

## Контрольный вопрос

Нормальное ускорение мяча, который выронил ребенок, равно:

- а) 0,
- б) 9,8 м/с<sup>2</sup>,
- в) -9,8 м/с<sup>2</sup>?

**Решение:**

$$a = a_{\tau} + a_n = \cancel{v} \cancel{\tau} + v \cancel{\tau}$$

**При свободном падении мяча меняется модуль вектора скорости, но не его направление.**

**Ответ: а) 0**

## Группа ТТГ-102

## Группа АС-106

1. АЛИЕВ Л. Н. -
2. АЛТЫНАМАНОВ А. А. -
3. АХМЕТГАЛЕЕВ Т. И. -
4. ГАЙСИНА К. И. -
5. ГРИГОРЬЕВА В. К. -
6. ИВАНОВ И. А. -
7. КОЖЕВНИКОВА Е. А. -
8. КУЗНЕЦОВ И. В. -
9. КУТИКОВА Ю. О. -
10. МАЛАШКИН Н. Н. -
11. МАННАПОВА Л. Р. -
12. МАСЛАК А. П. -
13. МАСЯГУТОВА А. Д. -
14. МАХМУДОВ С. С. н
15. ПАНКОВ Д. И. -
16. ПОПОВ Д. В. н
17. САЛИХОВА И. И. -
18. САФИНА Г. Ф. -
19. САХАПОВ А. И. -
20. СОСНИН И. О. -
21. СТАРОВ Л. О. н
22. СУББОТИНА А. В. -
23. ХАЙРУЛЛИН Р. Р. -
24. ХАМИТОВ Н. Ш. -
25. ШЛЕЙХ О. А. -
26. ЯРМУХАМЕТОВА Д. В. -

1. АБРАМОВ Д. Ю. -
2. АБСАЛЯМОВА Р. Р. -
3. БАТТАЛОВА А. И. -
4. БАШАРОВА Л. Г. -
5. ВАСЮКОВА Е. Е. -
6. ЕФИМОВА Д. А. -
7. ЗАКИРОВА Д. Р. -
8. ИДРИСОВА И. Ф. -
9. КАЛЬЩИКОВА Е. И. -
10. КАРЕТНИКОВА О. А. -
11. КОНСТАНТИНОВСКА М. А. -
12. КОРОЛёВА А. А. -
13. МАЛИК А. С. -
14. МАМЯШЕВА Р. Ф. -
15. МИНЛЕБАЕВА Г. Г. -
16. МИХАЙЛОВА Э. В. -
17. МУХАМЕТОВА Р. Р. -
18. НИГМАТЗЯНОВА А. А. -
19. ПАНФИЛОВА А. О. -
20. ПОНАМАРЕНКО М. В. -
21. ПУШИНСКАЯ К. В. -
22. РЕПИНСКАЯ В. И. -
23. САВЧУК С. А. -
24. САДЫКОВА Р. Р. -
25. СЕМЕНОВА А. И. -
26. ХАЙБУЛЛИНА Э. А. -
27. ХАРИСОВА Р. А. -
28. ХАРЛАМОВА О. А. -
29. ХУСНУТДИНОВА Я. Р. -
30. ЯШКЕВИЧ А. В. -

## Группа ТТД-102

1. АБДЕЕВ А. Р. -
2. АХМАДУЛЛИН Ч. Б. -
3. АХМЕТЗЯНОВ А. А. н
4. БАЙБУЛАТОВ А. И. -
5. БЛЫНСКИЙ В. И. н
6. ВЛАСОВ С. А. -
7. ГАРАПОВ А. Р. н
8. ДУЛАТ Д. .. н
9. ИСЛАМОВ Н. М. н
10. КЛИЩ Р. Н. -
11. КОНДРАТЬЕВ А. А. н
12. КОРОСТЕЛЕВ Н. Д. н
13. ЛЕДНЕВ Г. М. н
14. МАЛИНИН М. В. -
15. МУТАЛЛАПОВ И. М. н
16. НАЗАРОВ А. Н. -
17. ПАНТЕЛЕЕВ К. И. н
18. ПОТЕРЯЕВ Е. О. н
19. САДЫКОВ А. И. -
20. САЙФЕЕВ А. Р. н
21. САЙФУЛЛИН М. В. н
22. ХАЙРЕТДИНОВ А. Р. -
23. ЧЕРБАЕВ Р. Р. н
24. ЧУРМАНТАЕВА Д. Н. -
25. ШАРАФЕЕВ К. Р. -
26. ЮЛДАШЕВ Ч. Р. н

