Глава 5
Тяготение. Элементы теории поля
§22. Законы Кеплера. Закон всемирного тяготения

Еще в глубокой древности было замечено, что в отличие от звезд, которые неизменно сохраняют свое взаимное расположение в пространстве в течение столетий, планеты описывают среди звезд сложнейшие траектории. Для объяснения петлеобразного движения планет древнегреческий ученый К. Птоломей (II в. н.э.), считая Землю расположенной в центре Вселенной, предположил, что каждая из планет движется по малому кругу (эпициклу), центр которого равномерно движется по большому кругу, в центре которого находится Земля. Эта концепция получила название **птоломеевой геоцентрической системы мира** и при поддержке католической церкви господствовала почти полторы тысячи лет.

В начале XVI в. польским астрономом Н. Коперником (1473—1543) обоснована **гелиоцентрическая система** (см. § 5), согласно которой движения небесных тел объясняются движением Земли (а также других планет) вокруг Солнца и суточным вращением Земли. Теория и наблюдения Коперника воспринимались как занимательная фантазия.

К началу XVII столетия большинство ученых убедилось, однако, в справедливости гелиоцентрической системы мира. И. Кеплер (1571 — 1630), обработав и уточнив результаты многочисленных наблюдений датского астронома Т. Браге (1546—1601), изложил **законы движения планет:**

1. Планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которого находится Солнце.
2. Радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает одинаковые площади.
3. Квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей их орбит.

Впоследствии И. Ньютон, изучая движение небесных тел, на основании законов

Кеплера и основных законов динамики открыл всеобщий **закон всемирного тяготения:** между любыми двумя материальными точками действует сила взаимного притяжения, прямо пропорциональная произведению масс этих точек (m_1 и m_2) и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними (r^2):

$$F=Gm_1m_2/r^2. \tag{22.1}$$

Эта сила называется **гравитационной** (или **силой всемирного тяготения).** Силы тяготения всегда являются силами притяжения и направлены вдоль прямой, проходящей через взаимодействующие тела. Коэффициент пропорциональности G называется **гравитационной постоянной.**

Закон всемирного тяготения установлен для тел, принимаемых за материальные точки, т. е. для таких тел, размеры которых малы по сравнению с расстоянием между ними. Если же размеры взаимодействующих тел сравнимы с расстоянием между ними, то эти тела надо разбить на точечные элементы, подсчитать по формуле (22.1) силы притяжения между всеми попарно взятыми элементами, а затем геометрически их сложить (проинтегрировать), что является довольно сложной математической задачей.

Впервые экспериментальное доказательство закона всемирного тяготения для земных тел, а также числовое определение гравитационной постоянной G проведено английским физиком Г. Кавендишем (1731 —1810). Принципиальная схема опыта Кавендиша, применившего **крутильные весы,** представлена на рис. 37. Легкое коромысло *А с* двумя одинаковыми шари-

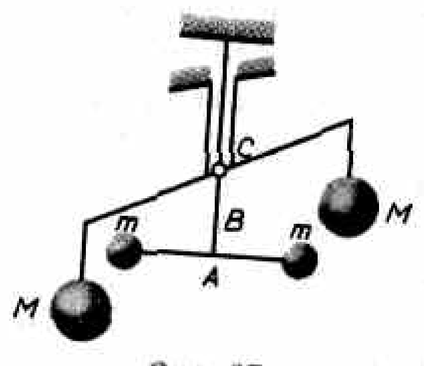

Рис. 37

ками массой m = 729 г подвешено на упругой нити *В.* На коромысле *С* укреплены на той же высоте массивные шары массой М=158 кг. Поворачивая коромысло *С* вокруг вертикальной оси, можно изменять расстояние между шарами с массами *т* и *М.* Под действием пары сил, приложенных к шарам m со стороны шаров *М,* коромысло *А* поворачивается в горизонтальной плоскости, закручивая нить *В* до тех пор, пока момент сил упругости не уравновесит момента сил тяготения. Зная упругие свойства нити, по измеренному углу поворота можно найти возникающие силы притяжения, а так как массы шаров известны, то и вычислить значение G.

