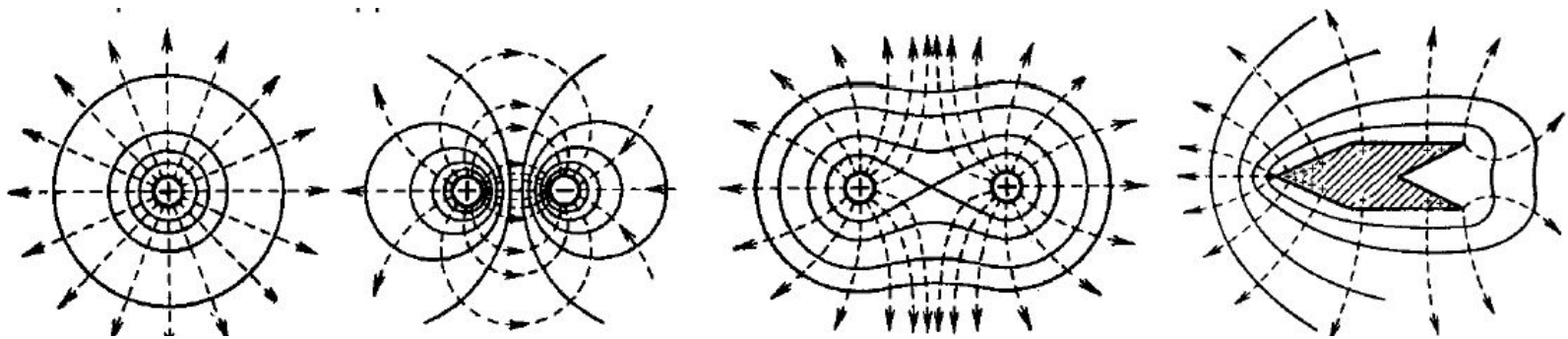
$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 R} = \frac{\rho R^3}{3\varepsilon_0 r}$$

Единица потенциала - вольт (В):

1В есть потенциал такой точки поля, в которой заряд в 1Кл обладает потенциальной энергией 1Дж ($1\text{В}=1\text{Дж}/1\text{Кл}$).

Принцип суперпозиции: потенциал поля, создаваемого несколькими зарядами (системой), равен **алгебраической** сумме потенциалов полей всех этих зарядов.

Графическое изображение распределения потенциала - *эквипотенциальные поверхности*, во всех точках которых потенциал имеет одно и то же значение.



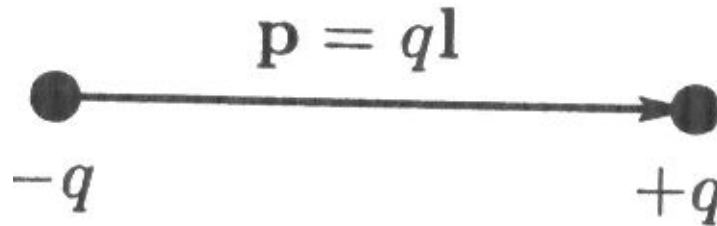
Разность потенциалов между двумя соседними эквипотенциальными поверхностями одинакова.

Густота эквипотенциальных поверхностей характеризует напряженность поля в разных точках.

Вектор ***E*** перпендикулярен эквипотенциальным поверхностям и *направлен в сторону убывания потенциала*.

11. Диполь

Электрический диполь (или двойным электрическим полюсом)- система двух равных по модулю разноименных точечных зарядов ($+q, -q$), расстояние l между которыми $l \ll r$ расстояния r до точки, в которой это поле рассматривается



Плечо диполя l - вектор, направленный по оси диполя от « $-$ » к « $+$ »