---

1. АКАШ МД Ф. Х.	-	29. УСМАНОВ Р. Д.	-
<b>2. АЛЬМУХАМЕТОВ Э. А.</b>	<b>+</b>	30. ФИЛЬЧЕНКО Д. Ю.	-
3. АМАНГЕЛЬДИЕВ Д. М.	-	31. ХАБЕЕВ С. К.	-
4. АНТОНОВ А. П.	н	32. ХАЛИФАЕВ Ф. М.	-
5. АСФАНДИЯРОВ Д. М.	-	33. ХОЛМАТОВ У. И.	н
6. АХМАЛЕТДИНОВ Р. Р.	-	34. ХУЗЯГУЛОВ Р. Р.	-
<b>7. БАКИРОВ Р. Ф.</b>	<b>+</b>	35. ШАКИРОВ А. И.	-
8. ГАБДРАХМАНОВ В. Э.	-	36. ШИТОВ Н. И.	н
9. ГАБДРАХМАНОВА Л. М.	-	37. ЭРКАН М. Я.	-
10. ГРИГОРЬЕВ Д. Ю.	-		
11. ГРОШЕВ В. Н.			
12. ЖОАКИМ Д. Б.	-		
13. ЗАРИПОВА Л. Ф.	-		
14. ИВАХ М. К.	-		
15. ИКСАНОВ Н. Д.	-		
16. ИШОЛА Т. О.	н		
17. МАМУН М. Ф.	-		
18. МБАНГИ Г. М.	н		
19. МЕЛЬНИКОВ О. А.	-		
20. НГАКЕНИ Г. Ж.	н		
21. ПАЗУХИН Е. В.	-		
22. ПАНЧИХИН К. П.	н		
23. ПОПОВ Н. Д.	н		
24. ПРОЛИПОТО В. В.	-		
25. РАМХУДОЕВ Р. Т.	-		
26. РУСИНОВА К. В.	-		
27. СУХАНОВ А. Э.	-		
28. ТОББАЛЬ Я. ..	н		

Группа ТЭТ-108

---

1. АКМЕЕВ И. Р. н
2. АНИКИНА Т. О. -
3. ВАГАПОВ Л. Р. -
4. ВАЛИЕВА А. Ф. -
5. ГАНЕЕВ Т. Н. -
6. ГИЛЬВАНОВ Р. И. -
7. ГОРОДИЛОВ А. В. -
8. ДАВЛЯТШИН Р. Р. -
9. ЗАМУРАГИНА В. А. -
10. ИСМАГИЛОВ М. Э. -
11. КУТУЕВА Ю. Р. -
12. МАКАРЯН А. Р. -
13. МУХАМЕДЖАНОВ Р. М. н
14. ПАВЛЕНКОВА А. А. -
15. ПРОНИН Е. А. -
16. РАФИКОВ Д. Р. -
17. ТРОФИМОВ Г. А. -
18. ФАИЗОВ А. С. -
19. ФАЙЗИЕВ А. М. -
20. ФАЙЗУЛЛИН Т. Р. -
21. ШАРИПОВ М. Ф. -
22. ШУХТУЕВА И. С. -
23. ЮСУПОВА А. И. -

Группа ТЭТ-109

---

1. АЛЕКСАНДРОВ Н. С. -
2. АХМЕТЗЯНОВ А. И. -
3. БАГАУТДИНОВА А. Ф. -
4. БАЛАБАЕВ Д. В. -
5. БУЗАЕВ А. В. -
6. ГАБИТОВА Н. А. -
7. ГАТАУЛЛИН В. В. -
8. ИБРАГИМОВ А. З. -
9. ИШМУХАМЕТОВ Т. А. -
10. КИРШИНА Е. Ю. -
11. КИСЛИЦЫН В. К. -
12. КОВИН Г. С. -
13. НУРКАЕВ А. Э. -
14. ПОГОСЯН С. С. -
15. САГИТОВ Р. А. -
16. САИТОВ А. Р. -
17. СЕМЕНОВА Е. В. -
18. ТРИФОНОВ В. О. -
19. ФАТХИНУРОВ Ф. А. -
20. ЯГУДИН А. В. -
21. ЯКОВЕНКО Д. С. н
22. ЯМАНАЕВ А. М. -

