

# ***РАБОТА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ***

---

**10 КЛАСС**

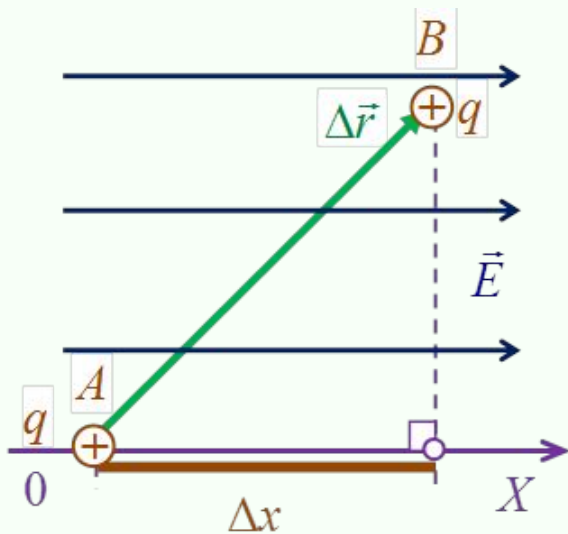
Это материалы сайтов [www.alsak.ru](http://www.alsak.ru) и [web-physics.ru](http://web-physics.ru)

учитель физики,  
МГОЛ № 1,  
Сакович А.Л.

---

Могилев, 2014, 2015, 2016

# РАБОТА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ



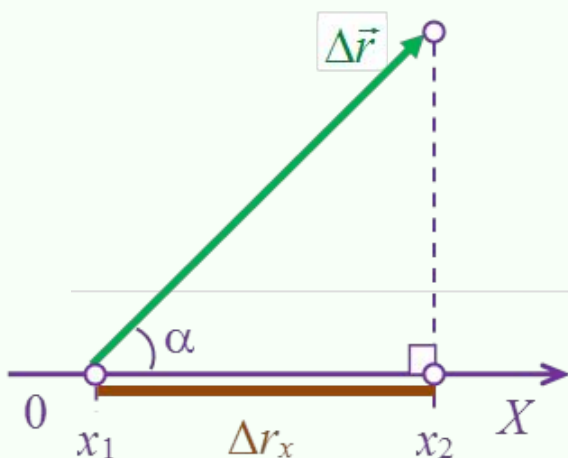
$$A_{AB} = q \cdot E \cdot \Delta x.$$

- ❖ Работа электростатического поля при перемещении заряда в однородном электростатическом поле между точками  $A$  и  $B$  равна произведению заряда  $q$ , на значение напряженности электрического поля  $E$  и на проекцию перемещения заряда  $\Delta x$  на ось, направленную вдоль силовой линии.

Проекция перемещения заряда на ось  $OX$  равна

$$\Delta x = \Delta r_x = \Delta r \cdot \cos \alpha = x_2 - x_1,$$

где  $x_2$  и  $x_1$  — координаты заряда в конечном и начальном положении соответственно;  $\Delta r$  — перемещение заряда;  $\alpha$  — угол между направлением перемещения и силовой линией.



# РАБОТА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

---

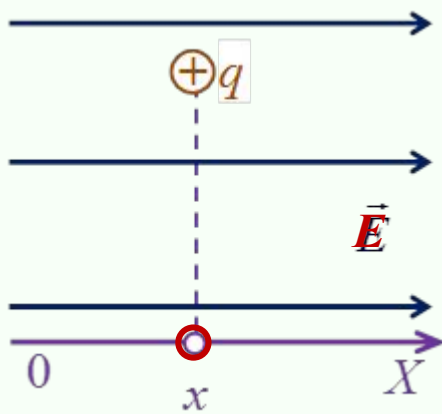
- ❖ Поле, работа сил которого не зависит от формы траектории и на замкнутой траектории равна нулю, называется *потенциальным* или *консервативным*.

Электростатическое поле — это потенциальное поле.

