

Лекция №18 Сила Кориолиса. Проявление сил инерции на Земле. Маятник Фуко. Невесомость и перегрузки.

Л-1: 5.4-5.5; Л-2: с.205-216; Л-3: §§ 67-71

Если тело движется относительно вращающейся системы отсчета, то на него помимо центробежной силы инерции, действует еще одна сила инерции, которая зависит от относительной скорости движения тела \vec{v}' и от угловой скорости вращения системы отсчета $\vec{\omega}$. Этот вид сил инерции был открыт впервые французским физиком и инженером Гаспаром Кориолисом. Такую силу инерции называли *кориолисовой силой*.

Для выяснения причин, которые вызывают возникновение силы Кориолиса, рассмотрим следующий опыт. Над горизонтальной платформой в виде диска, которая может вращаться вокруг вертикальной оси, установим неподвижно небольшой наклонный желоб, с которого скатывается шарик (конец желоба находится над центром диска).

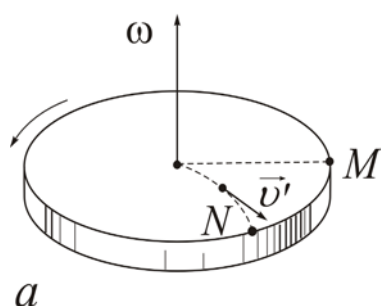


Рис. 18.1

Сила трения при движении шарика по платформе ничтожно мала. Таким образом, после скатывания с желоба шарик будет двигаться по радиусу неподвижного диска с постоянной скоростью v' в направлении точки M . Если же диск привести в равномерное вращение, то относительно диска движение шарика будет криволинейным с возрастающей скоростью. Как видно из рис. 18.1, шарик отклонится от первоначального положения и придет в точку N , положение которой зависит от начальной скорости шарика (при постоянной угловой скорости вращения диска).

Рассмотрим теперь движение шарика относительно наблюдателя, который находится на диске (во вращающейся неинерциальной системе отсчета). Как показал эксперимент, траектория движения шарика относительно поверхности диска является криволинейной. Тот факт, что движение шарика во вращающейся системе отсчета оказывается криволинейным, свидетельствует о существовании силы инерции. Действительно, поскольку при криволинейном движении тела его

Рассмотрим теперь движение шарика относительно наблюдателя, который находится на диске (во вращающейся неинерциальной системе отсчета). Как показал эксперимент, траектория движения шарика относительно поверхности диска является криволинейной. Тот факт, что движение шарика во вращающейся системе отсчета оказывается криволинейным, свидетельствует о существовании силы инерции. Действительно, поскольку при криволинейном движении тела его

относительная скорость изменяется по направлению, то это означает, что на данное тело должна действовать сила, направленная перпендикулярно к его относительной скорости \vec{v}' , которая и вызывает изменение направления. Так как обычные силы взаимодействия, направленные указанным образом, на тело не действуют, то остается предположить действие силы инерции. Очевидно, что эта сила инерции не является центробежной, которая будучи направленной по радиусу от центра вращения, не может вызвать наблюдающееся на опыте изменение относительной скорости тела, движущегося вдоль радиуса.

Возникающая в рассматриваемом случае сила инерции называется кориолисовой силой

$$\vec{F}_K = 2m[\vec{v}', \vec{\omega}] (*)$$

и представляет собой добавочную силу инерции, появляющуюся лишь тогда, когда тело движется во вращающейся системе отсчета.

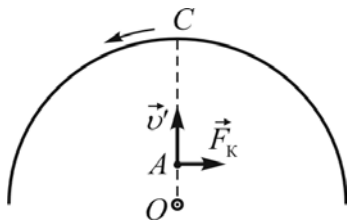


Рис. 18.2

В соответствии с формулой (*) направление кориолисовой силы \vec{F}_K и векторов \vec{v}' и $\vec{\omega}$ для рассматриваемого нами случая отображено на рис. 18.2.

В общем случае тело может двигаться с относительной скоростью, направленной под произвольным углом α к оси вращения (рис. 18.3). Разложим вектор скорости \vec{v}' на две составляющие: \vec{v}'_{\parallel} , которая лежит в плоскости, перпендикулярной оси вращения, и \vec{v}'_{\perp} , параллельную

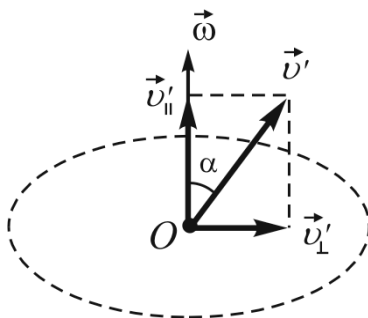


Рис. 18.3

оси вращения. Составляющая \vec{v}'_{\parallel} не изменяет переносной скорости тела, потому что угол между \vec{v}'_{\parallel} и ω равен нулю. Поэтому сила Кориолиса обусловлена лишь составляющей

$$v'_{\perp} = v' \sin \alpha$$

$$F_K = 2mv'\omega \sin \alpha .$$

Таким образом, вектор силы Кориолиса во всех случаях перпендикулярен вектору относительной скорости \vec{v}' и вектору угловой скорости $\vec{\omega}$ вращения системы отсчета и определяется формулой (*).