*Группа ЭМГ-105*

---

1. АН А. О. -
2. АРСЛАНОВ М. И. -
3. БАЙТИРЯКОВ А. И. -
4. ВАКИЛОВА Л. Р. -
5. ВАТОЛИНА И. В. -
6. ГАЛИЦЫНА А. М. -
7. ДАНИЛЕНКО Б. В. -
8. ДИНЕЕВ Д. З. -
9. ИВАНОВА В. В. -
10. ИЛЬБАЕВА Р. А. -
11. ИСКАНДАРОВ М. Р. -
12. ИТЯШЕВА Л. А. -
13. КАЛИМУЛЛИН Р. Р. -
14. КАЛИНЧЕНКО Е. А. -
15. КИСЛИЦИН А. П. -
16. КОСАТКИН К. В. -
17. КРОПАЧЕВ М. А. -
18. МИНИХАНОВА Е. А. -
19. НУРУЛЛИНА Д. И. -
20. РАХИМОВА Г. Г. -
21. РОГАШЕВ Е. А. -
22. ХАЗИЕВ И. С. -
23. ХАСАНОВ И. А. -
24. ШАЙМАРДАНОВ А. И. -
25. ШАРАФУТДИНОВ С. Р. -
26. ЯРМЕТОВ В. Г. -

# Лекция 3

# Содержание предыдущей лекции

- Нормальное и тангенциальное ускорение.

**Динамика поступательного движения.**

**Закон сохранения импульса.**

- Инерциальные системы отсчета.
- Законы Ньютона.
- Масса, импульс, сила.
- Уравнение движения материальной точки.
- Понятие замкнутой системы.
- Закон сохранения импульса.
- Центр масс механической системы, закон движения центра масс.
- Движение тел переменной массы. Уравнение Мещерского.

# **Содержание сегодняшней лекции**

**Динамика поступательного движения.**

**Закон сохранения импульса.**

- Движение тел переменной массы. Формула Циолковского.

## **Механическая энергия**

- Сила, работа и потенциальная энергия, связь между силой и потенциальной энергией.
- Консервативные и неконсервативные силы.
- Работа и потенциальная энергия.



$$m \frac{dv}{dt} = v_{\text{отн}} \frac{dm}{dt} + F \quad \text{- уравнение движения тела с переменной массой}$$

## Движение тел переменной массы

Пусть  $F = 0$ , тогда  $mdv = v_{\text{отн}} dm$ .

Прямолинейное движение ракеты в направлении, противоположном направлению скорости газовой струи  $v_{\text{отн}}$ ,

$$mdv = -v_{\text{отн}} dm.$$

$$\frac{dv}{dm} = -\frac{v_{\text{отн}}}{m}.$$

$$\frac{dv}{dm} = -\frac{v_{\text{отн}}}{m}$$

## Движение тел переменной массы

**Пусть скорость газовой струи  $v_{\text{отн}}$  постоянна,  
тогда скорость ракеты**

$$v = -v_{\text{отн}} \int \frac{dm}{m} = -v_{\text{отн}} \ln m + C.$$

**Зависимость постоянной интегрирования  $C$   
от начальных условий полета.**

**Пусть при  $t = 0$   $v = 0$ ,  $m = m_0$ , тогда**

$$0 = -v_{\text{отн}} \ln m_0 + C \quad \text{и} \quad C = v_{\text{отн}} \ln m_0.$$

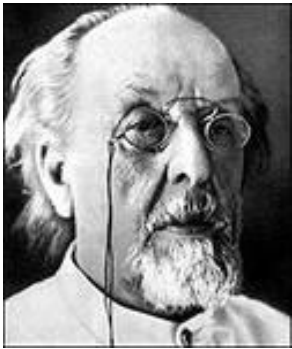
$$v = -v_{\text{отн}} \int \frac{dm}{m} = -v_{\text{отн}} \ln m + C$$

$$C = v_{\text{отн}} \ln m_0$$

## Движение тел переменной массы

$$v = v_{\text{отн}} \ln \frac{m_0}{m}.$$

$m_0 / m = e^{v/v_{\text{отн}}}$  — формула Циолковского для нерелятивистских скоростей.



Российский и советский ученый  
Э.К. Циолковский  
(1857-1935)

**Обоснование использования ракет для полётов в космос, вывод о необходимости использования «ракетных поездов» — прототипов многоступенчатых ракет.**