Значение G, приводимое в таблицах фундаментальных физических постоянных, принимается равным $6{,}6720 \cdot 10^{-11}$ Н•м^2/кг^2, т.е. два точечных тела массой по 1 кг каждое, находящиеся на расстоянии 1 м друг от друга, притягиваются с силой $6{,}6720 \cdot 10^{-11}$ Н. Очень малая величина *G* показывает, что сила гравитационного взаимодействия может быть значительной только в случае больших масс.

§ 23. Сила тяжести и вес. Невесомость

На любое тело, расположенное вблизи Земли, действует сила тяготения *F,* под влиянием которой, согласно второму закону Ньютона, тело начнет двигаться с ускорением свободного падения *g*. Таким образом, в системе отсчета, связанной с Землей, на всякое тело массой m действует сила

$\mathbf{P} = m\mathbf{g}$,

называемая **силой тяжести.**

Согласно фундаментальному физическому закону — **обобщенному закону Галилея,** все тела в одном и том же поле тяготения падают с одинаковым ускорением. Следовательно, в данном месте Земли ускорение свободного падения одинаково для всех тел. Оно изменяется вблизи поверхности Земли с широтой в пределах от

9,780 м/с^2 на экваторе до 9,832 м/с^2 на полюсах. Это обусловлено суточным вращением Земли вокруг своей оси, с одной стороны, и сплюснутостью Земли — с другой (экваториальный и полярный радиусы Земли равны соответственно 6378 и 6357 км). Так как различие значений *g* невелико, ускорение свободного падения, которое используется при решении практических задач, принимается равным 9,81 м/с^2.

Если пренебречь суточным вращением Земли вокруг своей оси, то сила тяжести и сила гравитационного тяготения равны между собой:

$P = mg = F = GmM/R^2$,

где *M* — масса Земли; *R* — расстояние между телом и центром Земли. Эта формула дана для случая, когда тело находилось на поверхности Земли.

Пусть тело расположено на высоте h от поверхности Земли, R_0 — радиус Земли, тогда

$P = GmM/(R_0 + h)^2$,

т. е. сила тяжести с удалением от поверхности Земли уменьшается.

В физике применяется также понятие веса тела. **Весом** тела называют силу, с которой тело вследствие тяготения к Земле действует на опору (или подвес), удерживающую тело от свободного падения. Вес тела проявляется только в том случае, если тело движется с ускорением, отличным от *g,* т. е. когда на тело кроме силы тяжести действуют другие силы. Состояние тела, при котором оно движется только под действием силы тяжести, называется состоянием **невесомости.**

Таким образом, *сила тяжести действует всегда,* а *вес* появляется *только* в том случае, *когда* на тело *кроме силы тяжести действуют еще другие силы,* вследствие чего тело движется с ускорением а, отличным от g. Если тело движется в поле тяготения Земли с ускорением $\mathbf{a} \neq \mathbf{g}$, то к этому телу приложена дополнительная сила **N**, удовлетворяющая условию

$\mathbf{N} + \mathbf{P} = m\mathbf{a}$.

Тогда вес тела

$\mathbf{P}' = -\mathbf{N} = \mathbf{P} - m\mathbf{a} = m\mathbf{g} - m\mathbf{a} = m(\mathbf{g} - \mathbf{a})$,

т. е. если тело покоится или движется прямолинейно и равномерно, то $\mathbf{a} = 0$ и $\mathbf{P}' = m\mathbf{g}$. Если тело *свободно движется в поле тяготения* по любой траектории и в любом направлении, то $\mathbf{a} = \mathbf{g}$ и $\mathbf{P}' = 0$, т. е. тело будет невесомым. Например, невесомыми являются тела, находящиеся в космических кораблях, свободно движущихся в космосе.

