



# ФИЗИКА

Величайшим достижением человеческого гения является то, что человек может понять вещи, которые он уже не в силах вообразить.  
*Лев Ландау*

$g \approx 9,8 \text{ m/s}$

## НЕИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

$$E = \frac{mv^2}{2}$$

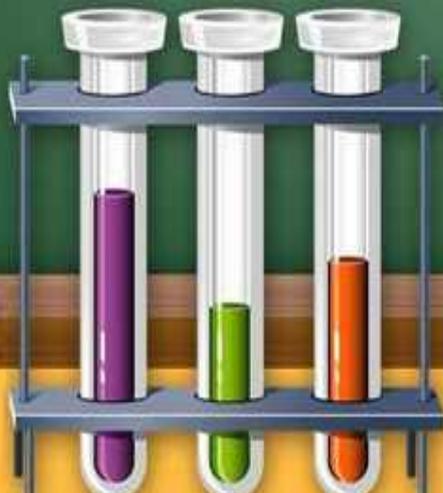
*Когда кончился бензин, автомобиль  
вынужден был остановиться.*

*А после этого еще болтают об инерции,  
господа!*

*Не едет, стоит, с места не трогается! Ну не  
смешно ли?*

*Я. Гашек.*

*Похождения бравого солдата Швейка*





# ВОПРОСЫ

**Я двигаюсь медленно, но я всегда двигаюсь  
ВПЕРЁД!**

*Авраам Линкольн*

1. Уравнение Ньютона для неинерциальных систем отсчета.
2. Центробежная и центростремительная силы.
3. Вклад вращения Земли в ускорение свободного падения.
4. Сила Кориолиса.
5. Контрольные вопросы.

# Уравнение Ньютона для неинерциальных систем отсчета

*Как уже отмечалось, законы Ньютона выполняются только в инерциальных системах отсчета.*

**Системы отсчета, движущиеся относительно инерциальной системы с ускорением, называются **неинерциальными**.**

*В принципе использование неинерциальных систем отсчета ничем не запрещено. Надо только соответствующим образом подправить законы динамики.*

*Рассмотрим пример:* вы стоите в троллейбусе спокойно. Вдруг троллейбус резко трогается, и вы невольно отклонитесь назад. Что произошло? Кто вас толкнул?

С точки зрения наблюдателя на Земле (в инерциальной системе отсчета), в тот момент, когда троллейбус тронулся, вы остались стоять на месте – в соответствии с первым законом Ньютона. С точки зрения сидящего в троллейбусе – вы начали двигаться назад, как если бы кто-нибудь вас толкнул. На самом деле, никто не толкнул, просто ваши ноги, связанные силами трения с троллейбусом *«поехали»* вперед из-под вас и вам пришлось падать назад.

Можно описать ваше движение в инерционной системе отсчета. Но это не всегда просто, так как обязательно нужно вводить силы, действующие со стороны *связей*. А они могут быть самыми разными и ведут себя по разному – нет единого подхода к их описанию.

А можно и в неинерциальной системе воспользоваться законами Ньютона, если ввести *силы инерции*. Они *фиктивны*. Нет тела или поля, под действием которого вы начали двигаться в троллейбусе. Силы инерции вводят специально, чтобы воспользоваться уравнениями Ньютона в неинерциальной системе.

**Силы инерции обусловлены не взаимодействием тел, а свойствами самих неинерциальных систем отсчета. На силы инерции законы Ньютона не распространяются.**

Найдем выражение для силы инерции при поступательном движении неинерциальной системы отсчета.

*Введем обозначения:*

$a'$  – ускорение тела массой  $m$  относительно неинерциальной системы

$a''$  – ускорение неинерциальной системы относительно инерциальной (относительно Земли).