$$m_0 / m = e^{v/v_{\text{отн}}}$$

## Движение тел переменной массы

### Достижение ракетой первой космической скорости

Скорость газовой струи, км/с	1	2	4
$m_0 / m$	2980	54,6	7,39

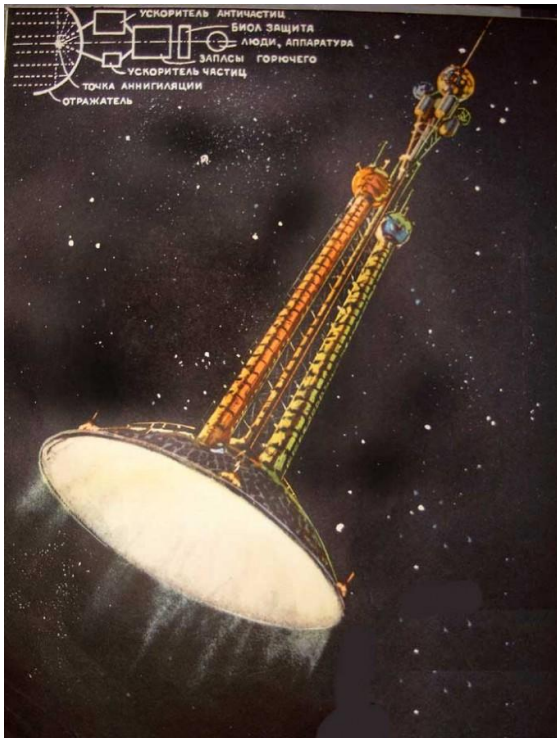
Возможность повышения скорости газовой струи за счет увеличения  $T$  и уменьшения молекулярной массы газа  $\mu$

$$v_{\text{отн}} \approx \sqrt{T / \mu}.$$

Необходимость учета релятивистских поправок.

# Движение тел переменной массы

**Перспективы: фотонная ракета, движущаяся за счет излучения двигателем ракеты светового потока.**



**Возможность достижения человеком планет других звездных систем только при скоростях, осуществимых в фотонной ракете.**

# **Механическая энергия**

# **Энергия**

**Энергия – общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи.**

**Невозможность исчезновения и возникновения энергии из ничего.**

# Энергия

**Различные формы движения материи –  
разные виды энергии:**

- механическая,**
  - внутренняя,**
  - электромагнитная,**
  - ядерная**
- и др.**

