

Потенциальная энергия заряженного тела в однородном электростатическом поле

Вспомните из курса механики определение потенциальной энергии в поле силы тяжести.

Какие силы действуют на точечный заряд в электростатическом поле?

Какое поле называется однородным?

Заряженные тела притягивают или отталкивают друг друга. При перемещении заряженных тел, например, листочков электроскопа, действующие на них силы совершают работу. Из механики известно, что система, способная совершить работу благодаря взаимодействию тел друг с другом, обладает потенциальной энергией. Значит, система заряженных тел обладает потенциальной энергией, называемой *электростатической* или *электрической*.

ИНТЕРЕСНО

Понятие потенциальной энергии самое сложное в электростатике. Вспомните, как нелегко было представить себе, что такое потенциальная энергия в механике. Силу мы ощущаем непосредственно, а потенциальную энергию нет. На пятом этаже дома потенциальная энергия нашего тела больше, чем на первом. Но мы это никак не воспринимаем. Различие становится понятным, если вспомнить, что при подъёме вверх пришлось совершить работу, а также если представить себе, что произойдёт при падении с пятого этажа.

Энергия взаимодействия электронов с ядром в атоме и энергия взаимодействия атомов друг с другом в молекулах (химическая энергия) — это в основном электрическая энергия.

С точки зрения теории близкодействия на заряд непосредственно действует электрическое поле, созданное другим зарядом. При перемещении заряда действующая на него со стороны поля сила совершает работу. (В дальнейшем для краткости будем говорить просто о работе поля.) Поэтому можно утверждать, что заряженное тело в электрическом поле обладает энергией. Найдём потенциальную энергию заряда в однородном электрическом поле.

Работа при перемещении заряда в однородном электростатическом поле. Однородное поле создают, например, большие параллельные металлические пластины, имеющие заряды противоположного знака. Это поле действует на заряд q с постоянной силой $\vec{F} = q\vec{E}$, подобно тому как Земля действует с постоянной силой $\vec{F} = m\vec{g}$ на камень вблизи её поверхности.

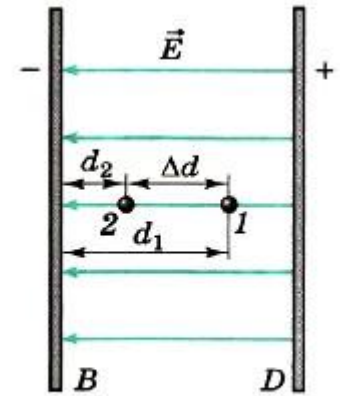


Рис. 14.31

Пусть пластины расположены вертикально (рис. 14.31), левая пластина В заряжена отрицательно, а правая — положительно. Вычислим работу, совершаемую полем при перемещении положительного заряда q из точки 1, находящейся на расстоянии d_1 от левой пластины, в точку 2, расположенную на расстоянии d_2 от неё. Точки 1 и 2 лежат на одной силовой линии. Электрическое поле при перемещении заряда совершит положительную работу:

$$A = qE(d_1 - d_2) = qE\Delta d. \quad (14.12)$$

Важно

Работа по перемещению заряда в электрическом поле не зависит от формы траектории, подобно тому как не зависит от формы траектории работа силы тяжести.

Докажем это непосредственным расчётом.

Пусть перемещение заряда происходит по кривой (рис. 14.32). Разобьём эту кривую на малые перемещения. Сила, действующая на заряд, остаётся постоянной (поле однородно), а угол, а между направлением силы и направлением перемещения будет изменяться. Работа на малом перемещении $\Delta\vec{s}$ равна $\Delta A = qE|\Delta\vec{s}|\cos\alpha$. Очевидно, что $|\Delta\vec{s}|\cos\alpha = \Delta d$ — проекция малого перемещения на горизонтальное направление.

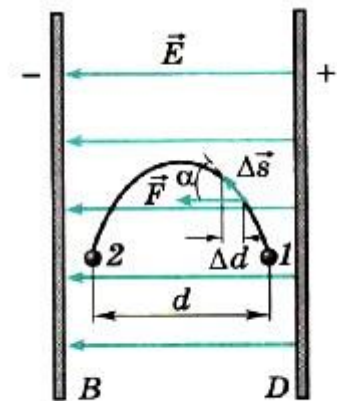


Рис. 14.32

Суммируя работы на малых перемещениях, получаем $A = qEd$.