Кориолисова сила \vec{F}_K направлена перпендикулярно к плоскости, содержащей векторы \vec{v}' и $\vec{\omega}$, таким образом, что если сопоставить направление поворота буравчика от вектора \vec{v}' к вектору $\vec{\omega}$ (в направлении наименьшего угла), то направление силы \vec{F}_K определится направлением поступательного движения буравчика.

Сила Кориолиса не зависит от расстояния тела до оси вращения системы отсчета, а определяется массой тела, относительной скоростью движения и угловой скоростью вращения системы отсчета. Из формулы (*) следует, что если векторы \vec{v}' и $\vec{\omega}$ параллельны, то сила Кориолиса равна нулю. Поскольку кориолисова сила всегда перпендикулярна направлению движения тела, она не производит над ним никакой работы. Другими словами, она лишь отклоняет направление движения тела, но не меняет величины его скорости. Кориолисову силу часто относят к гироскопическим силам.

Таким образом, в соответствии с проведенными выше рассуждениями, сила Кориолиса проявляется при движении по поверхности земного шара благодаря суточному вращению Земли. Рассмотрим более подробно некоторые примеры, подтверждающие это явление.

Французский физик-экспериментатор Жан Фуко (1819–1868), наблюдая за колебаниями специально сконструированного маятника, в 1851 г. экспериментально доказал, что система координат, связанная с Солнцем, инерциальна, а Земля совершает суточное вращение вокруг своей оси. Этот маятник, состоящий из подвеса длиной 67 м и железного шара массой 28 кг, названный маятником Фуко, был сконструирован в парижском Пантеоне. В настоящее время известно около 20 действующих конструкций маятника Фуко.

В Республике Беларусь маятник Фуко специальной конструкции в виде четырехгранной застекленной пирамиды установлен в Белорусском государственном педагогическом университете им. М. Танка (2002). Шар из алюминиевого сплава массой 27 кг, подвешенный на стальной проволоке длиной 6,35 м колеблется с амплитудой 1,25 м и периодом 5,5 с. Верхний конец проволоки закреплен в кардановом подвесе, установленном в вершине пирамиды. Внутри шара располо-

жен постоянный магнит из редкоземельного материала, а в основании пирамиды электромагнитная система, служащая для восполнения потерь энергии при колебаниях. На географической широте Минска ($\varphi = 54^\circ$) за сутки пирамида поворачи-

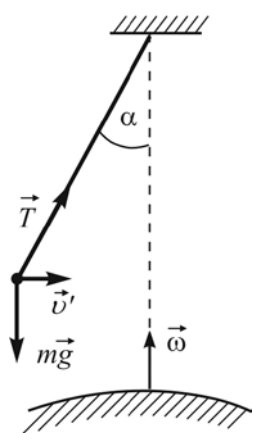


Рис. 18.4

рачивается относительно плоскости качаний маятника на угол, равный 290° .

Для простоты рассуждений рассмотрим случай, когда маятник Фуко находится на Северном полюсе (рис. 18.4). Выведем маятник из состояния равновесия и дадим ему возможность свободно колебаться. В гелиоцентрической системе отсчета на маятник действуют сила тяжести $m\vec{g}$ и сила натяже-

ния \vec{T} . Обе силы лежат в плоскости качаний маятника, следо-

вательно, плоскость качаний должна сохранять свое положение в пространстве относительно этой системы. В то же время проекция плоскости качаний маятника поворачивается в направлении, противоположном вращению Земли, со скоростью 15° в час. Наблюдаемый поворот плоскости качаний маятника может быть обусловлен только лишь суточным вращением Земли.