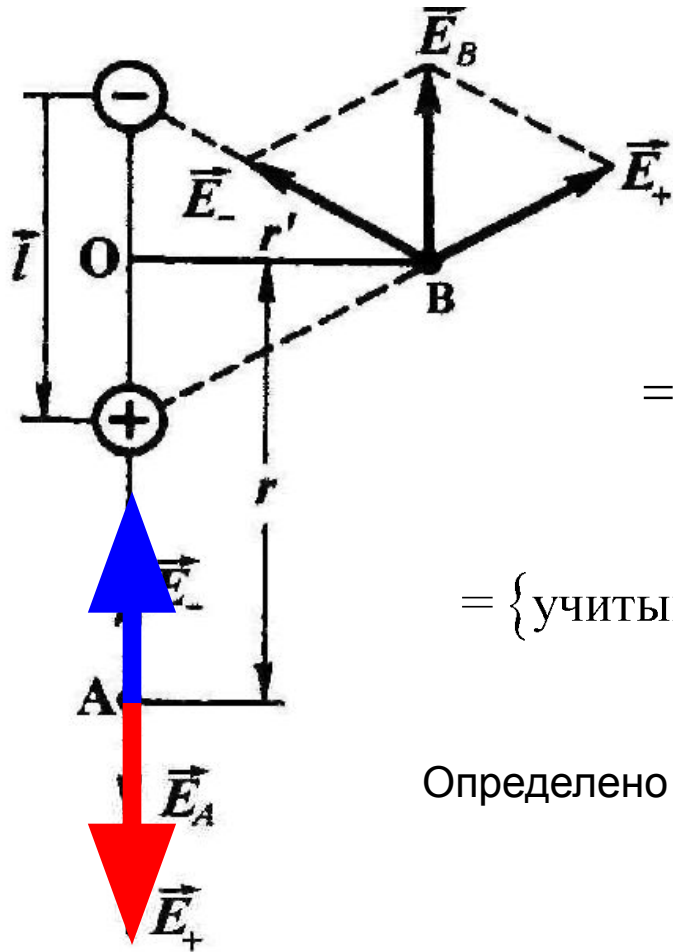
Электрический момент диполя –

p_e - вектор, совпадающий по направлению с плечом диполя и равный:

$$p_e = |q| l$$

Используя принцип суперпозиции
рассчитаем электростатическое поле диполя...

Случай 1) Напряженность поля диполя на продолжении его оси в точке **A**



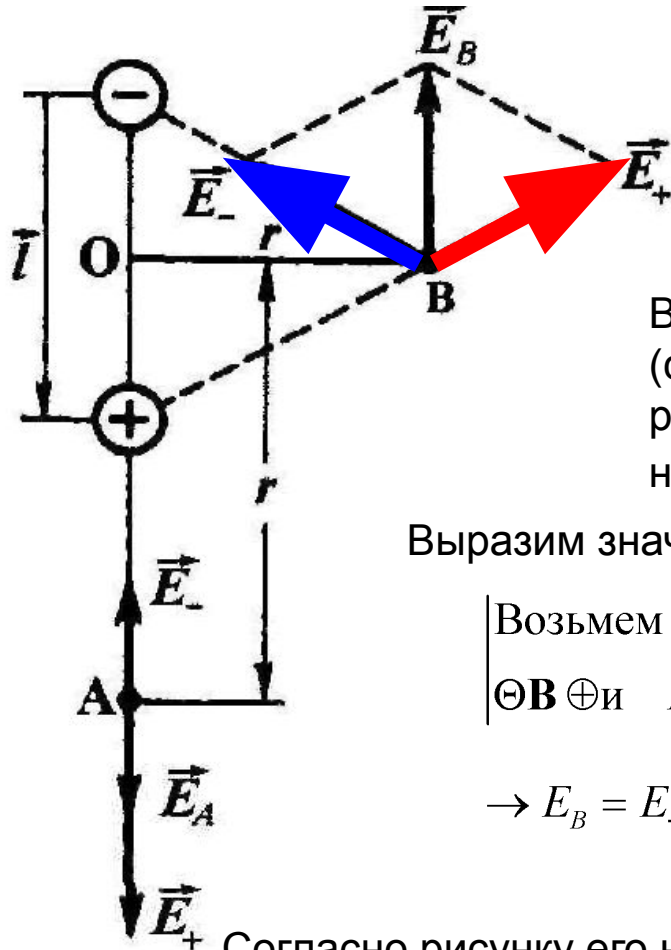
$$E_A = k \frac{q}{(r - l/2)^2} - k \frac{q}{(r + l/2)^2} =$$

$$= \frac{q(r + l/2)^2 - q(r - l/2)^2}{(r - l/2)^2 \cdot (r + l/2)^2} = \frac{2qlr}{(r^2 - (l/2)^2)^2} =$$

$$= \left\{ \text{учитывая, что } r \gg l \text{ получаем} \right\} = k \frac{2ql}{r^3} = k \frac{2p_e}{r^3}$$

Определено и направление поля: оно направлено от диполя

Случай 2) Напряженность поля в точке **B**, лежащей на перпендикуляре, восстановленном к оси диполя из его середины.