§ 24. Поле тяготения и его напряженность

Закон тяготения Ньютона определяет зависимость силы тяготения от масс взаимодействующих тел и расстояния между ними, но не показывает, как осуществляется это взаимодействие. Тяготение принадлежит к особой группе взаимодействий. Силы тяготения, например, не зависят от того, в какой среде взаимодействующие тела находятся. Тяготение существует и в вакууме.

Гравитационное взаимодействие между телами осуществляется с помощью **поля тяготения,** или **гравитационного поля.** Это поле порождается телами и является формой существования материи.

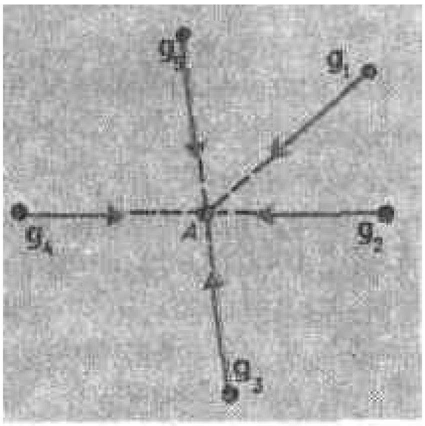

Рис. 38

Основное свойство поля тяготения заключается в том, что на всякое тело массой т, внесенное в это поле, действует сила тяготения, т. е.

F = m**g**. (24.1)

Вектор **g** не зависит от *m* и называется напряженностью поля тяготения. **Напряженность поля тяготения** определяется силой, действующей со стороны поля на материальную точку единичной массы, и совпадает по направлению с действующей силой. Напряженность есть *силовая характеристика* поля тяготения.

Поле тяготения называется **однородным,** если его напряженность во всех точках одинакова, и **центральным,** если во всех точках поля векторы напряженности направлены вдоль прямых, которые пересекаются в одной точке *(А), неподвижной* по отношению к какой-либо инерциальной системе отсчета (рис.38).

Для графического изображения силового поля используются *силовые линии (линии напряженности).* Силовые линии выбираются так, что вектор напряженности поля действует по касательной к силовой линии.

§ 25. Работа в поле тяготения. Потенциал поля тяготения

Рассмотрим, чему равна работа, совершаемая силами поля тяготения при перемещении в нем материальной точки массой *m.* Вычислим, например, какую надо затратить работу для удаления тела массой *m* от Земли. На расстоянии *R* (рис. 39) на данное тело действует сила

$F=GmM/R^2$.

При перемещении этого тела на расстояние *dR* затрачивается работа

$$dA = -G\frac{mM}{R^2}dR. \qquad (25.1)$$

Знак минус появляется потому, что сила и перемещение в данном случае противоположны по направлению (рис.39).

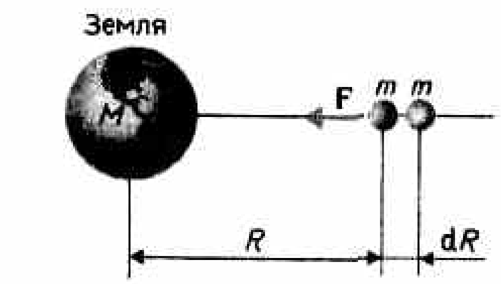

Рис. 39

Если тело перемещать с расстояния R_1 до R_2, то затрачивается

$$A=\int_{R_1}^{R_2} dA = -\int_{R_1}^{R_2} G\frac{mM}{R^2}dR = m\left(\frac{GM}{R_2}-\frac{GM}{R_1}\right). \qquad (25.2)$$

Из формулы (25.2) вытекает, что затраченная работа в поле тяготения не зависит от траектории перемещения, а определяется лишь начальным и конечным положениями тела, т. е. *силы тяготения* действительно *консервативны,* а *поле тяготения является потенциальным* (см. § 12).

Согласно формуле (12.2), работа, совершаемая консервативными силами, равна изменению потенциальной энергии системы, взятому со знаком минус, т. е.

$A = -\Delta\Pi = -(\Pi_2-\Pi_1) = \Pi_1-\Pi_2$.