Тогда ускорение тела относительно инерциальной системы  $\vec{a} = \vec{a}'' + \vec{a}'$

Ускорение в инерциальной системе можно выразить через второй закон Ньютона:

$$\vec{F}/m = \vec{a}'' + \vec{a}', \text{ отсюда } \vec{a}' = \vec{F}/m - \vec{a}''$$

Мы можем и  $\vec{a}''$  представить в соответствии с законом Ньютона (формально):  $\vec{a}'' = \frac{\vec{F}}{m} + \frac{\vec{F}_{\text{ин}}}{m}$

где  $\vec{F}_{\text{ин}} = -m\vec{a}''$  – сила, направленная в сторону, противоположную ускорению неинерциальной системы. Тогда получим

$$m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{\text{ин}}$$

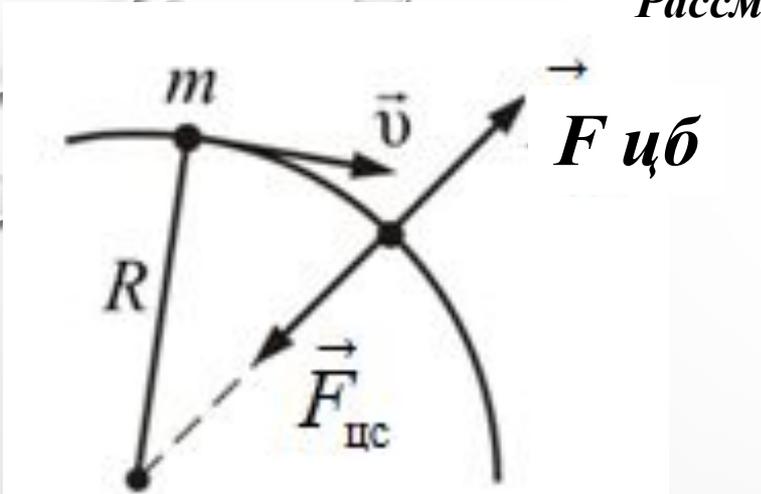
**уравнение Ньютона для неинерциальной системы отсчета**

Здесь  $F_{\text{ин}}$  – фиктивная сила, обусловленная свойствами системы отсчета, необходимая нам для того, чтобы иметь возможность описывать движения тел в неинерциальных системах отсчета с помощью уравнений Ньютона.

Силы инерции не инвариантны относительно перехода из одной системы отсчета в другую. Они не подчиняются закону действия и противодействия. Движение тела под действием сил инерции аналогично движению во внешнем силовом поле. Силы инерции всегда являются внешними по отношению к любому движению системы материальных тел.

## Центростремительная и центробежная силы

### Рассмотрим вращение камня массой $m$ на веревке



$\vec{F}_{цс} = m\vec{a}_{цс}$ , но т. к.  $\vec{a}_{цс} = \vec{a}_n = v^2/R$ , то

$$\vec{F}_{цс} = m\vec{a}_n, \text{ или } F_{цс} = mv^2/R.$$

В каждый момент времени камень должен был бы двигаться прямолинейно по касательной к окружности. Однако он связан с осью вращения веревкой. Веревка растягивается, появляется упругая сила, действующая на камень, направленная вдоль веревки к центру вращения. Это и есть центростремительная сила (при вращении Земли вокруг оси в качестве центростремительной силы выступает сила гравитации)

**Сила, приложенная к связи и направленная по радиусу от центра, называется центробежной.**

**Центробежная сила** – сила инерции первого рода. Центробежной силы, приложенной к вращающемуся телу, не существует.

**Центростремительная сила** возникла в результате действия камня на веревку, т. е. это сила, приложенная к телу, – сила инерции второго рода. **Она фиктивна – ее нет.**

**Центростремительная сила приложена к вращающемуся телу, а центробежная сила – к связи**

С точки зрения наблюдателя, связанного с неинерциальной системой отсчета, он не приближается к центру, хотя видит, что  $F_{цс}$  действует (об этом можно судить по показанию пружинного динамометра).

