

Тема: Неинерциальные системы отсчёта

Неинерциальными системами отсчёта (НСО) называются системы отсчёта, которые движутся с ускорением относительно инерциальных систем отсчёта (ИСО).

В неинерциальных системах отсчёта помимо сил, действующих в инерциальных системах, возникают ещё особые силы, которые обусловлены ускоренным движением неинерциальной системы отсчёта и которые называются *силами инерции*.

Силы инерции — силы, обусловленные ускоренным движением неинерциальной системы отсчета (НСО) относительно инерциальной системы отсчета (ИСО).

Таким образом, силы инерции вызываются не взаимодействием тел, а ускоренным движением системы отсчета. По этой причине они не подчиняются третьему закону Ньютона, так как если на тело действует сила инерции, то не существует силы, противодействующей ей и приложенной к данному телу. Два основных положения механики, по которым ускорение всегда вызывается силой, а сила всегда обусловлена взаимодействием между телами, в системах отсчета, движущихся с ускорением, одновременно не выполняются (по современным представлениям силы инерции обусловлены взаимодействием тела со всей массой Вселенной).

Возникает вопрос о *реальном* или *фиктивном* существовании сил инерции. В ньютоновской механике, в которой сила является результатом взаимодействия тел, на силы инерции можно смотреть как на не существующие в инерциальных системах отсчета или *фиктивные*. Однако возможна и другая их интерпретация. Поскольку взаимодействия тел осуществляются посредством силовых полей, то силы инерции рассматриваются как воздействия, которым подвергаются тела со стороны каких-то реальных силовых полей, и тогда их можно считать реальными. Силы инерции, которые действуют на тела в неинерциальной системе отсчета, пропорциональны их массам и при прочих равных условиях сообщают этим телам одинаковые ускорения. Следовательно, в поле сил инерции эти тела движутся абсолютно одинаково, если только одинаковы начальные условия. Тем же свойством обладают тела, которые находятся под действием сил поля тяготения.

Возможны условия, при которых силы инерции и силы тяготения невозможно различить. Например, движение тел в равноускоренном лифте происходит точно так же, как и в неподвижном лифте, висящем в однородном поле тяжести. Никакой эксперимент, выполненный внутри лифта, не может отделить однородное поле сил инерции от однородного поля тяготения.

Аналогия между силами тяготения и силами инерции лежит в основе принципа эквивалентности сил инерции и гравитационных сил (**принципа эквивалентности Эйнштейна**):

все физические явления в поле тяготения происходят так же, как и в соответствующем поле сил инерции, если напряженности обоих полей в соответствующих точках пространства совпадают и начальные условия для рассматриваемых тел одинаковы.

Этот принцип является основой общей теории относительности.

Особенность сил инерции заключается в том, что

1. для них не выполняется третий закон Ньютона, так как не возможно указать тело со стороны которого действуют силы инерции,
2. они реально существуют и могут быть измерены, например, динамометром,
3. они обусловлены взаимодействием тела со всей массой Вселенной,
4. как и силы тяготения, силы инерции пропорциональны массе тела (см. ниже)

Различают следующие виды сил инерции:

1. **Сила инерции** $\vec{F}_{ин}$ (обусловлена поступательным движением неинерциальной системы отсчёта с ускорением \vec{a} относительно инерциальной системы отсчёта)

$$\vec{F}_{ин} = -m\vec{a}$$

где $\vec{F}_{ин}$ - сила инерции, действующая на тело в поступательно движущейся НСО,

m - масса тела,

\vec{a} - ускорение неинерциальной системы отсчёта относительно инерциальной.

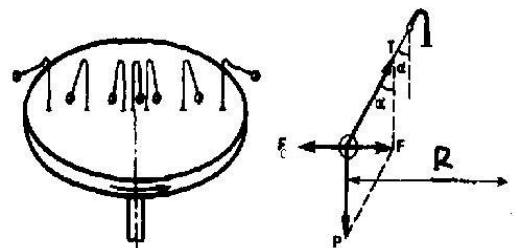
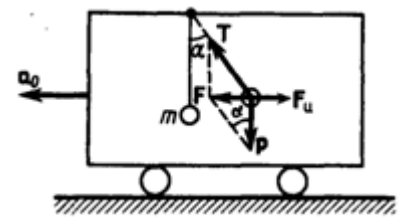
(она появляется, например, в самолете при разгоне на взлетной полосе).