Из формулы (25.2) получаем

$$\Pi_1-\Pi_2 = -m(GM/R_1 - GM/R_2). \qquad (25.3)$$

Так как в формулы входит только разность потенциальных энергий в двух состояниях, то для удобства принимают потенциальную энергию при $R_2\to\infty$ равной нулю ($\lim \Pi_2=0$ $_{\text{при } R2\to\infty}$). Тогда (25.3) запишется в виде $\Pi_1= - GmM/R_1$. Так как первая точка была выбрана произвольно, то

$$\Pi=-GmM/R.$$

Величину

$$\varphi = \Pi/m,$$

являющуюся энергетической характеристикой поля тяготения, называют потенциалом. **Потенциал поля тяготения** φ — скалярная величина, определяемая потенциальной энергией тела единичной массы в данной точке поля или работой по перемещению единичной массы, из данной точки поля в бесконечность. Таким образом, потенциал поля тяготения, создаваемого телом массой M, равен

$$\varphi=-GM/R, \tag{25.4}$$

где R — расстояние от этого тела до рассматриваемой точки.

Из формулы (25.4) вытекает, что геометрическое место точек с одинаковым потенциалом образует сферическую поверхность (R = const). Такие поверхности, для которых потенциал постоянен, называются **эквипотенциальными.**

Рассмотрим взаимосвязь между потенциалом поля тяготения (φ) и его напряженностью (g). Из выражений (25.1) и (25.4) следует, что элементарная работа dA, совершаемая силами поля при малом перемещении тела массой m, равна

$$dA=-m d\varphi.$$

С другой стороны, $dA=F dl$ (dl—элементарное перемещение). Учитывая (24.1), получим, что

$$dA=mg dl,$$

т. е.

$$mg dl=-m d\varphi,$$

или

$$\mathbf{g}=-d\varphi/dl.$$

Величина $d\varphi/dl$ характеризует изменение потенциала на единицу длины в направлении перемещения в поле тяготения. Можно показать, что

$$\mathbf{g}=-\mathrm{grad}\varphi, \tag{25.5}$$

где $\mathrm{grad}\varphi=(d\varphi/\partial x)\mathbf{i}+(\partial\varphi/dy)\mathbf{j}+(\partial\varphi/dz)\mathbf{k}$ – градиент скаляра φ (см. (12.5)). Знак минус в формуле (25.5) указывает, что вектор напряженности **g** направлен *в сторону убывания* потенциала.

В качестве частного примера, исходя из представлений теории тяготения, рассмотрим потенциальную энергию тела, находящегося на высоте h относительно Земли:

$$\Pi=-\frac{GmM}{R_0+h}-\left(-\frac{GmM}{R_0}\right)=\frac{GmMh}{R_0(R_0+h)},$$

где R_0 — радиус Земли.

Так как

$$P=GmM/R^2_0 \quad \text{и} \quad g=P/m=GM/R^2_0,$$

(25.6) то, учитывая условие $h<<R_0$, получим

$$\Pi=mGMh/R^2_0= mgh.$$

Таким образом, мы вывели формулу, совпадающую с (12.7), которая постулировалась раньше.

§ 26. Космические скорости

Для запуска ракет в космическое пространство надо в зависимости от поставленных целей сообщать им определенные начальные скорости, называемые космическими.

Первой космической (или **круговой) скоростью** v_1 называют такую минимальную скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно могло двигаться вокруг Земли по круговой орбите, т. е. превратиться в искусственный спутник Земли. На спутник, движущийся по круговой орбите радиусом r, действует сила тяготения Земли, сообщающая ему нормальное ускорение v^2_1/r. По второму закону Ньютона,

$GmM/r^2=mv^2_1/r$.

