

Глава III

ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

§ 3.1. Работа, совершаемая при перемещении электрического заряда в электростатическом поле

1. Как было показано в § 6.2 первого тома, работа, совершаемая при перемещении какого-либо тела в гравитационном поле, не зависит от формы пути, по которому происходит перемещение, а зависит только от начального и конечного положений этого тела. Иначе говоря, силы всемирного тяготения — консервативные силы, работа которых связана с изменением потенциальной энергии перемещаемого тела.

Формальное сходство закона всемирного тяготения Ньютона ($F = \gamma m_1 m_2 / r^2$) и закона Кулона ($F = \kappa_1 q_1 q_2 / r^2$) дает основания предполагать, что электростатические силы также должны быть консервативными. Проверим справедливость этого предположения.

Сила \mathbf{F} , действующая на точечный электрический заряд q_0 , находящийся в электростатическом поле напряженностью \mathbf{E} , равна $q_0 \mathbf{E}$. Работа, совершаемая силой \mathbf{F} при перемещении заряда q_0 на отрезок $d\mathbf{l}$,

$$dA = F dl \cos(\widehat{\mathbf{F}, d\mathbf{l}}) = q_0 E \cos(\widehat{\mathbf{E}, d\mathbf{l}}) dl, \quad (3.1)$$

где $(\widehat{\mathbf{E}, d\mathbf{l}})$ — угол между направлениями векторов \mathbf{E} и $d\mathbf{l}$.

В случае конечного перемещения заряда q_0 из точки a в точку b работа сил поля

$$A = q_0 \int_a^b E dl \cos(\widehat{\mathbf{E}, d\mathbf{l}}) = q_0 \int_a^b \mathbf{E} d\mathbf{l}, \quad (3.2)$$

где $\mathbf{E} d\mathbf{l}$ — скалярное произведение векторов \mathbf{E} и $d\mathbf{l}$.

2. Рассмотрим частный случай, когда поле создано точечным зарядом $q > 0$ (рис. 3.1). Тогда

$$dl \cos(\widehat{\mathbf{E}, d\mathbf{l}}) = dr; \quad E = q / 4\pi\epsilon_0 r^2.$$

и работа, совершаемая при перемещении заряда q_0 из точки a в точку b ,

$$A = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (3.3)$$

где r_1 и r_2 — расстояния точек a и b от заряда q .

В формуле (3.3) работа электрических сил отталкивания одноименных зарядов q и q_0 будет положительной, если заряды удаляются один от другого, и отрицательной, если они сближаются. Работа электрических сил притяжения разноименных зарядов q

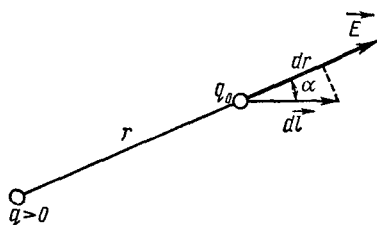


Рис. 3.1

и q_0 будет положительной при сближении зарядов и отрицательной при их удалении друг от друга.

Из (3.3) видно, что работа, совершаемая при перемещении заряда q_0 в поле точечного заряда q , не зависит от формы пути, по которому движется заряд q_0 . Она зависит только от начального и конечного положений заряда q_0 , диэлектрической проницаемости среды и величины зарядов q и q_0 .

3. Если заряд q_0 перемещается в поле, созданном системой точечных зарядов q_1, q_2, \dots, q_n , то на него действует сила $\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n$. Работа A равнодействующей силы равна алгебраической сумме работ составляющих сил (см. т. I, § 3.1). Поэтому

$$A = A_1 + A_2 + \dots + A_n = \sum_{i=1}^n \frac{q_i q_0}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left(\frac{1}{r_{i1}} - \frac{1}{r_{i2}} \right), \quad (3.3')$$

где r_{i1} и r_{i2} — расстояния от заряда q_i до точек a и b , т. е. до начального и конечного положений заряда q_0 .

Полная работа A , как и каждая из работ A_1, A_2, \dots, A_n , зависит от начального и конечного положений заряда q_0 , но не зависит от формы его пути. Следовательно, *электростатические силы являются консервативными*.

4. Работа, которую совершают силы электростатического поля, перемещая единичный положительный заряд по замкнутому пути L , численно равна

$$\oint_L \mathbf{E} dl \cos(\mathbf{E}, \widehat{dl}) = \oint_L \mathbf{E} dl$$

Этот интеграл называется **циркуляцией напряженности** вдоль замкнутого контура L .

В случае замкнутого пути начальная и конечная его точки совпадают. Поэтому, как следует из формулы (3.3'), работа, совершаемая при перемещении заряда во внешнем электростатическом поле по любому замкнутому пути, равна нулю. Иначе говоря, циркуляция напряженности электростатического поля вдоль замкнутого контура равна нулю, т. е.

$$\oint_L \mathbf{E} dl \cos(\mathbf{E}, \widehat{dl}) = 0. \quad (3.4)$$

Силовое поле, напряженность \mathbf{E} которого удовлетворяет условию (3.4), называется **потенциальным**. Таким образом, электростатическое поле является потенциальным.

§ 3.2. Потенциал электростатического поля

1. На свободный заряд q_0 , находящийся в электростатическом поле, действует сила $q_0 \mathbf{E}$, сообщающая ему ускорение.

Работа A , совершаемая силами электростатического поля при перенесении заряда q_0 , зависит только от величины этого заряда и его на-