Модуль вектора напряженности поля в точке **B** от обоих зарядов равен:

$$E_+ = E_- = k \frac{q}{(r')^2 + (l/2)^2} = k \frac{q}{(r')^2}$$

Воспользовавшись принципом суперпозиции (сложения) векторов получим направление результирующего поля (см.рис) и величину напряженности в точке **B**.

Выразим значение этой напряженности через значение диполя.

$$\left| \begin{array}{l} \text{Возьмем } \Delta_{-} \text{ ки} \\ \text{и } \Delta_{+} \text{ ки} \end{array} \right. : \left\langle \begin{array}{l} \text{Они подобны и} \\ \text{составим пропорцию} \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{l} l \div \sqrt{(r')^2 + (l/2)^2} \\ E_B \div E_+ \end{array} \right.$$

$$\rightarrow E_B = E_+ \frac{l}{\sqrt{(r')^2 + (l/2)^2}} = E_+ \frac{l}{r'}; \quad \text{или} \quad E_B = k \frac{q}{(r')^2} \frac{l}{r'} = k \frac{p_e}{(r')^3}$$

Согласно рисунку его направление противоположно вектору l , **поэтому**

$$E_B = k \frac{q}{(r')^2} \frac{l}{r'} = -k \frac{p_e}{(r')^3} \quad \text{векторный вид: } \vec{E}_B = k \frac{q}{(r')^2} \frac{l}{r'} = k \frac{p_e}{(r')^3}$$

Общий случай 3) сводится к двум рассмотренным частным.

Постановка задачи:

Найти напряженность поля диполя \mathbf{p} (BC) в точке A в СГС-системе (эту систему используем, чтобы избавиться от коэффициента k).

Решение:

- а) на линии BA в точку D поместим два заряда $+q$ и $-q$, (заряды друг друга компенсируют - поле не изменится), но при этом получаем два диполя (см. рис.);
 б) из точки D направление на C составляет перпендикуляр с прямой BC .

Таким образом напряженность поля в точке A

Можно представить в виде суперпозиции полей от двух диполей с моментами \mathbf{p}_1 (BD) и \mathbf{p}_2 (DC):

$$\mathbf{E} = \frac{2\mathbf{p}_1}{r^3} - \frac{\mathbf{p}_2}{r^3};$$

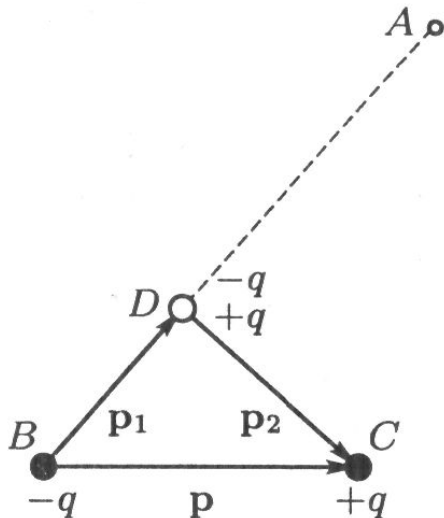
Согласно операциям с векторами $\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = \mathbf{p}$ или $\mathbf{p}_2 = \mathbf{p} - \mathbf{p}_1$. Здесь \mathbf{p} - это исходный диполь. Делаем замену...

$$\mathbf{E} = \frac{3\mathbf{p}_1}{r^3} - \frac{\mathbf{p}}{r^3};$$

Модуль \mathbf{p}_1 через исходный диполь $p_1 = p \cdot \cos \alpha$ или (pn) .