Если спутник движется недалеко от поверхности Земли, тогда $r\approx R_0$ (радиус Земли) и $g=GM/R^2_0$(см. (25.6)), поэтому у поверхности Земли

$$v_1=\sqrt{gR_0}=7{,}9 \text{ км/с}.$$

Первой космической скорости недостаточно для того, чтобы тело могло выйти из сферы земного притяжения. Необходимая для этого скорость называется второй космической. **Второй космической** (или **параболической) скоростью** v_2 называют ту наименьшую скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно могло преодолеть притяжение Земли и превратиться в спутник Солнца, т. е. чтобы его орбита в поле тяготения Земли стала параболической. Для того чтобы тело (при отсутствии сопротивления среды) могло преодолеть земное притяжение и уйти в космическое пространство, необходимо, чтобы его кинетическая энергия была равна работе, совершаемой против сил тяготения:

$$\frac{mv_2^2}{2} = \int_{R_0}^{\infty} G\,\frac{mM}{r^2}\,dr = GmM/R_0,$$

откуда

$$v_2 = \sqrt{2gR_0} = 11{,}2\ \text{км/с}.$$

Третьей космической скоростью v_3 называют скорость, которую необходимо сообщить телу на Земле, чтобы оно покинуло пределы Солнечной системы, преодолев притяжение Солнца. Третья космическая скорость v_3=16,7 км/с. Сообщение телам таких больших начальных скоростей является сложной технической задачей. Ее первое теоретическое осуществление начато К. Э. Циолковским, им была выведена уже рассмотренная нами формула (10.3), позволяющая рассчитывать скорость ракет.
Впервые космические скорости были достигнуты в СССР: первая — при запуске первого искусственного спутника Земли в 1957 г., вторая — при запуске ракеты в 1959 г. После исторического полета Ю. А. Гагарина в 1961 г. начинается бурное развитие как советской, так и зарубежной космонавтики.

§ 27. Неинерциальные системы отсчета. Силы инерции

Как уже отмечалось (см. § 5,6), законы Ньютона выполняются только в инерциальных системах отсчета. Системы отсчета, движущиеся относительно инерциальной системы с ускорением, называются **неинерциальными.** В неинерциальных системах законы Ньютона, вообще говоря, уже несправедливы. Однако законы динамики можно применять и для них, если кроме сил, обусловленных воздействием тел друг на друга, ввести в рассмотрение силы особого рода — так называемые **силы инерции.**
Если учесть силы инерции, то второй закон Ньютона будет справедлив для любой системы отсчета: произведение массы тела на ускорение в рассматриваемой системе отсчета равно сумме всех сил, действующих на данное тело (включая и силы инерции). Силы инерции $\mathbf{F}_{ин}$ при этом должны быть такими, чтобы вместе с силами $\mathbf{F}$, обусловленными воздействием тел друг на друга, они сообщали телу ускорение $\mathbf{a}'$, каким оно обладает в неинерциальных системах отсчета, т. е.

$$m\mathbf{a}' = \mathbf{F}+\mathbf{F}_{ин}. \tag{27.1}$$

Так как $\mathbf{F}=m\mathbf{a}$ ($\mathbf{a}$ — ускорение тела в инерциальной системе отсчета), то

$$m\mathbf{a}' = m\mathbf{a}+\mathbf{F}_{ин}.$$

Силы инерции обусловлены ускоренным движением системы отсчета относительно измеряемой системы, поэтому в общем случае нужно учитывать следующие случаи проявления этих сил: 1) силы инерции при ускоренном поступательном движении системы отсчета; 2) силы инерции, действующие на тело, покоящееся во вращающейся системе отсчета; 3) силы инерции, действующие на тело, движущееся во вращающейся системе отсчета.
Рассмотрим эти случаи.
1. Силы инерции при ускоренном поступательном движении системы отсчета. Пусть на тележке к штативу на нити подвешен шарик массой m (рис. 40). Пока тележка покоится или движется равномерно и прямолинейно, нить, удерживающая шарик, занимает вертикальное положение и сила тяжести $\mathbf{P}$ уравновешивается реакцией нити Т.
Если тележку привести в поступательное движение с ускорением $\mathbf{a}_0$, то нить начнет отклоняться от вертикали назад до такого угла a, пока результирующая сила $\mathbf{F}=\mathbf{P}+\mathbf{T}$ не обеспечит ускорение шарика, равное a_0. Таким образом, результирующая сила $\mathbf{F}$ направлена в сторону ускорения тележки $\mathbf{a}_0$ и для установившегося движения шарика (шарик теперь движется вместе с тележкой с ускорением a_0) равна