С помощью аналогичных рассуждений можно вывести формулу для работы кулоновской силы при перемещении заряда q_0 из точки 1 в точку 2 в неоднородном поле неподвижного точечного заряда q . При этом должно быть

учтено, что сила $F = k \frac{q_0 q}{r^2}$ зависит от расстояния до точечного заряда q . Для работы кулоновской силы в поле точечного заряда q справедливо выражение

$$A = kq_0q \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{q_0q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Мы видим, что работа зависит только от положения начальной (r_1) и конечной (r_2) точек траектории и не зависит от формы траектории.

Электростатическая сила, действующая на заряды, является так же, как и силы тяжести, тяготения и упругости, консервативной силой.



Изобразите схематично однородное электрическое поле и начертите несколько траекторий, по которым движется заряд q . Покажите, что работа поля не зависит от траектории.

Потенциальная энергия. Поскольку работа электростатической силы не зависит от формы траектории точки её приложения, сила является консервативной, и её работа согласно формуле (5.22) равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком:

$$A = -(W_{п2} - W_{п1}) = -\Delta W_{п}. \quad (14.13)$$

Сравнивая полученное выражение (14.12) с общим определением потенциальной энергии (14.13), видим, что $\Delta W_{п} = W_{п2} - W_{п1} = -qEd$. Считаем, что в точке 2 потенциальная энергия равна нулю. Тогда

Важно

потенциальная энергия заряда в однородном электростатическом поле равна:

$$W_{п} = qEd, \quad (14.14)$$

где d — расстояние от точки 2 до любой точки, находящейся с точкой 2 на одной силовой линии.

Теперь получим формулу для потенциальной энергии заряда, находящегося в поле точечного заряда. Изменение потенциальной энергии заряда q_0 при перемещении из точки 1 в точку 2 в неоднородном поле неподвижного точечного заряда q равно работе консервативной силы, взятой с обратным знаком:

$$\Delta W_{п} = -A = W_{п2} - W_{п1} = \frac{-q_0q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Если считать, что в бесконечно удалённой точке потенциальная энергия равна нулю (при $r_2 \rightarrow \infty$ $W_{п2} = 0$), то потенциальная энергия заряда q_0 в некоторой точке, находящейся на расстоянии r от точечного заряда q , создающего

поле: $W_{\text{п}} = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0 r}$. Потенциальная энергия прямо пропорциональна заряду q_0 , внесённому в поле.

Отметим, что формула (14.14) подобна формуле $W_{\text{п}} = mgh$ для потенциальной энергии тела. Но заряд q в отличие от массы может быть, как положительным, так и отрицательным.

Если поле совершает положительную работу, то потенциальная энергия заряженного тела при его свободном перемещении в поле в точку 2 уменьшается: $\Delta W_{\text{п}} < 0$. Одновременно согласно закону сохранения энергии растёт его кинетическая энергия. И наоборот, если работа отрицательна (например, при свободном движении положительно заряженной частицы в направлении, противоположном направлению вектора напряжённости поля E ; это движение подобно движению камня, брошенного вверх), то $\Delta W_{\text{п}} > 0$. Потенциальная энергия растёт, а кинетическая энергия уменьшается; частица тормозится.

Важно

На замкнутой траектории, когда заряд возвращается в начальную точку, работа поля равна нулю:

$$A = -\Delta W_{\text{п}} = -(W_{\text{п}2} - W_{\text{п}1}) = 0.$$

Это — свойство полей консервативных сил.

ЗАДАНИЕ

1. Написать краткий конспект в рабочую тетрадь

2. Вопросы (устно уметь отвечать)

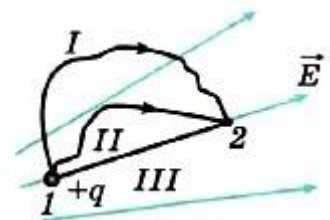
1. Как связано изменение потенциальной энергии заряженной частицы с работой электрического поля?
2. Чему равна потенциальная энергия заряженной частицы в однородном электрическом поле?

3. Дополнительно (для желающих)

Образцы заданий ЕГЭ

А1. В неоднородном электростатическом поле перемещается положительный заряд из точки 1 в точку 2 по разным траекториям. В каком случае работа сил поля меньше?

- 1) I
- 2) II



3) Ш

4) работа сил электростатического поля по траекториям I, II, III одинакова

Потенциал электростатического поля и разность потенциалов

Обладает ли электрическое поле энергией? В чём это выражается?