**Возможность перехода энергии из одной формы в другую.**

**Связь воедино всех явлений природы  
посредством понятия «энергия».**

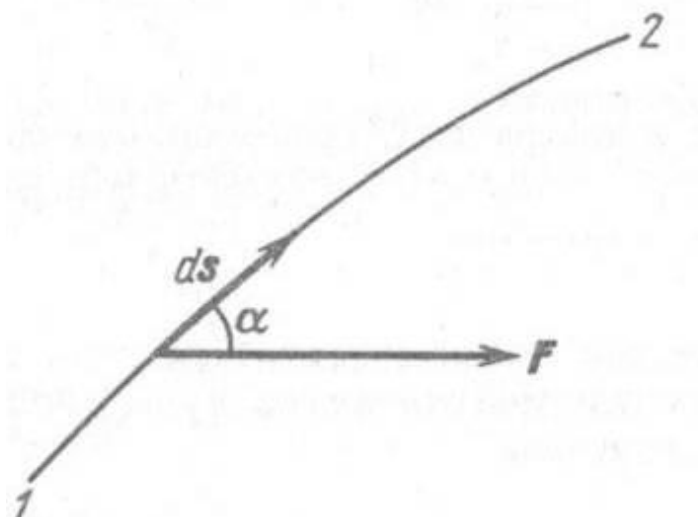


# Энергия

**Виды механической энергии –  
потенциальная и кинетическая.**

**Связь понятия «механическая энергия» с понятием  
«механическая работа» или просто «работа».**

# Сила, работа и потенциальная энергия, связь между силой и потенциальной энергией

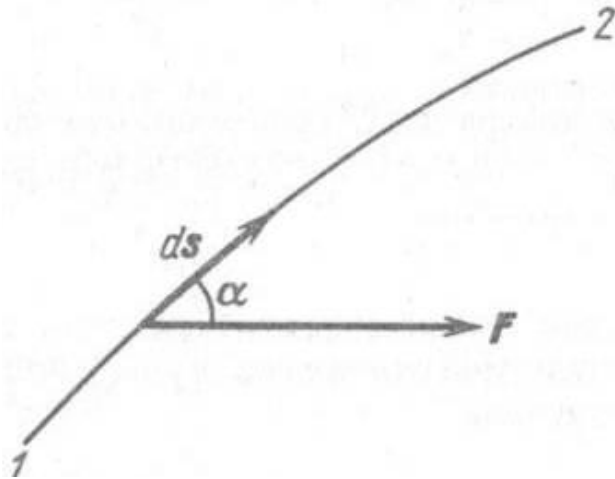


Работа силы  $\vec{F}$  для перемещения частицы на  $ds$   
 $dA = F ds$

$$dA = F_s ds = F ds \cos \alpha.$$

$$dA = F_s ds = F ds \cos \alpha$$

## Сила, работа и потенциальная энергия, связь между силой и потенциальной энергией



$$dA = F ds \cos \alpha$$

$$dA > 0 \quad (-\pi / 2 < \alpha < \pi / 2)$$

$$dA < 0 \quad (\pi / 2 < \alpha < 3\pi / 2)$$

$$dA = 0 \quad (\pi / 2, 3\pi / 2)$$

Работа силы  $F$  для перемещения частицы  
из точки 1 в точку 2

$$A_{12} = \int_1^2 F ds \cos \alpha$$

$$dA = F_s ds = F ds \cos \alpha$$

## **Сила, работа и потенциальная энергия, связь между силой и потенциальной энергией**

**Результирующая нескольких сил, действующих на частицу,**

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i.$$

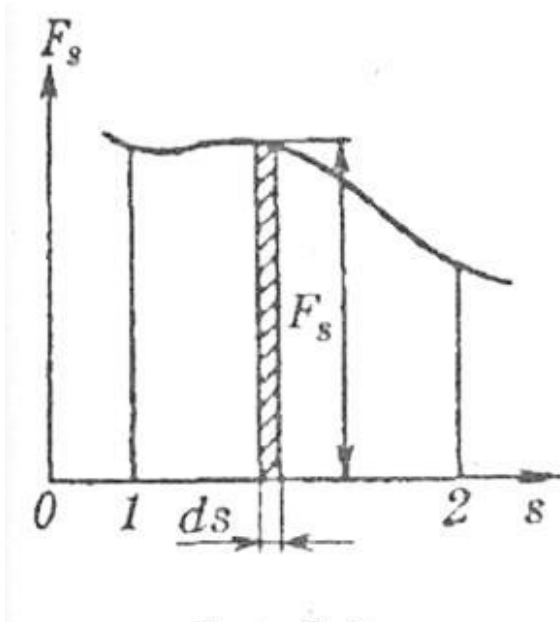
**Механическая работа нескольких сил для перемещения  
частицы  $d\vec{s}$**

$$dA = \left( \sum_i \vec{F}_i \right) d\vec{s} = \sum_i \vec{F}_i d\vec{s}_i = \sum_i dA_i.$$

$$dA = F_s ds = F ds \cos \alpha$$

## Сила, работа и потенциальная энергия, связь между силой и потенциальной энергией

Работа силы  $\vec{F}$  для перемещения частицы  
из точки 1 в точку 2



$$A_{12} = \int_1^2 dA = \int_1^2 F ds.$$

$$A_{12} = \int_1^2 F_s ds.$$

$$dA = F_s ds = F ds \cos \alpha$$

## **Сила, работа и потенциальная энергия, связь между силой и потенциальной энергией**

$$ds = v dt$$

$$A_{12} = \int_1^2 F ds = \int_{t_1}^{t_2} F v dt.$$

$$1 \text{ Джоуль} = 1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м} = 10^5 \text{ дин} \cdot 10^2 \text{ см} = 10^7 \text{ эрг.}$$

$$1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 1 \text{ кгс} \cdot 1 \text{ м} = 9,81 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м} = 9,81 \text{ Дж.}$$

# Сила, работа и потенциальная энергия, связь между силой и потенциальной энергией

## Мощность

$$P = \frac{dA}{dt} = Fv$$

**1 Ватт = 1 Джоуль / 1 сек.**

# **Сила, работа и потенциальная энергия, связь между силой и потенциальной энергией**

**1687 г. (Ньютон): закон всемирного тяготения –  
описание неконтактного взаимодействия тел  
посредством поля гравитационных сил.**

**Возможность описания взаимодействия между телами  
посредством физических полей (без непосредственного  
контакта между взаимодействующими телами).**

**Физические поля – силовые поля, связанные с действием  
гравитационных, электрических, магнитных, ядерных сил.**



# **Сила, работа и потенциальная энергия, связь между силой и потенциальной энергией**



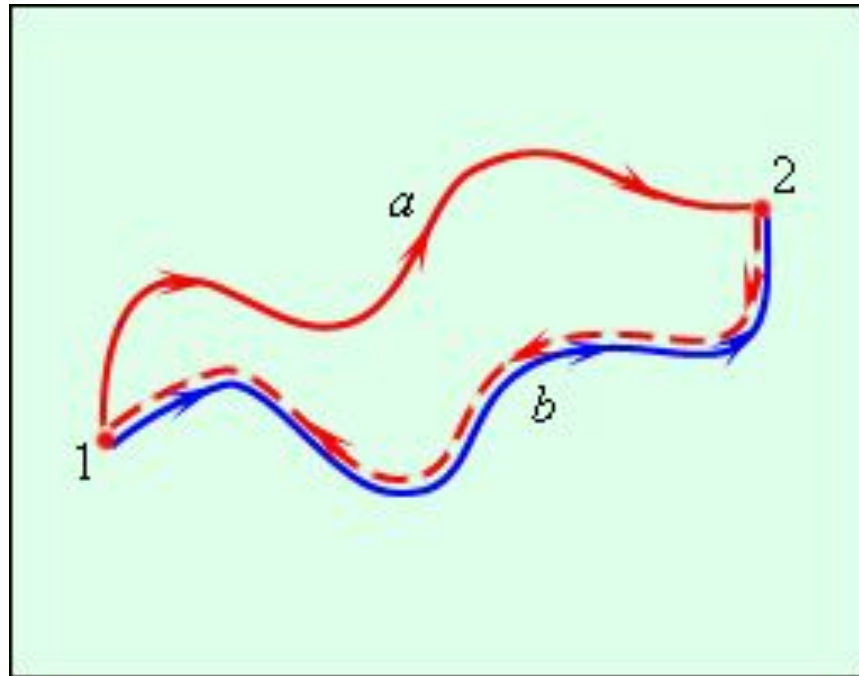
**Штиль - стационарное поле, остающееся постоянным во времени.**