$$F = mg\,\mathrm{tg}\alpha = ma_0,$$

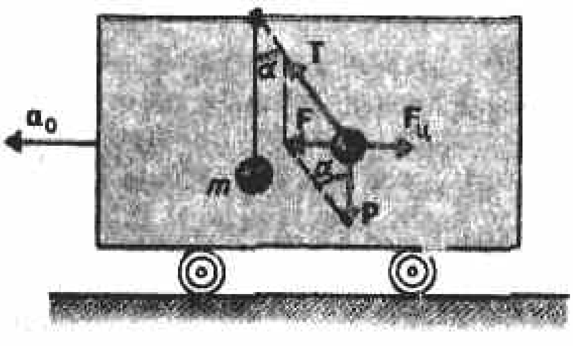

Рис. 40

откуда угол отклонения нити от вертикали $tg\alpha=a_0/g$, т. е. тем больше, чем больше ускорение тележки. Относительно системы отсчета, связанной с ускоренно движущейся тележкой, шарик покоится, что возможно, если сила **F** уравновешивается равной и противоположно направленной ей силой $\mathbf{F}_и$, которая является ничем иным, как силой инерции, так как на шарик никакие другие силы не действуют. Таким образом,

$$\mathbf{F}_и=-m\mathbf{a}_0. \qquad (27.2)$$

Проявление сил инерции при поступательном движении наблюдается в повседневных явлениях. Например, когда поезд набирает скорость, то пассажир, сидящий по ходу поезда, под действием силы инерции прижимается к спинке сиденья. Наоборот, при торможении поезда сила инерции направлена в противоположную сторону и пассажир отделяется от спинки сиденья. Особенно эти силы заметны при внезапном торможении поезда. Силы инерции проявляются в перегрузках, которые возникают при запуске и торможении космических кораблей.

2. Силы инерции, действующие на тело, покоящееся во вращающейся системе отсчета. Пусть диск равномерно вращается с угловой скоростью ω(ω=const) вокруг вертикальной оси, проходящей через его центр. На диске, на разных расстояниях от оси вращения, установлены маятники (на нитях подвешены шарики массой *m).* При вращении маятников вместе с диском шарики отклоняются от вертикали на некоторый угол (рис.41).

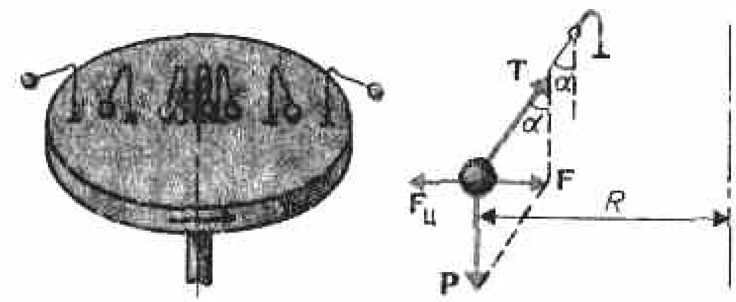

Рис. 41

В инерциальной системе отсчета, связанной, например, с помещением, где установлен диск, шарик равномерно вращается по окружности радиусом *R* (расстояние от точки крепления маятника к диску до оси вращения). Следовательно, на него действует сила, равная $F = m\omega^2R$ и направленная перпендикулярно оси вращения диска. Она является равнодействующей силы тяжести **P** и силы натяжения нити **T: F=P+T,** Когда движение шарика установится, то $F=mg\,tgalfa=m\omega^2R$, откуда $tgalfa=\omega^2R/g$,

т. е. углы отклонения нитей маятников будут тем больше, чем больше расстояние *К* от шарика до оси вращения диска и чем больше угловая скорость вращения ω.