2. **Центробежная сила инерции** $\vec{F}_{цб}$ (обусловлена вращательным движением неинерциальной системы отсчёта с угловой скоростью $\vec{\omega}$ и действующая как на неподвижное, так и на движущееся относительно НСО тело)

$$\vec{F}_{цб} = -2m[\vec{\omega}\vec{v}]$$

где $\vec{F}_{цб}$ — центробежная сила инерции, действующая на тело во вращающейся НСО.

$\vec{\omega}$ — угловая скорость НСО относительно ИСО (вектор направлен вдоль оси вращения в соответствии с правилом правого винта), \vec{v} - скорость тела относительно НСО.

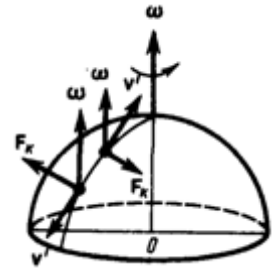


3. **Кориолисова сила инерции** $\vec{F}_{кор}$ (сила Кориолиса) (обусловлена вращательным движением неинерциальной системы отсчёта с угловой скоростью $\vec{\omega}$ и действующая только на движущееся относительно НСО тело)

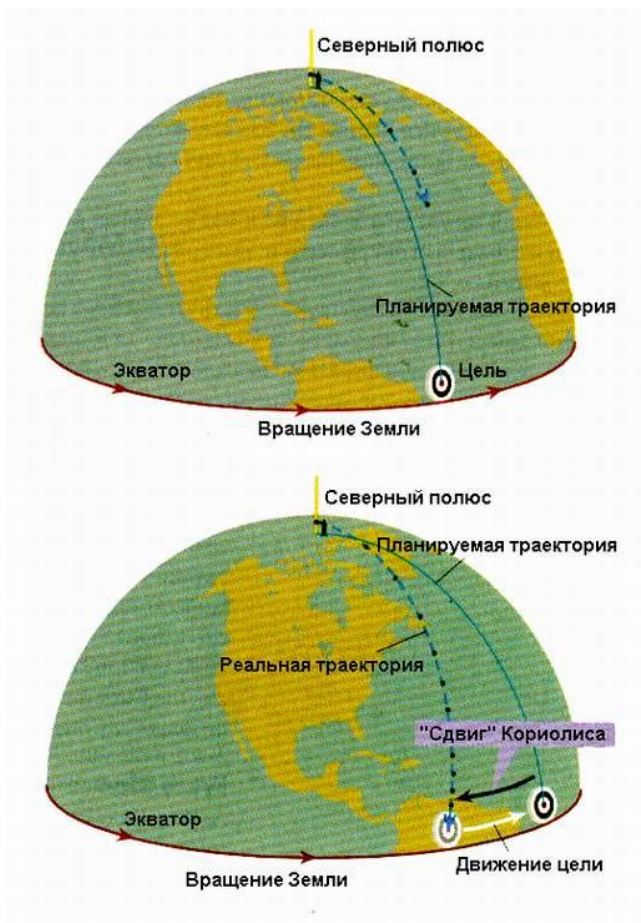
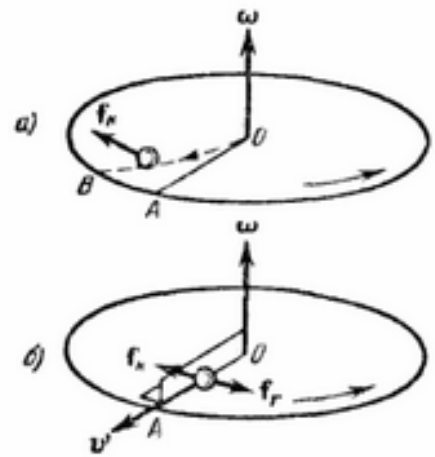
$$\vec{F}_{кор} = -m \omega^2 \vec{r}$$

где $\vec{F}_{кор}$ — кориолисова сила инерции, действующая на тело, движущееся со скоростью \vec{v} относительно вращающейся НСО.

