

1. Сила инерции.
2. Центробежная сила инерции.
3. Сила Кориолиса.
4. Закон Бэра.

1. Сила инерции.

Допустим, имеется вагон и внутри вагона на нитке висит гайка. Если вагон неподвижен, то гайка будет висеть неподвижно, так как действующие на нее силы взаимно уравновешены (сила тяжести и сила натяжения нити). Если поезд начинает плавно двигаться с некоторым ускорением, набирая скорость, то можно заметить, что гайка, висятая на нити, слегка отклонится в сторону, противоположную движению вагона. Вагон в данном случае будет неинерциальной системой отсчета (НИСО). Тогда можно сделать заключение, что в НИСО не выполняется первый закон Ньютона. Ведь на гайку по-прежнему действуют только сила тяжести и сила натяжения нити, а она не сохранила своего состояния покоя. Не выполняется и второй закон Ньютона, поскольку отклонение гайки от состояния покоя указывает на то, что она получила ускорение, не испытывая воздействия со стороны другого тела.

Анализ данного явления привел к идее о том, что в НИСО причиной ускорения тела могут быть не только реальные силы, обусловленные взаимодействием тел, но и некие дополнительные, так называемые фиктивные силы, связанные с ускоренным движением вагона. Эти силы называются **силами инерции**.

Пусть \vec{a} - ускорение тела массой m относительно инерциальной системы отсчета (ИСО), $\sum_{j=1}^N \vec{F}_j$ - равнодействующая приложенных к телу реальных сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_N$ со стороны других тел. По второму закону Ньютона:

$$m\vec{a} = \sum_{j=1}^N \vec{F}_j \quad (1)$$

Обозначим через \vec{a}' ускорение тела в некоторой НИСО. Тогда

$$m\vec{a}' \neq \sum_{j=1}^N \vec{F}_j, \text{ так как } \vec{a}' \neq \vec{a}$$

Для того, чтобы второй закон Ньютона сохранился и в НИСО, вводится дополнительная сила (сила инерции) \vec{F}_u :

$$m\vec{a}' = \sum_{j=1}^N \vec{F}_j + \vec{F}_u \quad (2)$$

Из этого соотношения следует, что

$$\vec{F}_u = m(\vec{a}' - \vec{a}) \quad (3)$$

Таким образом, **сила инерции, действующая на тело, равна произведению массы тела на разность его ускорений относительно неинерциальной и инерциальной систем отсчета.**

Сила инерции это фиктивная сила, вызывающая ускорение тела. Но она не обусловлена взаимодействием тел, поэтому у этой силы нет противодействующей силы, т.е. к силе инерции неприменим третий закон Ньютона.

Если НИСО движется прямолинейно с постоянным ускорением \vec{a}_c относительно неподвижной (инерциальной) системы, то ускорение \vec{a}' тела в этой неинерциальной системе

$$\vec{a}' = \vec{a} - \vec{a}_c \quad (4)$$

где \vec{a} ускорение тела в неподвижной системе. Подставляя (4) в (3), находим силу инерции:

$$\vec{F}_u = -m\vec{a}_c \quad (5)$$

где m – масса тела.

Таким образом, *основное свойство НИСО состоит в том, что в этих системах появляется ускорение, не обусловленное действием реальных сил.*

2. Центробежная сила инерции.

Для того, чтобы понять, что представляет собой центробежная сила инерции, рассмотрим неинерциальную систему отсчета (НИСО) – горизонтальный диск радиусом R , равномерно вращающийся с угловой скоростью ω . На краю диска закреплено тело массой m , рассматриваемое как материальная точка. Ускорение \vec{a}' тела относительно вращающейся системы отсчета равно нулю (тело находится в покое), поэтому сила инерции, согласно уравнению (3) будет равна:

$$\vec{F}_u = m(\vec{a}' - \vec{a}) = -m\vec{a} \quad (6)$$

Здесь \vec{a} - ускорение тела относительно неподвижной системы отсчета. В данном случае это центростремительное ускорение, равное:

$$a = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R \quad (7)$$

где v - линейная скорость тела относительно неподвижной системы отсчета. Направление вектора \vec{a} противоположно направлению радиуса-вектора \vec{R} тела, закрепленного на диске. Учитывая это, заменим скалярное соотношение (7) на векторное соотношение:

$$\vec{a} = -\omega^2 \vec{R} \quad (8)$$

Подставив (8) в (6) получим

$$\vec{F}_u = -m\vec{a} = m\omega^2 \vec{R} \quad (9)$$

Выражение (9) называется *центробежной силой инерции* и обозначается $\vec{F}_{цб}$.