---

# ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Потенциальная энергия  $W_p$  заряда  $q$  в электростатическом поле



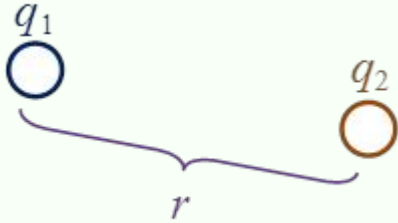
$$W_p = -q \cdot E \cdot x,$$

где  $E$  — значение напряженности электрического поля в точке, где находится заряд;

$x$  — координата заряда на оси  $OX$ , направленной вдоль силовой линии.

Координата  $x$  зависит от выбора системы отсчета (СО), поэтому и потенциальная энергия  $W_p$  заряда зависит от выбора СО.

# ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ



Рассмотрим два точечных заряда  $q_1$  и  $q_2$ , расположенных на расстоянии  $r$  друг от друга.

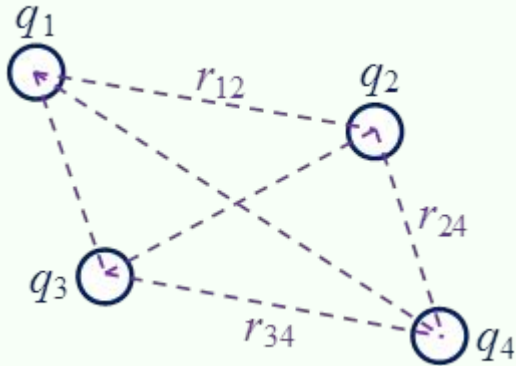
Потенциальная энергия  $W_p$  взаимодействия двух зарядов равна

$$W_p = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r},$$

где  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$  — коэффициент пропорциональности.

- Если  $q_1$  и  $q_2$  — одноименные заряды, то  $W_p > 0$ ,
- если  $q_1$  и  $q_2$  — разные по знаку заряды, то  $W_p < 0$ .

# ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ



Рассмотрим несколько точечных зарядов  $q_1, q_2, q_3, \dots$

Потенциальная энергия  $W_p$  их взаимодействия равна сумме потенциальных энергий *всех пар* взаимодействующих зарядов:

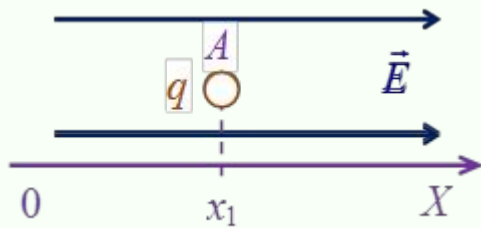
$$W_p = W_{p12} + W_{p13} + W_{p14} + \dots + W_{p23} + W_{p24} + \dots,$$

где  $W_{p12}, W_{p13}, W_{p14}, \dots$  — потенциальная энергия взаимодействия *первого* заряда со вторым, с третьим, ...;

$W_{p23}, W_{p24}, \dots$  — потенциальная энергия взаимодействия *второго* заряда с третьим, с четвертым и т.д.

# ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛЯ

Введем еще одну характеристику электрического поля.



В точку  $A$  однородного электростатического поля с напряженностью  $E$  помещаем заряд  $q$ .

Выберем  $CO$ , в которой координата точки  $A$  равна  $x_1$ .

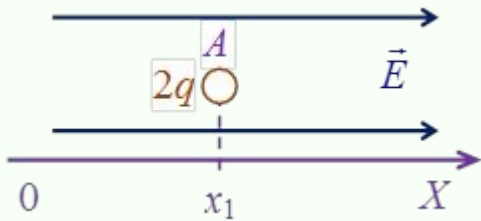
Потенциальная энергия  $W_p$  заряда  $q$  в точке  $A$ :

$$W_p = -q \cdot E \cdot x_1.$$

Найдем значение величины

$$\frac{W_p}{q} = -E \cdot x_1.$$

# ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛЯ



В точку  $A$  однородного электростатического поля с напряженностью  $E$  помещаем заряд  $2q$ .

