

В механике взаимное действие тел друг на друга характеризуют силой и потенциальной энергией. Электростатическое поле, осуществляющее взаимодействие между зарядами, также характеризуют двумя величинами. Напряженность поля — это *силовая характеристика*. Теперь введем энергетическую характеристику — потенциал.

Потенциал поля. Работа любого электростатического поля при перемещении в нем заряженного тела из одной точки в другую также не зависит от формы траектории, как и работа однородного поля. *На замкнутой траектории работа электростатического поля всегда равна нулю.* Поля, обладающие таким свойством, называют **потенциальными**. Потенциальный характер, в частности, имеет электростатическое поле точечного заряда.

Работу потенциального поля можно выразить через изменение потенциальной энергии. Формула $A = -(W_{n2} - W_{n1})$ справедлива для любого электростатического поля. Но только в случае однородного поля потенциальная энергия выражается формулой (14.14).

Потенциал. Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле пропорциональна заряду. Это справедливо как для однородного поля (см. формулу (14.14)), так и для неоднородного. Следовательно, *отношение потенциальной энергии к заряду не зависит от помещенного в поле заряда.*

Это позволяет ввести новую количественную характеристику поля — *потенциал*, не зависящую от заряда, помещенного в поле.

Для определения значения потенциальной энергии, как мы знаем, необходимо выбрать нулевой уровень ее отсчета. При определении потенциала поля, созданного системой зарядов, предполагается, что потенциал в бесконечно удаленной точке поля равен нулю.

Потенциалом точки электростатического поля называют отношение потенциальной энергии заряда, помещенного в данную точку, к этому заряду.

Согласно данному определению потенциал равен:

$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{q}. \quad (14.15)$$

Напряженность поля \vec{E} — векторная величина. Она представляет собой силовую характеристику поля, которая определяет силу, действующую на заряд q в данной точке поля. А потенциал φ — скаляр, это *энергетическая характеристика поля*; он определяет потенциальную энергию заряда q в данной точке поля.

Если в примере с двумя заряженными пластинами в качестве точки с нулевым потенциалом выбрать точку на отрицательно заряженной пластине (см. рис. 14.26), то согласно формулам (14.14) и (14.15) потенциал однородного поля равен:

$$\varphi = \frac{W_{\text{в}}}{q} = Ed. \quad (14.16)$$

Разность потенциалов. Подобно потенциальной энергии, 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.

Так как потенциальная энергия $W_{\text{п}} = q\varphi$, то работа сил поля равна:

$$A = -(W_{\text{п}2} - W_{\text{п}1}) = -q(\varphi_2 - \varphi_1) = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \quad (14.17)$$

Здесь

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (14.18)$$

— разность потенциалов, т. е. разность значений потенциалов в начальной и конечной точках траектории.

Разность потенциалов называют также **напряжением**.

Согласно формулам (14.17) и (14.18) разность потенциалов между двумя точками оказывается равной:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}. \quad (14.19)$$

Разность потенциалов (напряжение) между двумя точками равна отношению работы поля при перемещении положительного заряда из начальной точки в конечную к величине этого заряда.

Если за нулевой уровень отсчета потенциала принять потенциал бесконечно удаленной точки поля, то потенциал в данной точке равен отношению работы электростатических сил по перемещению положительного заряда из данной точки в бесконечность к этому заряду.

Единица разности потенциалов. Единицу разности потенциалов устанавливают с помощью формулы (14.19). В Международной системе единиц работу выражают в джоулях, а заряд — в кулонах. *Поэтому разность потенциалов между двумя точками численно равна единице, если при перемещении заряда в 1 Кл из одной точки в другую электрическое поле совершает работу в 1 Дж.* Эту единицу называют **вольт** (В); 1 В = 1 Дж/1 Кл.

Энергетическую характеристику электростатического поля называют потенциалом. Потенциал данной точки поля равен отношению потенциальной энергии заряда, по-

мещенного в эту точку в поле, к заряду. Разность потенциалов между двумя точками численно равна работе сил поля по перемещению единичного заряда между этими точками.



1. Какие поля называют потенциальными?
2. Как разность потенциалов между двумя точками поля зависит от работы электрического поля?
3. Что нужно выбрать прежде, чем говорить о значении потенциала в данной точке поля?

§ 98

СВЯЗЬ МЕЖДУ НАПРЯЖЕННОСТЬЮ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ И РАЗНОСТЬЮ ПОТЕНЦИАЛОВ. ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Каждой точке электрического поля соответствуют определенные значения потенциала и напряженности. Найдем связь напряженности электрического поля с потенциалом.