\mathbf{n} - единичный вектор направления на точку A . Получили:

$$\mathbf{E} = \frac{3(pn)}{r^4} \mathbf{r} - \frac{\mathbf{p}}{r^3}; \quad \left| \begin{array}{l} \mathbf{r} - \text{вектор положения точки } A \\ \text{относительно диполя.} \end{array} \right.$$

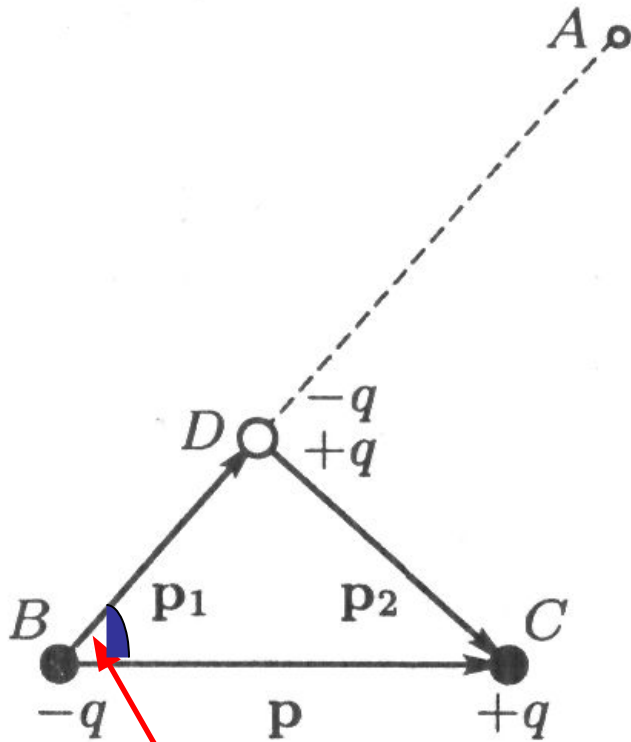


Определим модуль вектора напряженности в точке **A**:

$$\vec{E} = \frac{2p_1}{r_{\perp}^3} - \frac{p_2}{r_{\perp}^3}$$

$$E = \sqrt{E_{\perp}^2 + E_{\parallel}^2} = \sqrt{\left(\frac{2p_1}{r^3}\right)^2 + \left(\frac{p_2}{r^3}\right)^2} = \frac{1}{r^3} \sqrt{4p^2 \cos^2 \alpha + p^2 \sin^2 \alpha} = \frac{p}{r^3} \sqrt{4 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}$$