Потенциальная энергия  $W_p$  заряда  $2q$  в точке  $A$ :

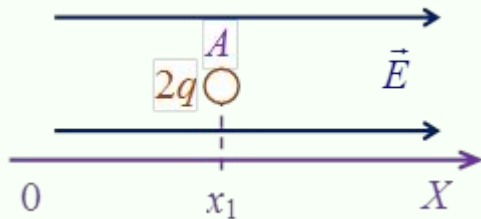
$$W_p = -2q \cdot E \cdot x_1.$$

Найдем значение величины

$$\frac{W_p}{2q} = -E \cdot x_1.$$



# ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛЯ



Аналогичный результат мы получим, если будем помещать в точку  $A$  другие заряды.

Следовательно, величина

$$\frac{W_p}{q} = -E \cdot x$$

- *не зависит* от величины заряда, который мы помещаем в электрическое поле;
- но *зависит* от параметров электрического поля:
  - от  $E$  (напряженности поля),
  - от  $x$  (координаты точки поля).

# ПОТЕНЦИАЛ

---

Новая характеристика электрического поля — *потенциал*  $\varphi$  поля в данной точке.

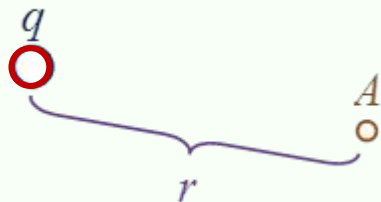
$$\varphi = \frac{W_p}{q}.$$

❖ *Потенциал электростатического поля*  $\varphi$  в данной точке пространства — это скалярная физическая величина, равная отношению потенциальной энергии  $W_p$ , которой обладает точечный заряд  $q$  в данной точке пространства, к величине этого заряда.

$$[\varphi] = \frac{[W_p]}{[q]} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В}.$$

- Единицей измерения потенциала является *вольт* (В).
- Потенциал — это *энергетическая характеристика* электрического поля.

# ПОТЕНЦИАЛ



Пусть электрическое поле создано *точечным* зарядом  $q$ .

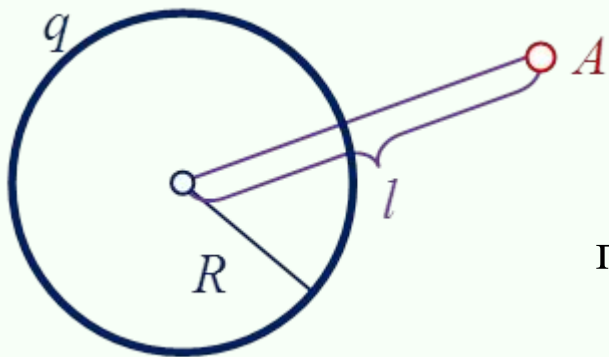
В точке  $A$ , расположенной на расстоянии  $r$  от заряда  $q$ , потенциал поля

$$\varphi = k \cdot \frac{q}{r},$$

где  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$  — коэффициент пропорциональности.

# ПОТЕНЦИАЛ

❖ Значение потенциала электрического поля, созданного сферой радиуса  $R$ , имеющей заряд  $q$ , в точке  $A$  на расстоянии  $l$  от центра сферы, равно



- $\varphi = k \cdot \frac{q}{l}$  если  $l > R$
- $\varphi = k \cdot \frac{q}{R}$  если  $l \leq R$

где  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$  — коэффициент пропорциональности.

# СВОЙСТВА ПОТЕНЦИАЛА

---

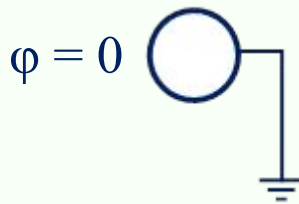
1. Потенциал (как и потенциальная энергия заряда) зависит от выбора СО (нулевого уровня).

- За нулевой потенциал в *технике* выбирают:

- потенциал поверхности Земли

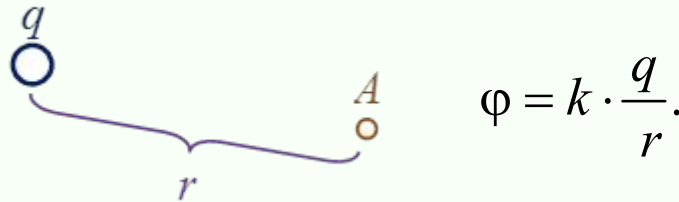
или

- потенциал проводника, соединенного с землей (*заземленный*).