Рассмотрим тело, закрепленное на вращающемся диске, относительно неподвижной системы отсчета. На тело действуют сила тяжести \vec{F}_m , сила реакции опоры \vec{N} и сила \vec{F} , удерживающая тело на вращающемся диске. Равнодействующая этих сил сообщает телу центростремительное ускорение \vec{a} . Согласно второму закону Ньютона:

$$\begin{aligned} m\vec{a} &= \vec{F}_m + \vec{N} + \vec{F} \\ \vec{F}_m + \vec{N} &= 0 \Rightarrow m\vec{a} = \vec{F} \\ -m\omega^2 \vec{R} &= \vec{F} \end{aligned} \quad (10)$$

В последнем выражении \vec{F} - центростремительная сила, сообщающая телу центростремительное ускорение.

Теперь рассмотрим данное тело в системе отсчета, связанной с вращающимся диском (в этой системе тело покоится, и поэтому ускорение равно нулю). Запишем второй закон Ньютона в НИСО:

$$\vec{F}_m + \vec{N} + \vec{F} + \vec{F}_{цб} = 0 \quad (11)$$

$$\vec{F} + \vec{F}_{цб} = 0$$

$$\vec{F} + m\omega^2 \vec{R} = 0 \quad (12)$$

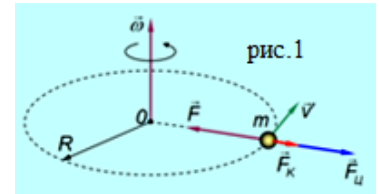
Из соотношения (12) вытекает, что центробежная сила инерции равна по величине и противоположна по направлению центростремительной силе.

Последнее уравнение в (10) и уравнение (12) математически одинаковы, но с точки зрения физики они различны. Уравнение (10) означает, что центростремительная сила \vec{F}

сообщает телу центростремительное ускорение $\vec{a}_c = -\omega^2 \vec{R}$. Из уравнения (12) следует, что центростремительная сила \vec{F} и сила инерции $m\omega^2 \vec{R}$ взаимно уравновешены, и поэтому во вращающейся НИСО тело находится в покое. Природа этих двух сил разная: центростремительная сила – это сила взаимодействия тела с другими телами, тогда как центробежная сила инерции – это сила, возникающая вследствие ускоренного движения системы отсчета, в которой находится тело.

3. Сила Кориолиса.

Предположим, что тело не закреплено на вращающемся диске, а движется по нему со скоростью \vec{v}' равномерно по окружности радиуса R , лежащей в плоскости, перпендикулярной к оси вращения (рис.1). Диск вращается с угловой скоростью $\vec{\omega}$, направление которой показано на рис.1. В неподвижной (инерциальной) системе отсчета частица также движется по окружности, но ее линейная скорость равна:



$$\vec{v} = \vec{v}' + [\vec{\omega} \vec{R}] \Rightarrow v = v' + \omega R$$

Для того, чтобы частица двигалась относительно неподвижной системы отсчета по окружности с такой скоростью, на нее должна действовать направленная к центру окружности сила \vec{F} (например, натяжение нити), причем величина этой силы равна:

$$F = \frac{mv^2}{R} = \frac{m(v' + \omega R)^2}{R} = \frac{mv'^2}{R} + 2m\omega v' + m\omega^2 R \quad (13)$$

Относительно вращающейся системы отсчета частица движется с ускорением

$$a' = \frac{v'^2}{R}$$

Тогда из (13) можно получить уравнение

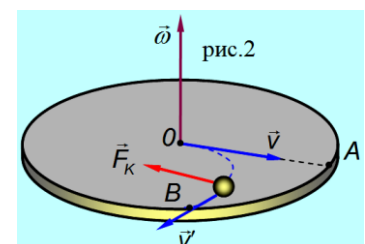
$$\frac{mv'^2}{R} = F - 2m\omega v' - m\omega^2 R \quad (14)$$