**Порыв ветра - нестационарное поле, изменяющееся во времени.**

# Консервативные и неконсервативные силы

**Консервативные силы – силы поля, работа которых над частицей в условиях стационарного поля зависит лишь от начального и конечного положений частицы и не зависит от пути, по которому двигалась частица.**

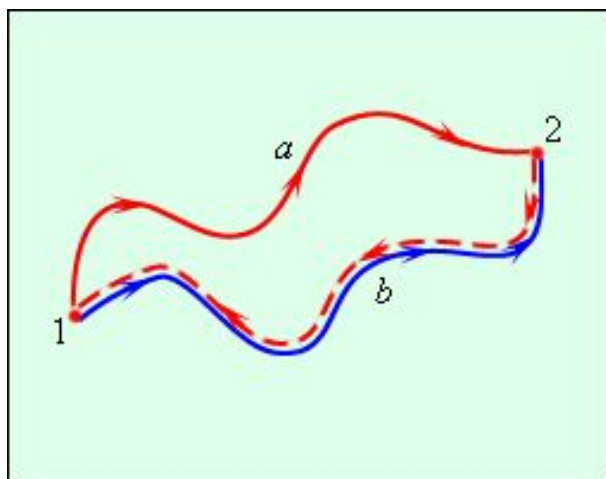


$$dA = F_s ds = F ds \cos \alpha$$

## Консервативные и неконсервативные силы

**Независимость работы консервативных сил от пути  
(по определению) →  
равенство нулю работы консервативных сил  
на замкнутом пути.**

$$A = (A_{12})_a + (A_{21})_b = (A_{12})_a - (A_{12})_b$$



# **Сила, работа и потенциальная энергия, связь между силой и потенциальной энергией**

## **Однородное поле:**

**равенство (как по модулю, так и по направлению) сил,  
действующих на частицу, во всех точках поля.**

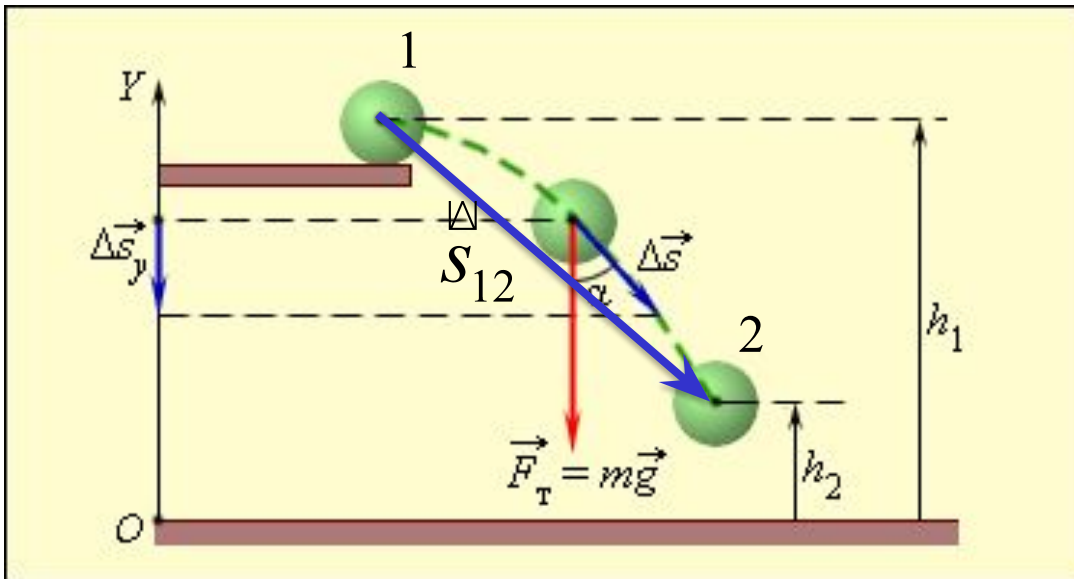
## **Примеры:**

**поле силы тяжести,  
электрическое поле в плоском конденсаторе.**

# Консервативные и неконсервативные силы

Поле силы тяжести – однородное.