# СВОЙСТВА ПОТЕНЦИАЛА

---



- За нулевой уровень потенциала в *физике* принимается любая точка, бесконечно удаленная от зарядов, создающих поле.

$$\varphi = 0 \text{ если } r \rightarrow \infty$$

2. Если электрическое поле создано:
    - зарядом  $q > 0$ , то потенциал этого поля  $\varphi > 0$ ;
    - зарядом  $q < 0$ , то  $\varphi < 0$ .
-

# СВОЙСТВА ПОТЕНЦИАЛА

---

## 3. Принцип суперпозиции.

$q_1$   
○

$q_2$   
○

$A$  ○

○  $q_3$

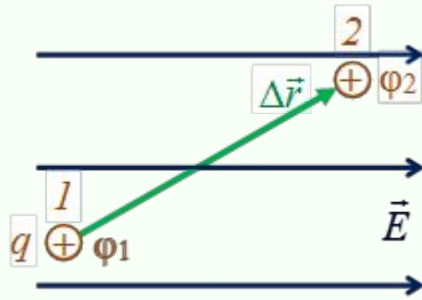
Пусть электрическое поле создано зарядами  $q_1, q_2, q_3$ . Тогда

$$\varphi_A = \varphi_{A1} + \varphi_{A2} + \varphi_{A3},$$

$$\varphi_A = \varphi_{A1} + \varphi_{A2} + \varphi_{A3} + \dots$$

- ❖ Потенциал поля, созданного несколькими зарядами, в некоторой точке пространства равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых в этой точке каждым зарядом в отдельности.
-

# РАБОТА ПОЛЯ



Пусть потенциалы электрического поля в точке 1 —  $\varphi_1$ , в точке 2 —  $\varphi_2$ .

Тогда работ электрического поля по перемещению заряда из точки 1 в точку 2.

$$A_{12} = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2).$$



# ПОТЕНЦИАЛ

---

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}.$$

- ❖ *Разность потенциалов* между данными точками электростатического поля — это скалярная физическая величина, численно равная работе сил поля по перемещению заряда в 1 Кл между этими точками.
    - Разность потенциалов обозначается  $\varphi_1 - \varphi_2$ , измеряется в вольтах (В).  
*Не путайте*
      - *изменение потенциала*  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$
      - *и разность потенциала*  $\varphi_1 - \varphi_2$ .
    - Разность потенциалов ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) не зависит от выбора СО.
-

# НАПРЯЖЕНИЕ

Разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$  называют *электрическим напряжением* между точками поля 1 и 2, обозначают  $U_{12}$  или  $U$ :

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U_{12} = U = \frac{A_{12}}{q}.$$

- ❖ *Напряжение* между данными точками электростатического поля — это скалярная физическая величина, численно равная работе сил поля по перемещению заряда в 1 Кл между этими точками.
  - Измеряется в вольтах (В).
  - Данная формула *верна*, если на участке поля между двумя точками работа *сторонних сил* равна нулю.

*Не путайте*

- *напряжение*  $U$
- *и напряженность*  $E$ .

# НАПРЯЖЕНИЕ

---

Не системная единица измерения работы электрического поля — *электронвольт* (эВ).

- ❖ 1 эВ равен работе, совершаемой силами электрического поля при перемещении электрона ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл) между двумя точками, напряжение между которыми равно 1 В.

$$A = q \cdot U.$$

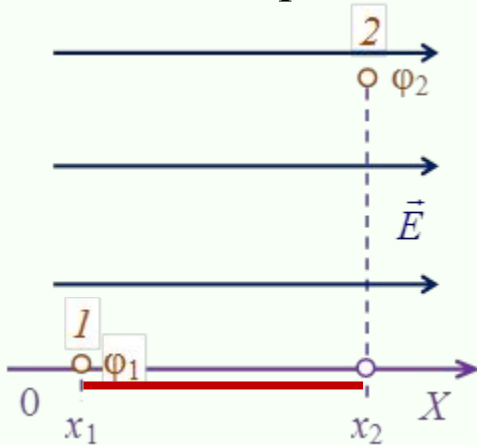
$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}.$$

---

# НАПРЯЖЕННОСТЬ И НАПРЯЖЕНИЕ

Формула связи между напряженностью  $E$  и напряжением  $U$  однородного электростатического поля.



