

1. ПОСТОЯННОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

§ 2. ЗАКОН КУЛОНА. НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ

Электрические и магнитные явления представляют собой две стороны одного неделимого электромагнитного процесса. Между тем в электростатике мы, казалось бы, имеем дело с обособленными, чисто электрическими явлениями; в действительности им также сопутствуют магнитные поля, проявления которых при макрофизическом методе исследования от нас ускользают.

Все микрозаряды тела вне зависимости от каких-либо внешних воздействий находятся в состоянии непрерывного движения, поэтому подлинно неподвижных зарядов тела ни в одной системе отсчета не существует. «Неподвижные» заряды электростатики служат наглядным примером макрофизического усреднения: они считаются неподвижными благодаря усреднению скоростей зарядов движущихся электронов и ионов тела в условиях, когда средняя скорость этих зарядов оказывается равной нулю.

С движением каждого микрозаряда связано магнитное поле, но в силу микрофизического характера этого поля мы не в состоянии его обнаружить классическими экспериментальными методами, которыми можно фиксировать только результирующее (макроскопическое) поле упорядоченного движения зарядов. Поскольку в электростатических задачах результирующая скорость совокупности микрозарядов тела равна нулю, следовательно, и результирующее магнитное поле отсутствует. С помощью методов атомной физики магнитное поле микрозарядов было не только обнаружено, но и подробно исследовано.

Электрические поля, исследуемые в данном разделе, также являются результирующими (макроскопическими), получающимися при усреднении электрических полей микрозарядов. Существенно, что в тех случаях, когда говорят об отсутствии поля в тех или иных точках (например, внутри проводника), то имеют в виду именно отсутствие макроскопического поля, но отнюдь не отсутствие поля микрозарядов (микроскопического поля).

Основным эмпирическим законом, на который опирается электростатика, является закон взаимодействия точечных зарядов (закон Кулона). Заряженное тело считается точечным, если его линейные размеры малы по сравнению с расстояниями до исследуемых точек поля. Поскольку исследуются взаимодействия тел, обусловленных их электрическими зарядами, то вместо „заряженное тело“ часто говорят „заряд“.

Согласно закону Кулона сила взаимодействия \vec{f} точечных зарядов q_1 и q_2 прямо пропорциональна их произведению и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними:

$$\vec{f} = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2} \vec{r}, \quad (2.1)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды, которая предполагается однородной и заполняющей все поле зарядов, k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц.

Относительная диэлектрическая проницаемость является безразмерной величиной и показывает, во сколько раз уменьшается силовое взаимодействие между зарядами при заполнении всего поля однородной средой с $\epsilon > 1$ по сравнению с их взаимодействием в вакууме (где $\epsilon = 1$).

В системе СГС $k = 1$, в СИ $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$. Величина ϵ_0 называется электрической постоянной и является размерной величиной, не зависящей от свойств среды: $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}$.

С учетом указанных значений коэффициентов пропорциональности закон Кулона приобретает вид

в системе СГС

$$\vec{f}_{12} = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r_{12}^2} \vec{r}_{12} = -\vec{f}_{21}, \quad (2.2)$$

в СИ

$$\vec{f}_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}^2} \vec{r}_{12} = -\vec{f}_{21}. \quad (2.3)$$

Причем в последней формуле q_1 и q_2 выражены в кулонах ($1 \text{ Кл} = 3 \cdot 10^9$ ед. заряда СГС), f — в ньютонах, r — в метрах; \vec{f}_{12} означает силу, с которой заряд q_1 действует на заряд q_2 . В сокращенных записях знаки зарядов и индексы 12 (или, соответственно 21) обычно опускаются.

Радиус-вектор \vec{r}_{12} часто рассматривают как разность векторов \vec{r}_2 и \vec{r}_1 , проведенных из начала координат в точки с зарядами q_2 и q_1 :

$$\vec{r}_{12} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1; \quad r = |\vec{r}_2 - \vec{r}_1|.$$

Соответственно, формулы (2.2) и (2.3) могут быть записаны в другом эквивалентном виде:

$$\vec{f}_{12} = \frac{q_1 q_2}{\epsilon |\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^2} (\vec{r}_2 - \vec{r}_1),$$

$$\vec{f}_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^2} (\vec{r}_2 - \vec{r}_1).$$

Основной величиной, характеризующей электрическое поле в данной точке, является напряженность поля \vec{E} (часто ее называют электрическим вектором, а иногда говорят о поле, подразумеваемая напряженность). Для исследования поля используется положительный пробный заряд, который должен быть точечным и достаточно малым по величине, чтобы не вносить существенных искажений в исследуемое поле.

Пусть на пробный заряд q , помещенный в исследуемую точку (точку наблюдения), поле действует с силой \vec{f} . Тогда напряженность поля \vec{E} определяется отношением

$$\vec{E} = \frac{\vec{f}}{q}. \quad (2.4)$$

Итак, напряженность поля в данной точке равна отношению силы, с которой поле действует на пробный заряд, помещенный в эту точку, к величине пробного заряда. Можно также определить напряженность поля как вектор, численно равный силе, с которой поле действует на внесенный в точку наблюдения единичный пробный заряд, и совпадающий по направлению с этой силой. Важно запомнить, что любая точка поля характеризуется своей напряженностью, не зависящей от величины пробного заряда. Единица напряженности СИ:

$$1 \frac{\text{В}}{\text{м}} = \frac{1}{3 \cdot 10^4} \text{ ед. напряженности СГС.}$$

Очень часто требуется вычислить силу \vec{f} , с которой поле действует на заряд q в точке с известной напряженностью \vec{E} . Из (2.4) имеем:

$$\vec{f} = q\vec{E}. \quad (2.5)$$

§ 3. ПОЛЕ ТОЧЕЧНЫХ, ОБЪЕМНЫХ, ПОВЕРХНОСТНЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ЗАРЯДОВ В ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Во многих практических приложениях возникает необходимость определения напряженности поля при заданном распределении зарядов. Существует ряд приемов решения такой задачи, известной под названием прямой задачи электростатики. С одним из этих приемов мы знакомимся ниже, начиная с простейшего примера вычисления поля точечного заряда.

Требуется исследовать поле точечного заряда Q , расположенного в точке M с координатами x_0, y_0, z_0 в электрически однородной среде ($\epsilon = \text{const}$). Ищем напряженность поля в точке наблюдения A с координатами x, y, z (рис. 1). Из точки «источка», где находится заряд Q , проводим радиус-вектор в точку наблюдения. На пробный заряд q , помещенный в точку A , поле дей-