Пусть заряд q перемещается в направлении вектора напряженности однородного электрического поля \vec{E} из точки 1 в точку 2, находящуюся на расстоянии Δd от точки 1 (рис. 14.28). Электрическое поле совершает работу:

$$A = qE\Delta d.$$

Эту работу согласно формуле (14.19) можно выразить через разность потенциалов в точках 1 и 2:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \quad (14.20)$$

Приравнивая выражения для работы, найдем модуль вектора напряженности поля:

$$E = \frac{U}{\Delta d}. \quad (14.21)$$

В этой формуле U — разность потенциалов между точками 1 и 2, которые связаны вектором перемещения $\Delta \vec{d}$, совпадающим по направлению с вектором напряженности \vec{E} (см. рис. 14.28).

Формула (14.21) показывает: чем меньше меняется потенциал на расстоянии Δd , тем меньше напряженность электростатического поля. Если потенциал не меняется совсем, то напряженность поля равна нулю.

Так как при перемещении положительного заряда в направлении вектора напряженности \vec{E} электро-

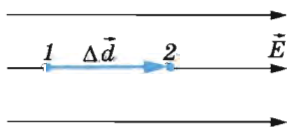


Рис. 14.28

статическое поле совершает положительную работу $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$, то потенциал φ_1 больше потенциала φ_2 .

Следовательно, напряженность электрического поля направлена в сторону убывания потенциала.

Любое электростатическое поле в достаточно малой области пространства можно считать однородным. Поэтому формула (14.21) справедлива для произвольного электростатического поля, если только расстояние Δd настолько мало, что изменением напряженности поля на этом расстоянии можно пренебречь.

Единица напряженности электрического поля. Единицу напряженности электрического поля в СИ устанавливают, используя формулу (14.21). Напряженность электрического поля численно равна единице, если разность потенциалов между двумя точками на расстоянии 1 м в однородном поле равна 1 В. Наименование этой единицы — вольт на метр (В/м).

Напряженность можно также выражать в ньютонах на кулон. Действительно,

$$1 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \cdot \frac{1}{\text{м}} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл}} \cdot \frac{1}{\text{м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

Эквипотенциальные поверхности. При перемещении заряда под углом 90° к силовым линиям электрическое поле не совершает работы, так как сила перпендикулярна перемещению. Значит, если провести поверхность, перпендикулярную в каждой ее точке силовым линиям, то при перемещении заряда вдоль этой поверхности работа не совершается. А это означает, что все точки поверхности, перпендикулярной силовым линиям, имеют один и тот же потенциал.

Поверхности равного потенциала называют **эквипотенциальными**.

Эквипотенциальные поверхности однородного поля представляют собой плоскости (рис. 14.29), а поля точечного заряда — концентрические сферы (рис. 14.30).

Подобно силовым линиям, эквипотенциальные поверхности качественно характеризуют распределение поля в пространстве. Вектор напряженности перпендикулярен эквипотенциальным поверхностям и направлен в сторону уменьшения потенциала.

Эквипотенциальные поверхности строятся обычно так, что разность потенциалов между двумя соседни-

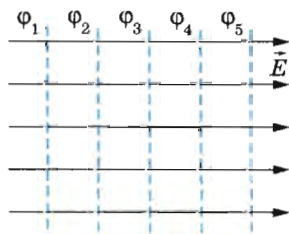


Рис. 14.29

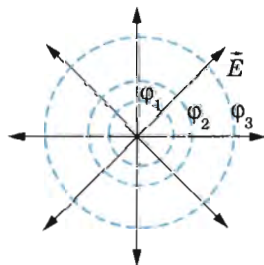


Рис. 14.30

ми поверхностями постоянна. Поэтому согласно формуле (14.21) расстояния между соседними эквипотенциальными поверхностями увеличиваются по мере удаления от точечного заряда, так как напряженность поля уменьшается.

Эквипотенциальные поверхности однородного поля расположены на равных расстояниях друг от друга.

Эквипотенциальной является поверхность любого проводника в электростатическом поле. Ведь силовые линии перпендикулярны поверхности проводника. Причем не только поверхность, но и все точки внутри проводника имеют один и тот же потенциал. Напряженность поля внутри проводника равна нулю, значит, равна нулю и разность потенциалов между любыми точками проводника.

Модуль напряженности электростатического поля численно равен разности потенциалов между двумя близкими точками в этом поле, деленной на расстояние между этими точками.



1. Чему равна разность потенциалов между двумя точками заряженного проводника?
2. Как связана разность потенциалов с напряженностью электрического поля?



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

При решении задач с использованием понятия напряженности электрического поля нужно прежде всего знать формулы (14.8) и (14.11), определяющие силу, действующую на заряд со стороны электрического поля, и напряженность поля точечного заряда. Если поле создается несколькими зарядами, то для расчета напряженности в данной точке надо сделать рисунок и затем определить напряженность как геометрическую сумму напряженностей полей.

Работа сил, действующих на заряд со стороны поля, выражается через разность потенциальных энергий или разность потенциалов (см. формулу (14.20)). Потенциал однородного поля определяется формулой (14.16), при этом надо всегда указывать как выбран нулевой уровень потенциала.