Относительно системы отсчета, связанной с вращающимся диском, шарик покоится, что возможно, если сила **F** уравновешивается равной и противоположно направленной ей силой $\mathbf{F}_и$, которая является ничем иным, как силой инерции, гак как на шарик никакие другие силы не действуют. Сила $\mathbf{F}_ц$, называемая **центробежной силой инерции,** направлена по горизонтали от оси вращения диска и равна

$$F_ц=-m\omega^2R. \qquad (27.3)$$

Действию центробежных сил инерции подвергаются, например, пассажиры в движущемся транспорте на поворотах, летчики при выполнении фигур высшего пилотажа; центробежные силы инерции используются во всех центробежных механизмах: насосах, сепараторах и т. д., где они достигают огромных значений. При проектировании быстро вращающихся деталей машин (роторов, винтов самолетов и т. д.) принимаются специальные меры для уравновешивания центробежных сил инерции.

Из формулы (27.3) вытекает, что центробежная сила инерции, действующая на тела во вращающихся системах отсчета в направлении радиуса от оси вращения, зависит от угловой скорости вращения и системы отсчета и радиуса R, но не зависит от скорости тел относительно вращающихся систем отсчета. Следовательно, центробежная сила инерции действует во вращающихся системах отсчета на все тела, удаленные от оси вращения на конечное расстояние, независимо от того, покоятся ли они в этой системе (как мы предполагали до сих пор) или движутся относительно нее с какой-то скоростью.

3. Силы инерции, действующие на тело, движущееся во вращающейся системе отсчета. Пусть шарик массой *m* движется с постоянной скоростью *v′* вдоль радиуса равномерно вращающегося диска (v’ = const, ω=const, v'⊥ω). Если диск не вращается, то шарик, направленный вдоль радиуса, движется по радиальной прямой и попадает в точку *A,* если же диск привести во вращение в направлении, указанном стрелкой, то шарик катится по кривой *0B* (рис. 42, а), причем его скорость *v′* относительно диска изменяет свое

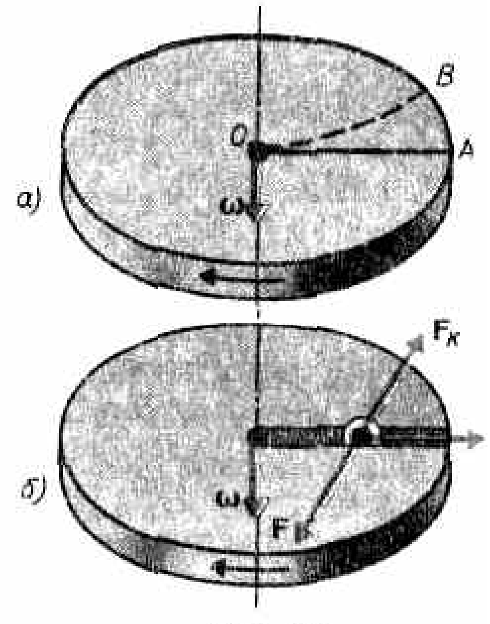

Рис. 42

Для того чтобы заставить шарик катиться по вращающемуся диску вдоль радиуса, используем жестко укрепленный вдоль радиуса диска стержень, на котором шарик движется без трения равномерно и прямолинейно со скоростью v' (рис. 42,б). При отклонении шарика стержень действует на него с некоторой силой F. Относительно диска (вращающейся системы отсчета) шарик движется равномерно и прямолинейно, что можно объяснить тем, что сила **F** уравновешивается приложенной к шарику силой инерции $\mathbf{F}_K$, перпендикулярной скорости v'. Эта сила называется **кориолисовой силой инерции.**

Можно показать, что сила Кориолиса

$$\mathbf{F}_к = 2m\ [\mathbf{v}'\vec{\boldsymbol{\omega}}]. \qquad (27.4)$$

Вектор $\mathbf{F}_K$ перпендикулярен векторам скорости v' тела и угловой скорости вращения ω системы отсчета в соответствии с правилом правого винта.

