

## Лекция 5.

Неинерциальные системы отсчета.

Преобразования Галилея. Преобразования Лоренца

### ⊕ Неинерциальная система отсчета

- неинерциальной называется система отсчета, которая движется ускоренно относительно инерциальной системы.

- Закон Ньютона выполняется только в инерциальных системах отсчета.

- классическая механика постулирует два принципа:

1. время абсолютно, то есть интервалы времени между любыми событиями одинаковы во всех произвольно движущихся системах отсчета.

2. Пространство абсолютно, то есть расстояние между любыми двумя материальными точками одинаково во всех произвольно движущихся системах отсчета.

- Эти принципы позволяют записать уравнение движения материальной точки в любой неинерциальной системе отсчета.

### ⊕ Силы инерции

- Если система отсчета движется с ускорением, то есть является неинерциальной, то законы Ньютона в ней применять нельзя.



- Однако при ускоренном движении системы отсчета достаточно ввести понятие силы инерции. Тогда законы Ньютона будут выполняться и в неинерциальных системах

- Пример: Движение автомобиля с ускорением  $a$

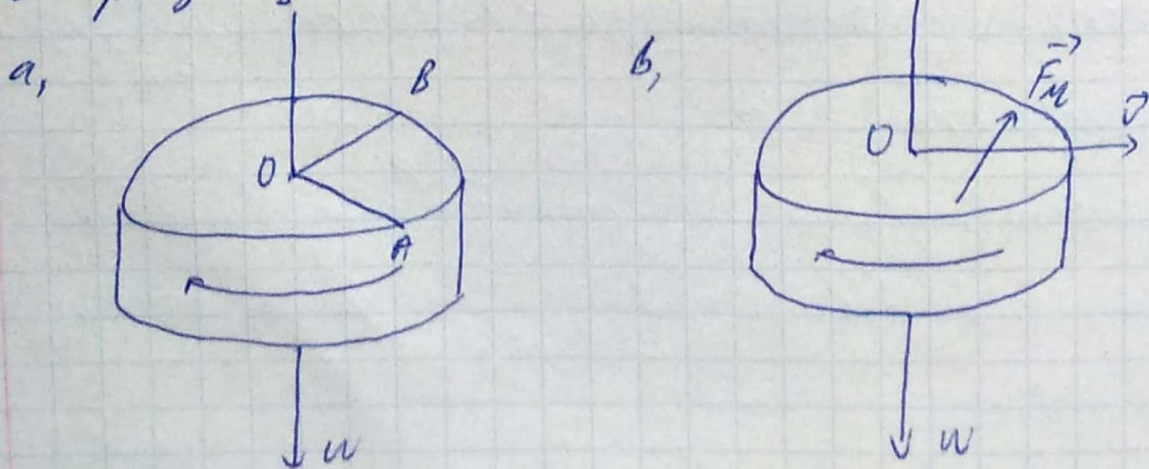
$$\vec{F}_i = -m\vec{a}$$

⊗ Центробежная сила

- Сила инерции, действующая во вращающейся системе отсчета, называется центробежной. Эта сила действует в направлении, противоположном нормальному ускорению, то есть в направлении от центра вращения.

$$F_H = ma = m\omega^2 R$$

- Рассмотрим силу инерции, действующую на тело, движущееся во вращающейся системе отсчета.



- Скорость шарика относительно диска при вращении меняется



направление - имеется сила инерции, перпендикулярная скорости (корнелиова сила)

- Пусть

$\vec{v}'$  - скорость тела во вращающейся системе отсчета.

$\vec{v}$  - скорость тела в неподвижной системе отсчета.

$\omega$  - угловая скорость вращения системы.

Тогда сила, действующая на тело в неподвижной системе.

$$F_{\text{инерции}} = ma_n = m \cdot \frac{v^2}{R} = m \cdot \frac{(\vec{v} + \vec{\omega} \times \vec{r})^2}{R} =$$

$$= m \cdot \frac{v^2 + 2\vec{v} \cdot \vec{\omega} \times \vec{r} + \omega^2 R^2}{R} = m \cdot \frac{v^2}{R} + 2m\vec{v} \cdot \vec{\omega} + m\omega^2 R$$

-  $F = m \cdot \frac{v^2}{R}$  - сила во вращающейся системе.

-  $F_k = 2m\vec{v} \cdot \vec{\omega}$  - сила корнелиова

-  $F_c = m\omega^2 R$  - центробежная сила

\*, Примечание:

Силы инерции возникают не взаимодействием тел, а ускоренным движением системы отсчета. В инерциальных системах отсчета силы инерции отсутствуют.