Часто при решении задач надо учитывать, что все точки проводника в электростатическом поле имеют один и тот же потенциал, а напряженность поля внутри проводника равна нулю.

1. Два одинаковых положительных точечных заряда расположены на расстоянии r друг от друга в вакууме. Определите напряженность электрического поля в точке, расположенной на одинаковом расстоянии r как от одного, так и от другого заряда.

Решение. Согласно принципу суперпозиции искомая напряженность \vec{E} равна геометрической сумме напряженностей полей, созданных каждым из зарядов (рис. 14.31): $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.

Модули напряженностей полей зарядов равны:

$$E_1 = E_2 = k \frac{|q|}{r^2}.$$

Диагональ параллелограмма, построенного на векторах \vec{E}_1 и \vec{E}_2 , есть напряженность результирующего поля, модуль которой равен:

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

2. Проводящая сфера радиусом $r = 0,2$ м, несущая заряд $q = 1,8 \cdot 10^{-4}$ Кл, находится в вакууме. Определите: 1) модуль напряженности \vec{E} электрического поля на ее поверхности; 2) модуль напряженности \vec{E}_1 электрического поля в точке, отстоящей на расстоянии $r_1 = 10$ м от центра сферы; 3) модуль напряженности \vec{E}_0 в центре сферы; 4) во сколько раз потенциал в центре сферы отличается от потенциала на ее поверхности.

Решение. Электрическое поле заряженной сферы вне ее совпадает с полем точечного заряда. Поэтому

$$E = k \frac{|q|}{r^2}.$$

Следовательно,

$$1) E = \frac{k|q|}{r^2} \approx 4 \cdot 10^7 \text{ В/м};$$

$$2) E_1 = k \frac{|q|}{r_1^2} \approx 16 \cdot 10^3 \text{ В/м};$$

3) напряженность поля в любой точке внутри проводящей сферы равна нулю: $E_0 = 0$;

4) потенциалы всех точек внутри сферы одинаковы и равны потенциалу поверхности сферы.

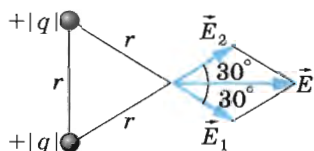


Рис. 14.31



УПРАЖНЕНИЕ 17

1. В направленном вертикально вниз однородном электрическом поле напряженностью $1,3 \cdot 10^5$ В/м капля жидкости массой $2 \cdot 10^{-9}$ г оказалась в равновесии. Определите заряд капли и число избыточных электронов на ней.

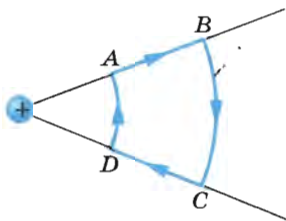


Рис. 14.32

2. Почему заряженная расческа притягивает электрически нейтральные кусочки бумаги?

3. Электрический заряд $q_1 > 0$ переместили по замкнутому контуру $ABCD$ в поле точечного заряда $q_2 > 0$ (рис. 14.32). На каких участках работа поля по перемещению заряда была положительной? отрицательной? равной нулю? Как изменялась потенциальная энергия системы? Чему равна полная работа поля по перемещению заряда?

4. Двигаясь в электрическом поле, электрон перешел из одной точки в другую, потенциал которой выше на 1 В. Насколько изменилась кинетическая энергия электрона? потенциальная?

5. Точечные заряды $q_1 > 0$ и $q_2 < 0$ расположены в двух вершинах равностороннего треугольника со стороной r . Определите модуль вектора напряженности в третьей вершине.

6. Потенциал электростатического поля возрастает в направлении снизу вверх. Куда направлен вектор напряженности поля?

7. Разность потенциалов между точками, лежащими на одной силовой линии на расстоянии 3 см друг от друга, равна 120 В. Определите напряженность электростатического поля, если известно, что поле однородно.

8. Изобразите эквипотенциальные поверхности бесконечного проводящего и равномерно заряженного цилиндра.

9. У электрона, движущегося в электрическом поле, увеличилась скорость с $v_1 \approx 1 \cdot 10^7$ м/с до $v_2 \approx 3 \cdot 10^7$ м/с. Определите разность потенциалов между начальной и конечной точками перемещения электрона. Отношение заряда электрона к его массе равно: $\frac{|e|}{m} = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

§ 99

ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ. ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРОЕМКОСТИ

Выясним важный для практики вопрос: при каком условии можно накопить на проводниках большой электрический заряд?

При любом способе электризации тел — с помощью трения, электростатической машины, гальванического элемента и т. д. — первоначально нейтральные тела заряжаются вследствие того, что некоторая часть заряженных частиц переходит от одного тела к другому. Обычно этими частицами являются электроны.

При электризации двух проводников, например от электростатической машины, один из них приобретает заряд $+q$, а другой $-q$. Между проводниками появляется электрическое поле и возникает разность потенциалов (напряже-