$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{x_2 - x_1} = \frac{U}{\Delta x}.$$

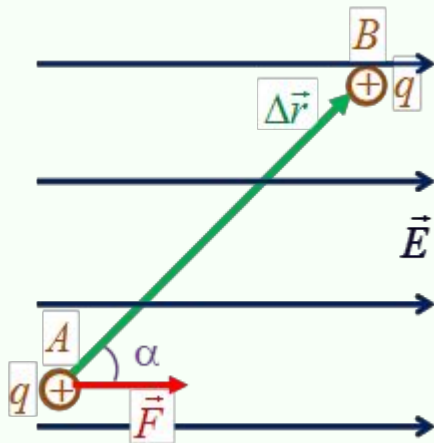
где  $\Delta x$  — расстояние между точками 1 и 2 вдоль силовой линии.

Из этой формулы получаем новую единицу измерения напряженности:

$$[E] = \frac{[U]}{[\Delta x]} = \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

# ВЫВОД ФОРМУЛ

$$A_{AB} = q \cdot E \cdot \Delta x.$$



Поместим в однородное электростатическое поле с напряженностью  $E$  положительный заряд  $q$  (в точке  $A$ ).

Предположим, что заряд переместился из точки  $A$  в точку  $B$ .

Найдем, чему равна работа электростатического поля  $A$  по перемещению заряда.

*Из механики:* работа силы  $F$  равна

$$A = F \cdot \Delta r \cdot \cos \alpha.$$

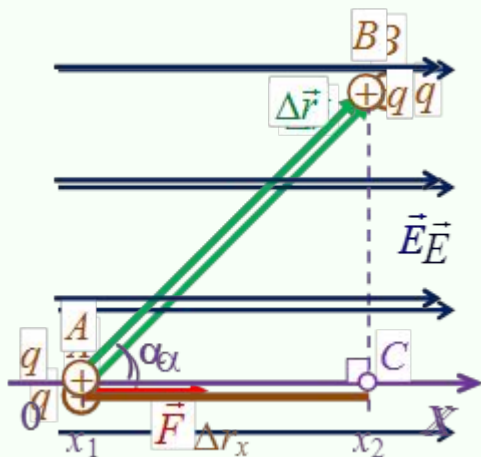
- Чему равна сила  $F$ , если известны значения  $q$  и  $E$ ?

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}, \quad F = q \cdot E.$$

- Куда она направлена?
- Между чем измеряется угол  $\alpha$ ?

# ВЫВОД ФОРМУЛ

$$A_{AB} = q \cdot E \cdot \Delta x.$$



Направим ось  $OX$  вдоль силовой линии и построим проекцию перемещения  $\Delta r_x$  на ось  $OX$ .

□ Чему равна проекция  $\Delta r_x$ ?

$$\Delta r_x = \Delta r \cdot \cos \alpha = x_2 - x_1 = \Delta x.$$

Таким образом мы имеем:

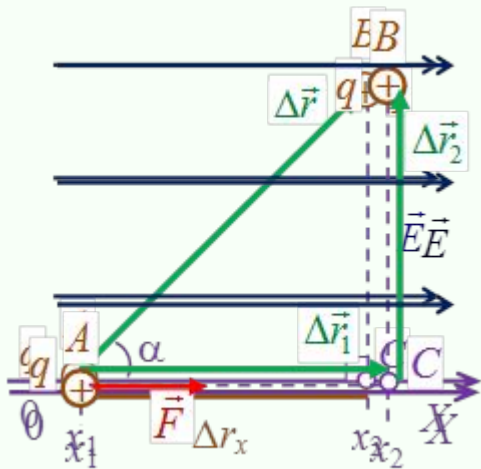
$$A = F \cdot \Delta r \cdot \cos \alpha.$$

$$F = q \cdot E, \quad \Delta r \cdot \cos \alpha = x_2 - x_1 = \Delta x.$$

$$A_{AB} = q \cdot E \cdot (x_2 - x_1) = q \cdot E \cdot \Delta x.$$

# ВЫВОД ФОРМУЛ

- Электростатическое поле — это потенциальное поле, т.е. работа по перемещению заряда в этом поле *не зависит* от формы траектории.