Сила тяжести – везде одинаковый модуль и направление вниз по вертикали.



$$A_{12} = mgs_{12}$$

$$A_{12} = mg(s_{12})_{np.g}$$

$$A_{12} = mg(h_1 - h_2) \text{ – не зависит от пути.}$$

Сила тяжести – консервативная сила.

# **Консервативные и неконсервативные силы**

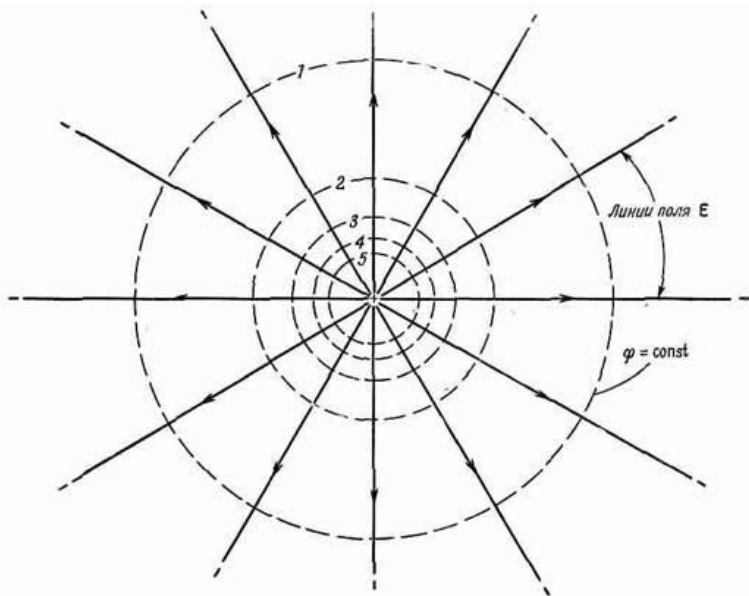
**Стационарное однородное поле**

**Аналогия с полем силы тяжести:  
всякое стационарное однородное поле —  
поле консервативных сил.**

# Сила, работа и потенциальная энергия, связь между силой и потенциальной энергией

## Центральное поле:

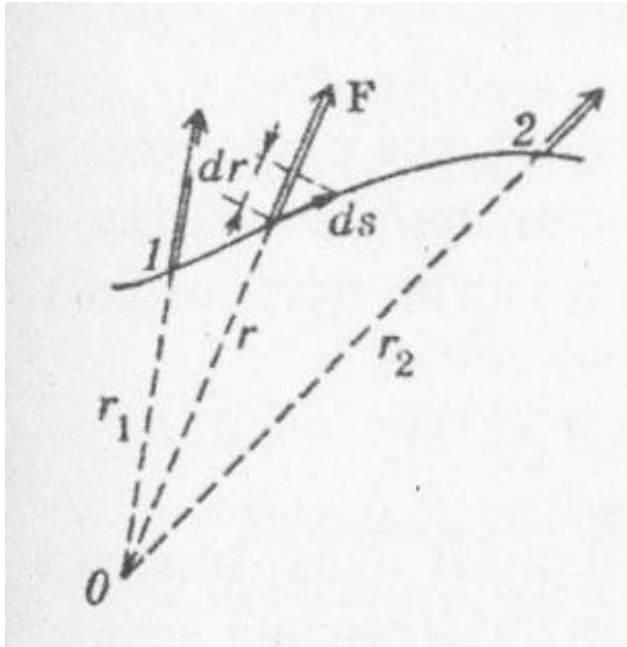
- 1) направление силы, действующей на пробную частицу в любой точке пространства, - вдоль линии, проходящей через неподвижный точечный источник поля и частицу,
- 2) зависимость модуля силы только от расстояния между ними.