- Свойства сил инерции:

1. Силы инерции инвариантны относительно перехода от одной инерционной системы отсчета к другой

2. Силы инерции не подчиняются третьему закону Ньютона

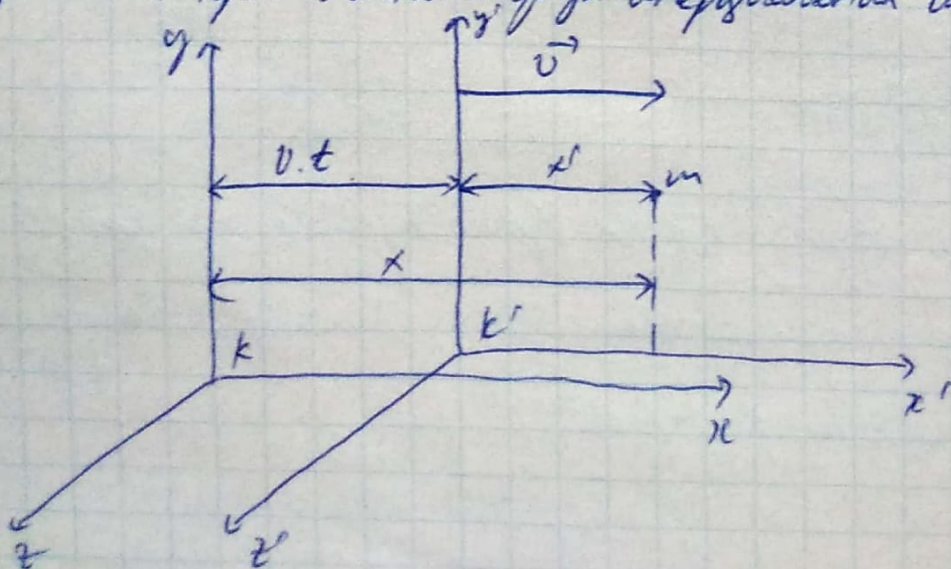
3. Силы инерции всегда являются внешними по отношению к любой точке, находящейся в инерциальной системе отсчета, следовательно, здесь нет замкнутых систем, и не выполняются законы сохранения.

4. Силы инерции пропорциональны массе материальной точки.

Движение точки под действием сил инерции аналогично движению во внешних силовых полях, в том числе в гравитационном поле.

⊕ Преобразование Галилея.

- Преобразование Галилея - уравнения, связывающие координаты и время некоторого события в двух инерциальных системах отсчета.





$$x = x' + vt'$$

$$y = y' \quad z = z' \quad t = t'$$

- формулы преобразования Галилея.

⊗ Следствия преобразования Галилея.

- 1, Ход времени одинаков в обеих системах отсчета
- 2, равенство масс в обеих системах отсчета
- 3, равенство ускорений масс в обеих системах отсчета.
- 4, равенство или взаимосоответствие материальных точек в инерциальных системах отсчета.

⊗ Постулаты специальной теории относительности (СТО)

- 1, Принцип относительности
- 2, Принцип постоянства скорости света.

⊗ Преобразование Лоренца.

В отличие от преобразований Галилея преобразование Лоренца не противоречат постулатам СТО, а, наоборот, гарантируют постоянство скорости света во всех инерциальных системах.

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\beta = \frac{v}{c}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$



## ⊛ Следствия из преобразований Лоренца

### 1. Относительность одновременности

$$t_1 = \gamma \left( t'_1 + \frac{v}{c^2} x'_1 \right) \quad t_2 = \gamma \left( t'_2 + \frac{v}{c^2} x'_2 \right)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Одновременные события в одной системе отсчета, не являются одновременными в другой

### 2. Относительность промежутков времени

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \gamma \Delta t'$$

Движущаяся часы идут медленнее неподвижных

### 3. Относительность длин и расстояний

$$l_0 = x'_2 - x'_1$$

$$x'_1 = \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$x'_2 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{l_0}{\gamma}$$

Размеры движущегося тела меньше размеров неподвижного

### 4. Преобразование скоростей



$$v_x = \frac{v'_x + u}{1 + \frac{uv'_x}{c^2}}$$

$$v_y = \frac{v'_y \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}{1 + \frac{uv'_x}{c^2}}$$

$$v_z = \frac{v'_z \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}{1 + \frac{uv'_x}{c^2}}$$

Релятивистский закон сложения скоростей: сумма двух скоростей меньше или равна скорости света, не превышает скорость света.

② Релятивистская динамика.

1. Релятивистский импульс

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma m_0 \vec{v}$$

2. Уравнение движения (второй закон Ньютона)

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} \rightarrow \frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) = \vec{F}$$

3. Релятивистские выражения для энергии

- Полная энергия  $E = mc^2$

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma m_0 c^2$$

кинетическая энергия  $E_k = mc^2 - m_0 c^2$

энергия покоя  $E_0 = m_0 c^2$



4. Релятивистский инвариант

$$E = mc^2$$

$$p = m\vec{v}$$

$$p = \frac{p_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow p = \frac{m_0^2 v c^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$p^2 = \frac{p^2 E^2}{(p^2 + m_0^2 c^2) c^2} \Rightarrow E = c \sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}$$

Таким образом, энергия и импульс в релятивистской механике не сохраняются, однако сохраняет свое значение релятивистский инвариант

$$\boxed{\frac{E^2}{c^2} - p^2 = m_0^2 c^2 = \text{const}}$$