В системе отсчета, связанной с Землей, поворот плоскости качаний маятника объясняется действием силы Кориолиса. На полюсе скорость маятника \vec{v}' при большой длине его подвеса можно считать перпендикулярной вектору угловой скорости вращения Земли $\vec{\omega}$. Сила Кориолиса в соответствии с формулой

$$\vec{F}_K = 2m[\vec{v}', \vec{\omega}]$$

перпендикулярна плоскости качаний маятника и по правилу буравчика направлена вправо по отношению к относительной скорости движения маятника. Поскольку сила Кориолиса никакой другой силой не уравновешивается, то в результате ее действия и происходит поворот плоскости качаний маятника. Траектория движения маятника будет иметь вид розетки (рис. 18.5). Если маятник установлен на определенной широте φ , то в этом случае его плоскость качаний повернется за сутки на угол $2\pi \sin \varphi$. Таким образом, опыт с маятником Фуко экспериментально подтвержда-

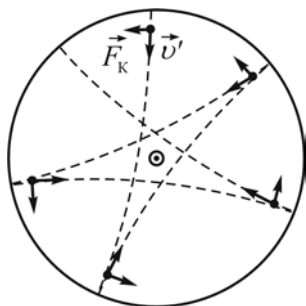


Рис. 18.5

ет. Таким образом, опыт с маятником Фуко экспериментально подтвержда-

ет, что система отсчета, связанная с Землей, является неинерциальной системой отсчета.

Сила Кориолиса, которая действует на тело, движущееся с относительной скоростью \vec{v}' вдоль меридиана, направлена по отношению к этой скорости вправо в северном полушарии и влево – в южном (рис. 18.6, а). Если тело движется в плоскости экватора с запада на восток, то сила Кориолиса направлена вертикально вверх, при движении тела с востока на запад она направлена вертикально вниз (рис. 18.6, б). Сила Кориолиса равна нулю, если тело движется на экваторе в плоскости меридиана, потому что векторы $\vec{\omega}$ и \vec{v}' параллельны. Примером влияния

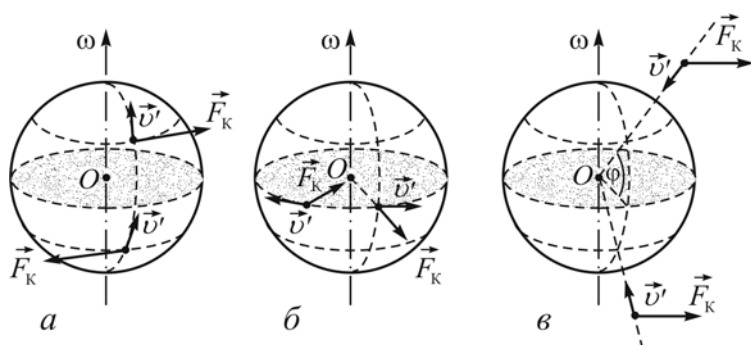


Рис. 18.6

сил Кориолиса на движение тел у поверхности земного шара является также отклонение свободно падающих тел к востоку (рис. 18.6, в).

Большую роль играют кориолисовы силы в метеорологических явлениях. Так, отклоняющее влияние кориолисовой силы заставляет мощное океаническое течение Гольфстрим, выходящее из Мексиканского залива через Флоридский пролив в направлении, близком к меридианному, отойти от берегов Америки, пересечь Атлантический океан и выйти в Баренцево море у берегов Скандинавии. Действием кориолисовых сил объясняется и направление ветров-пассатов. Массы холодного атмосферного воздуха приходят в движение в направлении от полюса к экватору, где давление атмосферного воздуха вследствие нагревания несколько ниже, чем у полюса. Под влиянием силы Кориолиса, которая в данном случае будет направлена на запад, пассаты в северном полушарии Земли дуют с северо-востока на юго-запад, а в южном – на северо-запад. При движении тел на Земле проявление кориолисовых сил не очень заметно, поскольку в обычных условиях малы и скорости движения тел, и угловая скорость вращения Земли. Так, например, на груз маятника Фуко, установленного в БГПУ, при его колебаниях

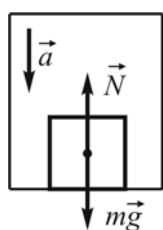
действует сила $F_K \approx 4$ мН. Однако следует иметь в виду, что малая сила, которая действует продолжительное время, может создать довольно ощутимый эффект.

Продолжительное действие кориолисовых сил объясняет тот факт, что правый берег рек в северном полушарии всегда более крутой, чем левый, в южном полушарии более крутой – левый берег (закон Бера). Сила Кориолиса прижимает воду к правому берегу, и она подмывает его. Поскольку сила Кориолиса, как отмечалось ранее, в северном полушарии всегда направлена в правую сторону от направления движения тела, то этим и объясняется преждевременный износ правого рельса на двухколейной железной дороге.

В научно-популярной литературе можно встретить информацию о том, что перелетные птицы при сезонной миграции сохраняют выбранный курс полета благодаря влиянию на них кориолисовой силы.