Найдем работу поля при перемещении заряда  $q$  по траектории  $ACB$ .

$$A_{ACB} = A_{AC} + A_{CB},$$

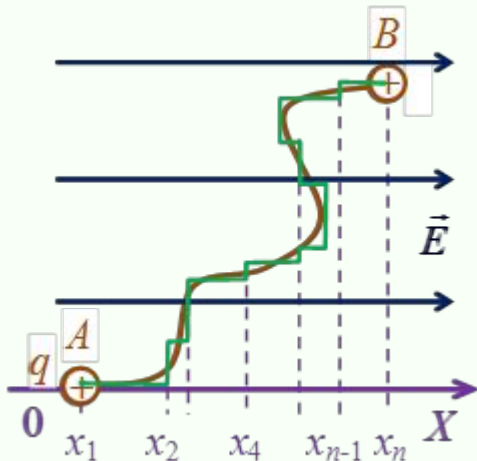
$$A_{AC} = q \cdot E \cdot \Delta r_{1x} = q \cdot E \cdot (x_2 - x_1) = q \cdot E \cdot \Delta x,$$

$$A_{CB} = q \cdot E \cdot \Delta r_{2x} = q \cdot E \cdot 0 = 0,$$

$$A_{ACB} = q \cdot E \cdot \Delta x + 0 = q \cdot E \cdot \Delta x.$$

# ВЫВОД ФОРМУЛ

- Электростатическое поле — это потенциальное поле, т.е. работа по перемещению заряда в этом поле *не зависит* от формы траектории.



Найдем работу поля при перемещении заряда  $q$  по криволинейной траектории.

$$A_{AB3} = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_{n-1} + A_n,$$

$$A_{AB3} = q \cdot E \cdot (x_2 - x_1) + q \cdot E \cdot (x_3 - x_2) + q \cdot E \cdot (x_4 - x_3) + \dots + q \cdot E \cdot (x_{n-1} - x_n),$$

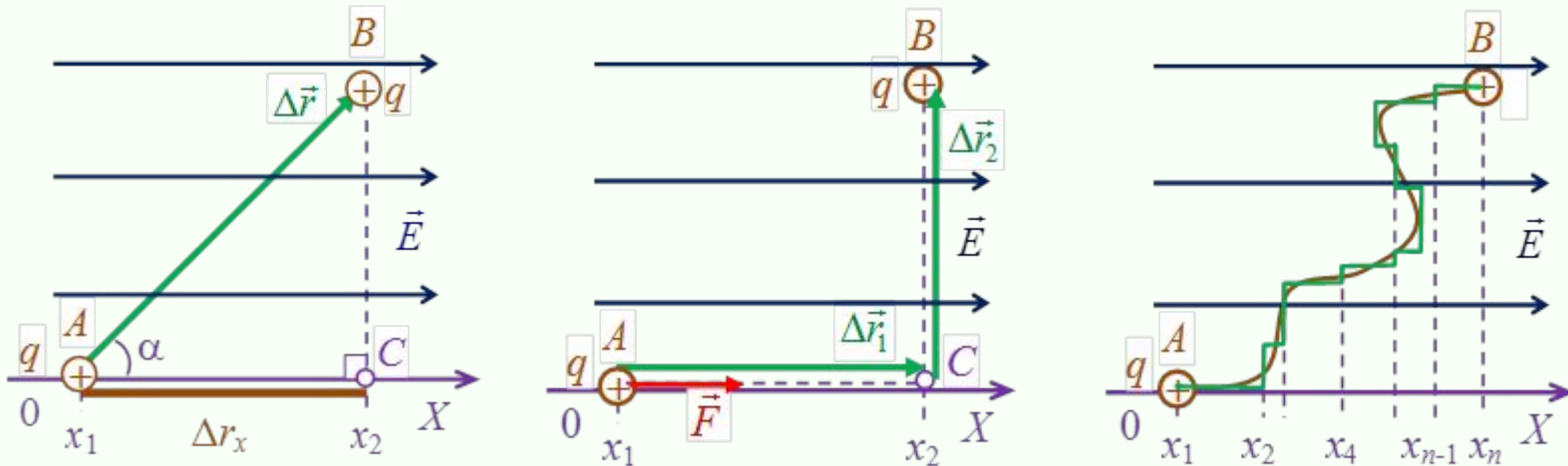
$$A_{AB3} = q \cdot E \cdot (x_2 - x_1 + x_3 - x_2 + x_4 - x_3 + \dots + x_{n-1} - x_{n-2} + x_n - x_{n-1}),$$