Следовательно, с точки зрения наблюдателя в неинерциальной системе есть сила, уравновешивающая  $F_{цс}$ , равная ей по величине и противоположная по направлению:

$$\vec{F}_{цб} = -m\vec{a}_n \text{ или } F_{цб} = m v^2 / R$$

Так как  $a_n = \omega^2 R$  (здесь  $\omega$  – угловая скорость вращения камня, а  $v$  – линейная), то

$$F_{цб} = m\omega^2 R$$

## Вклад вращения Земли в ускорение свободного падения

Сила тяжести  $\vec{P}$  есть результат сложения двух сил:  $F_g = mg$  и  $F_{цб} = m\omega^2 R$ .

$$\vec{P} = \vec{F}_g + \vec{F}_{цб}$$

Практически наблюдаемое значение  $g'$  пропорционально силе тяжести  $P = mg'$ . Таким образом  $P$  *зависит от широты местности*.

Расстояние  $R$  от рассматриваемого тела до оси вращения Земли является функцией географической широты  $\varphi$ :

$$R = R_3 \cos \varphi,$$

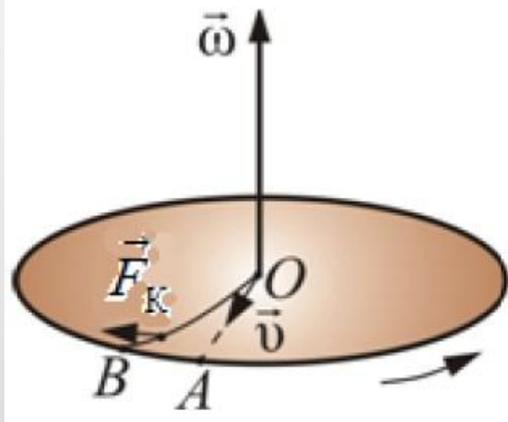
$$F_{цб} = m\omega^2 R = m\omega^2 R_3 \cos \varphi,$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения Земли.

## Сила Кориолиса

**Земля – дважды неинерциальная система отсчета, поскольку она движется вокруг Солнца и вращается вокруг своей оси. На тела неподвижные действует лишь центробежная сила.**

**Её называют *силой Кориолиса*. Эта сила всегда перпендикулярна оси вращения и направлению скорости  $v$ .**



Появление кориолисовой силы можно обнаружить на следующем примере. Возьмем горизонтально расположенный диск, который может вращаться вокруг вертикальной оси. Прочертим на диске радиальную прямую  $OA$

Запустим в направлении от  $O$  к  $A$  шарик со скоростью  $v$ . Если диск не вращается, шарик должен катиться вдоль  $OA$ . Если же диск привести во вращение в направлении, указанном стрелкой, то шарик будет катиться по кривой  $OB$ , причем его скорость относительно диска быстро изменяет свое направление. Следовательно, по отношению к вращающейся системе отсчета шарик ведет себя так, как если бы на него действовала сила  $F_K$ , перпендикулярная направлению движения шарика.

*Сила Кориолиса не является «настоящей»* в смысле механики Ньютона. При рассмотрении движений относительно инерциальной системы отсчета такая сила вообще не существует.

# КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- .Когда и почему необходимо рассматривать силы инерции?
- .Что такое силы инерции? Чем они отличаются от сил, действующих в инерциальных системах отсчета?
- .Запишите уравнение Ньютона для неинерциальной системы с учетом всех сил инерции.
- .Какую систему отсчета называют инерциальной-неинерциальной?
- .Какая физическая величина характеризует инертность тел? В чем проявляется инертность тел?
- .Как изменяется сила притяжения в зависимости от расстояния до центра Земли? В каких точках Земли сила тяготения равна силе тяжести?
- .В каких точках Земли наблюдается наибольшая разность между силой тяготения и силой тяжести?
- .К каким последствиям привело бы внезапное исчезновение силы тяготения?
- .Как направлены центробежная сила инерции и сила Кориолиса?
- . В северном полушарии производится выстрел вдоль меридиана на север. Как скажется на движении снаряда суточное вращение Земли?