Вес тела, как и любая сила, может проявляться статически и динамически. Весом тела называют силу \vec{G} , с которой это тело, находящееся в гравитационном поле Земли, действует на неподвижные относительно него опоры или подвесы, препятствующие свободному падению тела. В отличие от силы тяжести, обусловленной гравитационным взаимодействием и приложенной к телу, вес тела – это сила упругости, которая приложена к опоре или подвесу и обусловлена электромагнитным взаимодействием.

Пусть внутри кабины лифта находится неподвижное относительно нее тело



массой m (рис. 18.7). Движение тела будем рассматривать относительно инерциальной системы отсчета. Допустим, что лифт движется вниз с ускорением \vec{a} . На тело действуют сила тяжести $m\vec{g}$ и сила реакции опоры \vec{N} . В соответствии со вторым законом Ньютона

Рис. 18.7

$$m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}.$$

Спроецируем это уравнение на направление движения лифта:

$$mg - N = ma$$

или

$$m(g - a) = N.$$

Из последнего соотношения видно, что при движении по вертикали с ускорением $a < g$, направленным вниз, сила реакции опоры N уменьшается с возрастанием ускорения a , следовательно, вес тела меньше, чем его сила тяжести. Очевидно, что при $a = g$ сила реакции опоры, а значит и вес тела $\vec{G}' = -\vec{N}$, будут равны нулю. В этом случае наступает *состояние невесомости*. Тело в состоянии невесомости не оказывает давление на кабину лифта, потому что ускорения движения тела и лифта одинаковы и равны ускорению свободного падения.

Проследим, как проявляется вес тела при полете космического корабля. Рассмотрим движение корабля массой m_k , в котором находится тело массой m , в инерциальной системе отсчета. Корабль находится под действием гравитационного притяжения со стороны Земли

$$\vec{F} = -G \frac{m_k M}{R^3} \vec{R}.$$

Уравнение движения космического корабля имеет вид

$$m_k \vec{a} = \vec{F}_T + \vec{F}_c - G \frac{m_k M}{R^3} \vec{R},$$

где \vec{F}_T – силы тяги двигателей; \vec{F}_c – силы сопротивления среды; R – расстояние от центра Земли до корабля.

На тело, неподвижное относительно корабля, действуют сила гравитационного притяжения $\vec{F} = -G \frac{mM}{R^3} \vec{R}$ и сила реакции опоры \vec{N} . На основе второго закона Ньютона

$$m \vec{a} = -G \frac{mM}{R^3} \vec{R} + \vec{N}.$$

Решая совместно два последние уравнения, определим силу реакции опоры:

$$\vec{N} = \frac{m}{m_k} (\vec{F}_T + \vec{F}_c).$$

Поскольку вес тела \vec{G}' относительно корабля $\vec{G}' = -\vec{N}$, то при выключенных двигателях ($\vec{F}_T = 0$) и отсутствии сил сопротивления среды ($\vec{F}_c = 0$) он равен нулю. Наступает состояние невесомости.

Состояние движения тела, при котором его вес больше силы тяжести, называют *перегрузкой*. При движении по вертикали состояние перегрузки возникает, когда тело вместе с опорой движется с ускорением, направленным вверх. В этом случае $G' = m(g + a)$. Иногда под перегрузкой понимают отношение

$$n = \frac{G'}{mg} = \frac{m(g + a)}{mg} = 1 + \frac{a}{g}.$$

В состоянии невесомости исчезают деформации тел и обусловленные ими силы. Так, тела перестают давить на подставки, а если тело приподнять, то оно будет находиться в таком состоянии («висеть в воздухе»); жидкость, налитая в сосуд, не будет вытекать через отверстие в дне сосуда. Если телу относительно корабля сообщить начальную скорость, то оно будет двигаться в этом направлении равномерно и прямолинейно. В этом состоянии космонавту не требуется прилагать мышечных усилий для перемещения внутри корабля, для удержания тела в определенном положении, отсутствуют деформация и давление частей тела космонавта друг на друга и т.д.

Ускорения, сообщаемые космическому кораблю силой тяги реактивного двигателя ракеты-носителя и сопротивлением атмосферы на участках выхода на орбиту и спуска на Землю, резко возрастают. В системе отсчета, связанной с космическим кораблем, возникают силы инерции, которые в 9–10 раз превышают силу земного тяготения. При движении на этих участках траектории тело космонавта испытывает большие перегрузки – сильное давление частей тела и внутренних органов друг на друга, давление крови на стенки сердца и сосудов и т.д.

Запуск и спуск космического корабля всегда рассчитывают таким образом, чтобы перегрузки не превышали величины, допускаемой для человека ($n \approx 10$). Наличие внутренних напряжений в теле, обусловленных весом, – характерная примета статического проявления веса. Физиологическое проявление веса является результатом этих напряжений в теле человека.