$$A_{AB3} = q \cdot E \cdot (x_n - x_1) = q \cdot E \cdot \Delta x.$$



# ВЫВОД ФОРМУЛ

- Электростатическое поле — это потенциальное поле, т.е. работа по перемещению заряда в этом поле *не зависит* от формы траектории.



$$A_{AB} = q \cdot E \cdot (x_2 - x_1) = \boxed{q \cdot E \cdot \Delta x.}$$

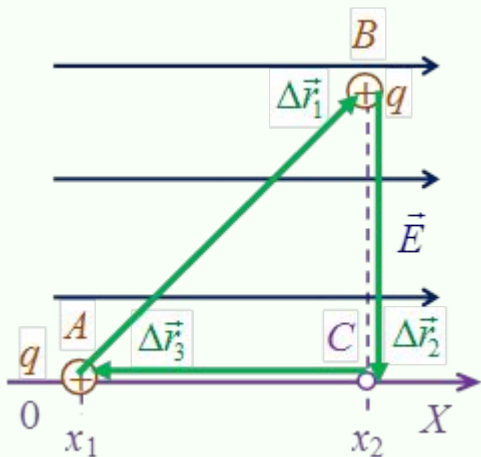
$$A_{AB3} = q \cdot E \cdot (x_n - x_1) = \boxed{q \cdot E \cdot \Delta x.}$$

$$A_{ACB} = q \cdot E \cdot (x_2 - x_1) = \boxed{q \cdot E \cdot \Delta x.}$$

*Вывод.* Работа по перемещению заряда в электростатическом поле *не зависит* от формы траектории, по которой двигался заряд  $q$ , а *зависит* от начальной и конечной координат заряда.

# ВЫВОД ФОРМУЛ

- Работа по перемещению заряда в электростатическом поле на замкнутой траектории равна нулю.



Найдем работу поля при перемещении заряда  $q$  по траектории  $ABCA$ .

$$A_{ABCA} = A_{AB} + A_{BC} + A_{CA},$$

$$A_{AB} = q \cdot E \cdot \Delta r_{1x} = q \cdot E \cdot (x_2 - x_1),$$

$$A_{BC} = q \cdot E \cdot \Delta r_{2x} = q \cdot E \cdot 0 = 0,$$

$$A_{CA} = q \cdot E \cdot \Delta r_{3x} = q \cdot E \cdot (x_1 - x_2),$$

$$A_{ABCA} = q \cdot E \cdot (x_2 - x_1) + q \cdot E \cdot 0 + q \cdot E \cdot (x_1 - x_2),$$

$$A_{ABCA} = q \cdot E \cdot (x_2 - x_1 + x_1 - x_2),$$

$$A_{ABCA} = q \cdot E \cdot 0 = 0.$$

# ВЫВОД ФОРМУЛ

$$W_p = -q \cdot E \cdot x.$$

Из *механики*: работа консервативных сил равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком:

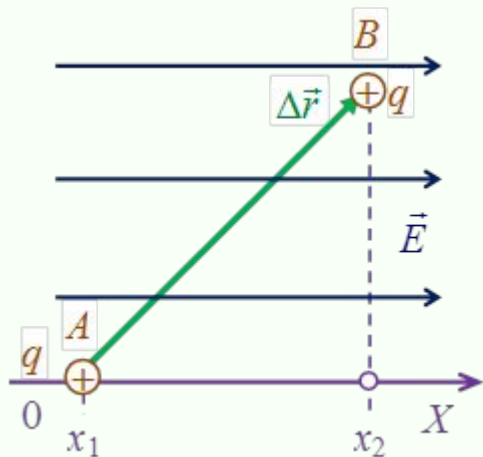
$$A_{AB} = -\Delta W_p = -(W_{p2} - W_{p1}) = -W_{p2} - (-W_{p1}).$$