Как рассчитать энергию поля?

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

Потенциал поля. Работа любого электростатического поля при перемещении в нём заряженного тела из одной точки в другую также не зависит от формы траектории, как и работа однородного поля.

Важно

На замкнутой траектории работа электростатического поля всегда равна нулю.

Запомни

Поле, работа которого по перемещению заряда по замкнутой траектории всегда равна нулю, называют **потенциальным**.



Как называются силы, поле которых потенциально?
Подумайте, почему они так называются.

Потенциальный характер, в частности, имеет электростатическое поле точечного заряда.

Работу потенциального поля можно выразить через изменение потенциальной энергии. Формула $A = - (W_{п2} - W_{п1})$ справедлива для любого электростатического поля. Но только в случае однородного поля потенциальная энергия выражается формулой (14.14).

Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле пропорциональна заряду. Это справедливо как для однородного поля (см. формулу (14.14)), так и для неоднородного. Следовательно,

Важно

отношение потенциальной энергии к заряду не зависит от помещённого в поле заряда.

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

Для определения значения потенциальной энергии, как мы знаем, необходимо выбрать нулевой уровень её отсчёта. При определении потенциала поля,

созданного системой зарядов, как правило, предполагается, что потенциал в бесконечно удалённой точке поля равен нулю.

Запомни

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

Согласно данному определению потенциал равен:

$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{q}. \quad (W_{\text{п}} \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty.) \quad (14.15)$$

Из этой формулы следует, что потенциал поля неподвижного точечного заряда q в данной точке поля, находящейся на расстоянии r от заряда, равен:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Напряжённость 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. 14.31), то согласно формулам (14.14) и (14.15) потенциал однородного поля в точке, отстоящей на расстоянии d от неё, равен:

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

Разность потенциалов. Подобно потенциальной энергии, значение потенциала в данной точке зависит от выбора нулевого уровня для отсчёта потенциала, т. е. от выбора точки, потенциал которой принимается равным нулю.

Важно

Изменение потенциала не зависит от выбора нулевого уровня отсчёта потенциала.

Так как потенциальная энергия $W_{\text{п}} = d\varphi q$, 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 потенциала в начальной и конечной точках траектории.

Запомни

Разность потенциалов называют также **напряжением**.

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

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

Если за нулевой уровень отсчёта потенциала принять потенциал бесконечно удалённой 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.

Важно

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): $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж}/1 \text{ Кл}$.

Выразим единицу разности потенциалов через основные единицы СИ. Так как

Так как

$$1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}},$$

в свою очередь

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot 1 \text{ м} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2},$$

$$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с},$$

то

$$1 \text{ В} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{с}^3}.$$

ЗАДАНИЕ

1. Написать краткий конспект в рабочую тетрадь

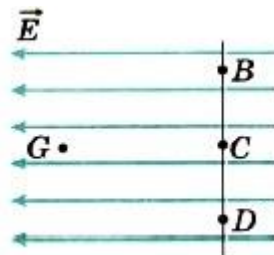
2. Вопросы (устно уметь отвечать)

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

3. Дополнительно (для желающих)

Образцы заданий ЕГЭ

A1. Выберите правильное соотношение разности потенциалов между точкой G и точками B, C и D (см. рис.) в однородном электростатическом поле.



- 1) $\varphi_G - \varphi_B = \varphi_G - \varphi_D > \varphi_G - \varphi_C$
- 2) $\varphi_G - \varphi_B = \varphi_G - \varphi_D < \varphi_G - \varphi_C$
- 3) $\varphi_G - \varphi_B = \varphi_G - \varphi_C = \varphi_G - \varphi_D < 0$
- 4) $\varphi_G - \varphi_B = \varphi_G - \varphi_C = \varphi_G - \varphi_D > 0$

A2. Работа поля по перемещению заряда $q = 10^{-5}$ Кл из одной точки в другую равна 10 Дж. Разность потенциалов между этими точками равна

- 1) 10^{-4} В
- 2) 10^4 В
- 3) -10^6 В
- 4) 10^6 В

A3. Для перемещения заряда 10 6 Кл из точки, потенциал которой равен 2 В, в точку, потенциал которой равен 6 В, надо совершить работу, равную

- 1) $4 \cdot 10^{-6}$ Дж
- 2) $4 \cdot 10^6$ Дж
- 3) $-4 \cdot 10^{-6}$ Дж
- 4) $-2 \cdot 10^6$ Дж