Результат : $E = \frac{p}{r^3} \sqrt{4 + 3 \cos^2 \alpha}$

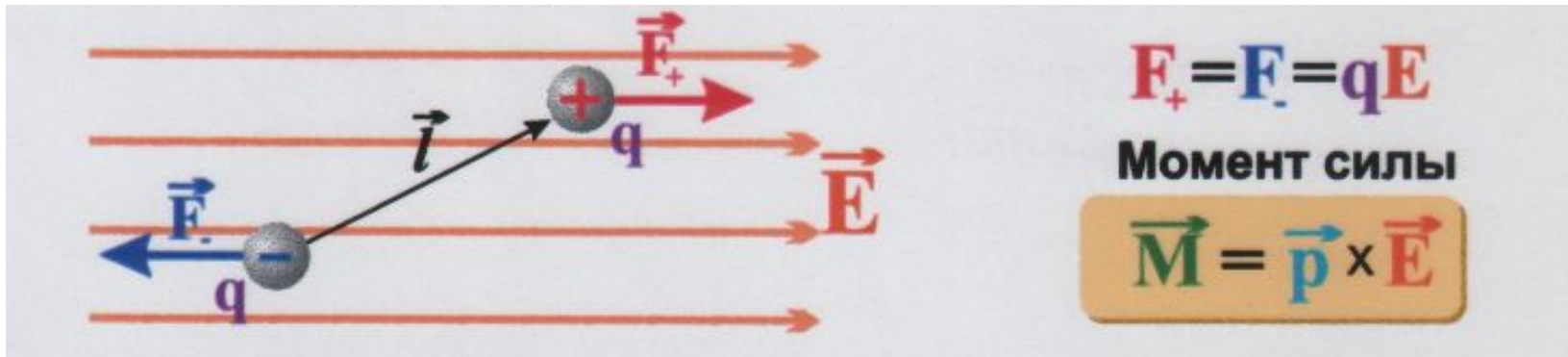


α - угол под которым видна точка A от диполя при этом $l \ll r$

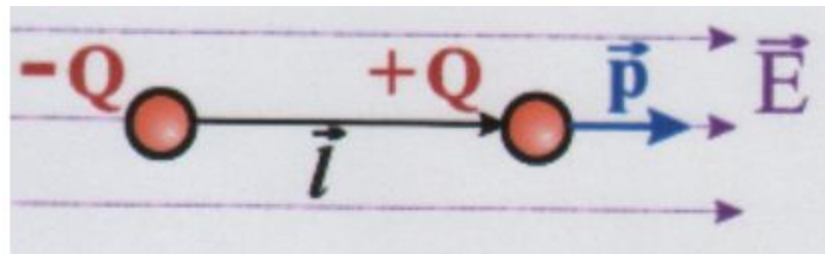
Диполь во внешнем электростатическом поле

На заряды диполя действуют силы – возникает момент, поворачивающий электрический диполь вдоль направления поля.

Если диполь располагается **параллельно** электрическому полю – положение **устойчивое**, если **антипараллельно** – **неустойчиво**.

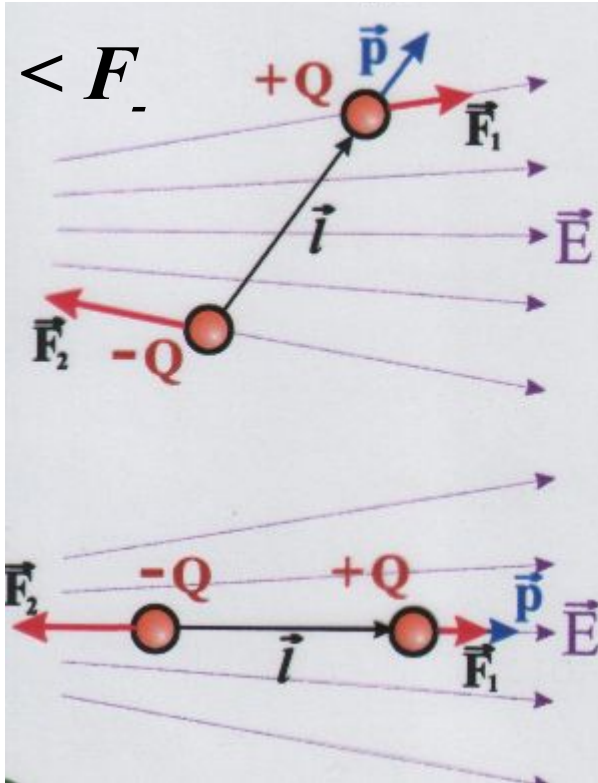


В **однородном поле** результирующая сил равна нулю: силы действующие на **положительный** и **отрицательный** заряды диполя равны по модулю, но противоположны по направлению и диполь покоится



В неоднородном поле действующие на диполь силы не равны

$$F_+ < F_-$$



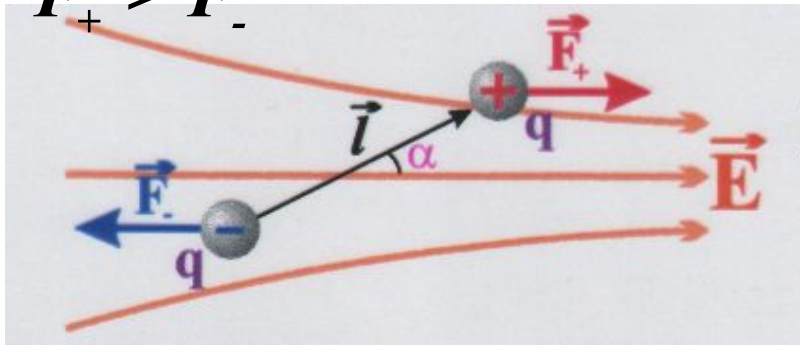
На диполь действуют:

1. Момент не равных по модулю кулоновских сил F_1 и F_2 , вращающий диполь до выполнения условия $\vec{p} \parallel \vec{E}$.
2. Равнодействующая двух сил

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_2 - \mathbf{F}_1 = \mathbf{p} \frac{d\mathbf{E}}{dx},$$

втягивающая диполь в область более сильного поля

$$F_+ > F_-$$



Во внешнем неоднородном поле диполь :

- поворачивается по полю;
- передвигает в область поля с большей напряженностью, под действие результирующей силы
- (втягивается в область более сильного поля).