С другой стороны, выше доказали, что

$$A_{AB} = q \cdot E \cdot (x_2 - x_1) = q \cdot E \cdot x_2 - q \cdot E \cdot x_1 =$$

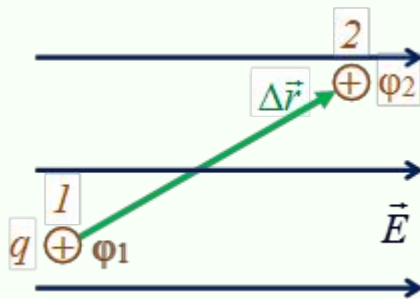
$$W_{p1} = -q \cdot E \cdot x_1, \quad W_{p2} = -q \cdot E \cdot x_2,$$

$$W_p = -q \cdot E \cdot x.$$



# ВЫВОД ФОРМУЛ

$$A_{12} = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2).$$



Пусть потенциалы электрического поля в точке 1 —  $\varphi_1$ , в точке 2 —  $\varphi_2$ .

Тогда потенциальные энергии заряда  $q$  в точке 1 и в точке 2 будут равны:

$$W_1 = q \cdot \varphi_1, \quad W_2 = q \cdot \varphi_2.$$

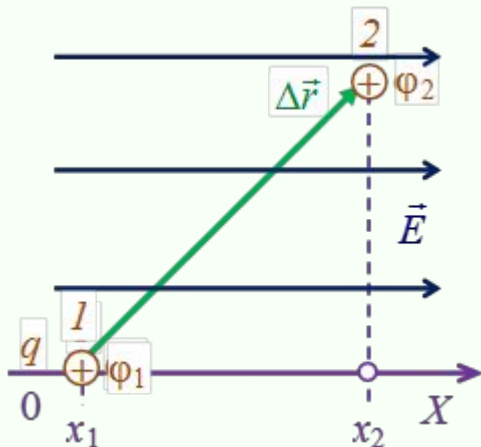
Найдем работу электрического поля по перемещению заряда из точки 1 в точку 2.

$$A_{12} = -\Delta W_p = W_{p1} - W_{p2} = q \cdot \varphi_1 - q \cdot \varphi_2 = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2).$$

$$A_{12} = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2), \quad \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}.$$

# ВЫВОД ФОРМУЛ

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{x_2 - x_1} = \frac{U}{\Delta x}.$$



Пусть потенциалы однородного электростатического поля в точке 1 —  $\varphi_1$ , в точке 2 —  $\varphi_2$ ; координаты этих точек —  $x_1$  и  $x_2$ ; напряженность поля —  $E$ .

Из точки 1 в 2 перемещается заряд  $q$ .

В этом случае работу электрического поля можно найти двумя способами:

$$A_{12} = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = A_{12} = q \cdot E \cdot (x_2 - x_1).$$

Приравняв два выражения для работы  $A_{12}$ , найдем  $E$ :

$$q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = q \cdot E \cdot (x_2 - x_1),$$

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{x_2 - x_1} = \frac{U}{\Delta x}.$$

# ЛИТЕРАТУРА

Физика – 10. § 16-17, С. 121-127, 130-132.

## Учу решать задачи: подготовка к ЦТ, поступление в лицей



[Почитать про автора](#)

Приглашаю учеников **9-11 классов**.

Занятия могут проходить очно (для жителей г. **Могилева** республики Беларусь) или дистанционно через интернет.

[Подробнее про дистанционные курсы](#)

Так же вы можете заказать отдельный вебинар (интернет-урок) или заниматься самостоятельно по дидактическому материалу для подготовки к ЦТ.

[Подробнее про вебинары](#)

[Подробнее](#)

---

Здесь может быть ваша реклама

---