Сила Кориолиса действует только на тела, движущиеся относительно вращающейся системы отсчета, например относительно Земли. Поэтому действием этих сил объясняется ряд наблюдаемых на Земле явлений. Так, если тело движется в северном полушарии на север (рис. 43), то действующая на него сила Кориолиса, как это следует из выражения (27.4), будет направлена вправо по отношению к направлению движения, т. е. тело несколько отклонится на восток. Если тело движется на юг. то сила Кориолиса также действует вправо, если смотреть по направлению движения, т. е. тело отклонится на запад. Поэтому в северном полушарии наблюдается более сильное подмывание правых берегов рек; правые рельсы железнодорожных путей по движению изнашиваются быстрее, чем левые, и т. д. Аналогично можно показать, что в южном полушарии сила Кориолиса, действующая на движущиеся тела, будет направлена влево по отношению к направлению движения.

Благодаря силе Кориолиса падающие на поверхность Земли тела отклоняются к востоку (на широте 60° это отклонение должно составлять 1 см при падении с высоты 100 м). С силой Кориолиса связано поведение маятника Фуко, явившееся в свое время одним из доказательств вращения Земли. Если бы этой силы не было, то плоскость колебаний качающегося вблизи поверхности Земли маятника оставалась бы

неизменной (относительно Земли). Действие же сил Кориолиса приводит к вращению плоскости колебаний вокруг вертикального направления.
Раскрывая содержание $\mathbf{F}_{ин}$ в формуле
(27.1), получим **основной закон динамики** для **неинерциальных систем отсчета:**
$m\mathbf{a}'=\mathbf{F}+\mathbf{F}_и+\mathbf{F}_ц+\mathbf{F}_K$, где силы инерции задаются формулами
(27.2) – (27.4).
Обратим еще раз внимание на то, что *силы инерции вызываются* не взаимодействием тел, а *ускоренным движением системы отсчета.* Поэтому они не подчиняются третьему закону Ньютона, так как если на какое-либо тело действует сила инерции, то не существует противодействующей силы, приложенной к данному телу. Два основных положения механики, согласно которым ускорение всегда вызывается силой, а сила всегда обусловлена взаимодействием между телами, в системах отсчета, движущихся с ускорением, одновременно не выполняются.
Для любого из тел, находящихся в неинерциальной системе отсчета, силы инерции являются внешними; следовательно, здесь нет замкнутых систем. Это означает,
что в неинерциальных системах отсчета не выполняются законы сохранения импульса, энергии и момента импульса. Таким образом, силы инерции действуют только в неинерциальных системах. В инерциальных системах отсчета таких сил не существует.
Возникает вопрос о «реальности» или «фиктивности» сил инерции. В ньютоновской механике, согласно которой сила есть результат взаимодействия тел, на силы инерции можно смотреть как на «фиктивные», «исчезающие» в инерциальных системах отсчета. Однако возможна и другая их интерпретация. Так как 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». Независимо от того, рассматриваются ли силы инерции в качестве «фиктивных» или «реальных», многие явления, о которых упоминалось в настоящем параграфе, объясняются с помощью сил инерции.
Силы инерции, действующие на тела в неинерциальной системе отсчета, пропорциональны их массам и при прочих равных условиях сообщают этим телам одинаковые ускорения. Поэтому в «поле сил инерции» эти тела движутся совершенно одинаково, если только одинаковы начальные условия. Тем же свойством обладают тела, находящиеся под действием сил поля тяготения.
При некоторых условиях 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 тяготения от однородного поля сил инерции.
Аналогия между силами тяготения и силами инерции лежит в основе **принципа эквивалентности гравитационных сил и сил инерции (принципа эквивалентности Эйнштейна):** все физические явления в поле тяготения происходят совершенно так же, как и в соответствующем поле сил инерции, если напряженности обоих полей в соответствующих точках пространства совпадают, а прочие начальные условия для рассматриваемых тел одинаковы. Этот принцип является основой **общей теории относительности.**