\vec{r} — радиус-вектор, проведённый от центра вращения до тела, $\vec{\omega}$ — угловая скорость НСО относительно ИСО



При вращении диска более далёкие от центра точки движутся с большей касательной скоростью, чем менее далёкие (чёрные стрелки). Переместить некоторое тело вдоль радиуса так, чтобы оно оставалось на радиусе (синяя стрелка из «А» в «Б») можно, увеличив скорость тела, то есть придав ему ускорение. Если система отсчёта вращается вместе с диском, то видно, что тело «не хочет» оставаться на радиусе, а «пытается» уйти влево — это и есть СИЛА КОРИОЛИСА



Примеры движений, в которых проявляется кориолисова сила инерции. При истолковании явлений, связанных с движением тел относительно земной поверхности, в ряде случаев необходимо учитывать влияние кориолисовых сил. Например, при свободном падении тел на

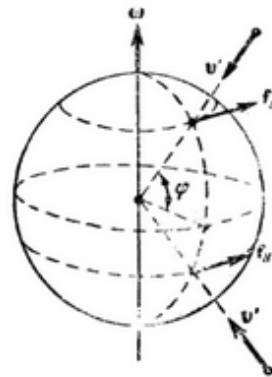


Рис. 79.

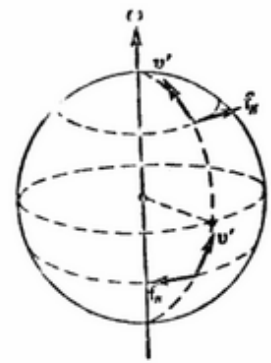


Рис. 80.

них действует кориолисова сила, обуславливающая отклонение к востоку от линии отвеса (рис. 79). Эта сила максимальна на экваторе и обращается в нуль на полюсах.

Летающий снаряд также испытывает отклонения, обусловленные кориолисовыми силами инерции (рис. 80). При выстреле из орудия, направленного на север, снаряд будет отклоняться к востоку в северном полушарии и к западу — в южном. При стрельбе вдоль меридиана на юг направления отклонения будут противоположными. При стрельбе вдоль экватора силы Кориолиса будут прижимать снаряд к Земле, если выстрел произ-

(отклонение кресел на аттракционе обусловлено действием центробежной силы инерции)



Основной закон динамики для неинерциальных систем отсчёта

Если в инерциальной системе отсчёта учитывать действующие на тело силы инерции, то основное уравнение динамики будет аналогичным второму закону Ньютона, который справедлив только в инерциальных системах отсчёта:
в неинерциальной системе отсчёта векторная сумма всех сил, действующих на тело, включая и силы инерции, равна произведению массы этого тела на сообщённое ему ускорение относительно неинерциальной системы отсчёта:

$$m\vec{a}_n = \sum \vec{F}_i + \vec{F}_{ин} + \vec{F}_{цб} + \vec{F}_{кор},$$

где $\sum \vec{F}_i$ - сумма всех сил, действующих на тело, $\vec{F}_{ин} = -m\vec{a}$, $\vec{F}_{цб} = -2m[\vec{\omega}\vec{v}]$ и $\vec{F}_{кор} = -m\vec{\omega}^2\vec{r}$ - силы инерции,

\vec{a} - ускорение неинерциальной системы отсчёта относительно инерциальной,

\vec{a}_n - ускорение тела относительно неинерциальной системы отсчёта.

Законы изменения в неинерциальных системах отсчёта

Так как силы инерции всегда являются силами внешними, следовательно, в неинерциальных системах отсчёта не выполняются законы сохранения импульса, момента импульса и полной механической энергии. Однако если учесть силы инерции, то будут справедливы следующие законы изменения:

Закон изменения импульса механической системы

$$\sum \vec{F}_i + \sum \vec{F}_{i \text{ инерц}} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Закон изменения момента импульса механической системы

$$\sum \vec{M}_i + \sum \vec{M}_{i \text{ инерц}} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

Закон изменения полной механической энергии системы

$$\sum A_{i \text{ неконсерв}} + \sum A_{i \text{ инерц}} = E_2 - E_1$$