**Пример:**  
**электрическое поле**  
**положительного точечного заряда**

# Консервативные и неконсервативные силы

## Центральное поле



$$dA = F \cos \alpha \cdot ds = F(r) ds_F$$

$$ds_F = dr$$

$$dA = F(r) dr$$

$$A = \int_{r_1}^{r_2} F(r) dr$$

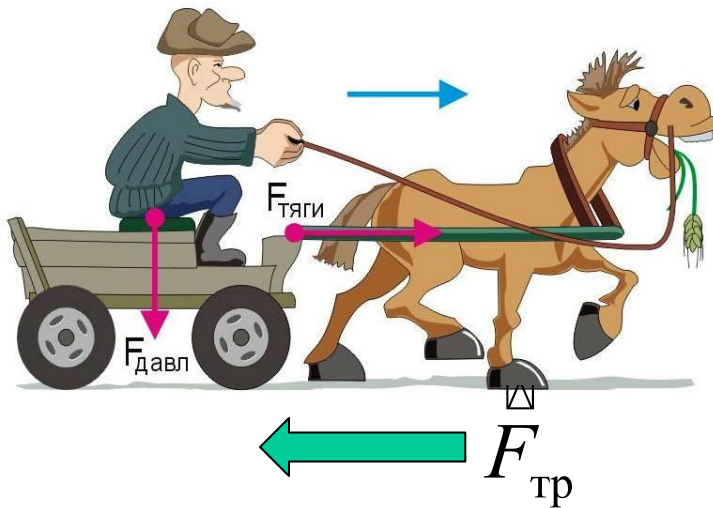
**Равенство нулю работы центральных сил на замкнутом пути - независимость от траектории.**

**Консервативность центральных сил.**



# Консервативные и неконсервативные силы

## Силы трения



**Противоположные направления силы трения и скорости частицы.**

$$dA = \overline{F} \overline{ds} = \overline{F} \overline{v} dt = -Fv dt = -Fds < 0.$$

**Отрицательная работа сил трения на любом замкнутом пути.**

**Силы трения не консервативны.**

# **Работа и потенциальная энергия в поле консервативных сил**

**Поле консервативных сил –  
независимость работы сил поля от пути,  
но зависимость от начального и конечного положений частицы.**

**Возможность сопоставить каждой точке поля  
консервативных сил некоторую функцию  $U(x, y, z)$ .**

**Равенство разности значений функции  $U(x, y, z)$  в точках 1 и 2  
работе сил поля при переходе частицы из точки 1 в точку 2:**

$$A_{12} = U_1 - U_2.$$

## **Работа и потенциальная энергия в поле консервативных сил**

**Пусть  $U(P)$  – значение функции в точке  $P$ .**

**$A_{P0}$  – работа по перемещению частицы силами поля из произвольно выбранной точки  $P$  с функцией  $U(P)$  в точку  $0$  с функцией  $U_0$ .**

$$U(P) = U_0 + A_{P0}.$$

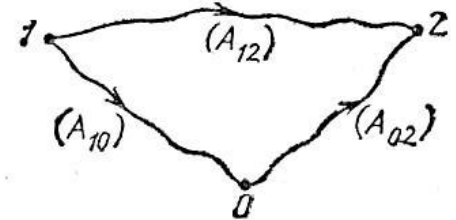
**Однозначность в определении значения имеющей размерность работы или энергии функции  $U(P)$  (независимость работы от пути).**

$$U(P) = U_0 + A_{P0}$$

## Работа и потенциальная энергия в поле консервативных сил

$$U_1 = U_0 + A_{10}, \quad U_2 = U_0 + A_{20}.$$

$$U_1 - U_2 = A_{10} - A_{20} = A_{10} + A_{02}.$$



$A_{10} + A_{02}$  – работа, совершаемая силами поля при перемещении частицы из точки 1 в точку 2 по траектории, проходящей через точку 0.

Независимость работы  $A_{12} = A_{10} + A_{02}$  от траектории перемещения из 1 в 2 (даже не через точку 0).

**Заключение:** справедливость уравнения  $A_{12} = U_1 - U_2$ .

$$A_{12} = U_1 - U_2$$

## **Работа и потенциальная энергия в поле консервативных сил**

**Возможность определения работы, совершаемой консервативными силами на любом пути из точки 1 в точку 2, с помощью функции  $U$ .**

**Функция  $U(x, y, z)$  – потенциальная энергия частицы в точке с координатами  $(x, y, z)$  в поле внешних сил.**

**$A_{12} = U_1 - U_2$  - работа, совершаемая над частицей консервативными силами и равная убыли потенциальной энергии частицы.**

**Совершение работы за счет убыли потенциальной энергии.**

# **Работа и потенциальная энергия в поле консервативных сил**

**Зависимость потенциальной энергии (энергии положения)  
от взаимного расположения (конфигурации)  
взаимодействующих тел  
или положения тела в поле консервативных сил.**

## **Контрольный вопрос**

**В замкнутой системе сохраняется:**

- а) кинетическая энергия,**
- б) потенциальная энергия,**
- в) сумма кинетической и потенциальной энергий,**
- г) как кинетическая, так и потенциальная энергии.**