В (14) слева стоит произведение массы на ускорение частицы во вращающейся системе отсчета. Значит, справа должны стоять силы, действующие на нее во вращающейся системе отсчета. Первое слагаемое – это сила натяжения нити, которая одинакова как для инерциальной, так и для неинерциальной систем отсчета. Третье слагаемое – это направленная по радиусу (от центра) центробежная сила инерции. Второе слагаемое называется *силой Кориолиса*. В данном случае она также направлена от центра, но зависит от скорости частицы. Модуль силы Кориолиса равен $2m\omega v'$. Сила Кориолиса в векторном виде равна

$$\vec{F}_k = 2m[\vec{v}' \vec{\omega}] \quad (15)$$

Ее направление согласно формуле (15) определяется по правилу правого винта: если повернуть рукоятку винта вправо от первого вектора \vec{v}' ко второму вектору $\vec{\omega}$, то направление поступательного движения винта определяет направление силы Кориолиса. В данном случае направление силы Кориолиса совпадает с направлением центробежной силы инерции (рис.1).

Как видно из формулы сила Кориолиса перпендикулярна плоскости в которой лежат векторы \vec{v}' и $\vec{\omega}$. Если тело во вращающейся системе отсчета движется со скоростью \vec{v}' вдоль радиуса, удаляясь от оси вращения, как на рис.2, то сила Кориолиса отклонит тело вправо, вынуждая его двигаться по траектории OB . Тело во вращающейся системе отсчета будет двигаться по спирали в направлении, противоположном



направлению вращения диска. Если же тело будет двигаться вдоль радиуса в направлении к оси вращения, то тогда тело будет двигаться по спирали в направлении вращения диска.

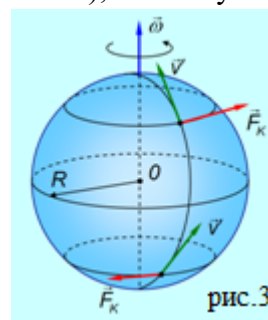
Таким образом, сила Кориолиса возникает только тогда, когда система вращается, а тело движется относительно этой системы. От центробежной силы инерции сила Кориолиса отличается тем, что она зависит от скорости движения тела относительно вращающейся системы отсчета. Если эта скорость равна нулю, то и сила Кориолиса будет равна нулю. Пример: Когда пассажир стоит в движущемся автобусе, то на поворотах он испытывает действие центробежной силы инерции. Если во время поворота пассажир будет перемещаться в автобусе, то на него будет действовать кориолисова сила. Поэтому на поворотах в автобусе легче удержаться в неподвижном состоянии, чем при движении.

http://online.mephi.ru/external/physics/mechanics/video/vid_8_3_8_8.mp4 сила Кориолиса

http://online.mephi.ru/external/physics/mechanics/video/vid_8_3_8_7.mp4 сила инерции

4. Закон Бэра.

Как известно, Земля вращается вокруг своей оси (с запада на восток), поэтому она является НИСО. На поверхности Земли можно увидеть результаты действия силы Кориолиса. В северном полушарии наблюдается более сильное подмывание правых берегов рек, текущих в меридиональном направлении с севера на юг, правые рельсы железнодорожных путей по движению изнашиваются быстрее, чем левые, а циклоны вращаются по часовой стрелке (вправо относительно направления скорости движения тела \vec{v}' во вращающейся системе отсчета). В южном же полушарии все происходит наоборот.



Согласно закону Бэра, вследствие вращения Земли, на поток воды в реках действует сила Кориолиса. При этом происходит смещение русел рек, текущих преимущественно в меридиональном или субмеридиональном направлении, в Северном полушарии – вправо, а в Южном – влево. Вследствие этого у рек Северного полушария активнее подмывается правый берег, часто крутой и обрывистый, а левый, от которого река постепенно отступает, – обычно пологий и низкий.

При выстреле из орудия, направленного на север, снаряд будет отклоняться к востоку в северном полушарии и к западу - в южном. При стрельбе вдоль экватора силы Кориолиса будут прижимать снаряд к земле, если выстрел произведен на запад, и поднимать его кверху, если выстрел произведен в восточном направлении.

http://online.mephi.ru/external/physics/mechanics/video/vid_8_4_8_9.mp4

Вопросы для самоконтроля и обсуждения

1. Когда и почему необходимо рассматривать силы инерции?
2. Что такое силы инерции? Чем они отличаются от сил, действующих в инерциальных системах отсчета?
3. Как направлены центробежная сила инерции и сила Кориолиса? Когда они проявляются?
4. Что и как объясняет закон Бэра?
5. В Северном полушарии производится выстрел вдоль меридиана на север. Как скажется на движении снаряда суточное вращение Земли?