

# Глава 5. Тяготение. Элементы теории поля

## § 22. Законы Кеплера.

### Закон всемирного тяготения

При поддержке католической церкви в течение почти полутора тысяч лет начиная со II в. н.э.

господствовала **птоломеева геоцентрическая система мира.**

В начале XVI в. польским астрономом Н. Коперником была обоснована **гелиоцентрическая система.**

И. Кеплер, обработав и уточнив результаты многочисленных наблюдений датского астронома Т. Браге, 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.
- 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 и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними:

$$F = G m_1 m_2 / r^2 \quad (22.1)$$

- 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**.
- Впервые экспериментальное доказательство закона всемирного тяготения для земных тел, а также числовое определение гравитационной постоянной  $G$  проведено английским физиком Г. Кавендишем

- Принципиальная схема опыта Кавендиша, применившего **крутильные весы**, представлена на рис. 37.

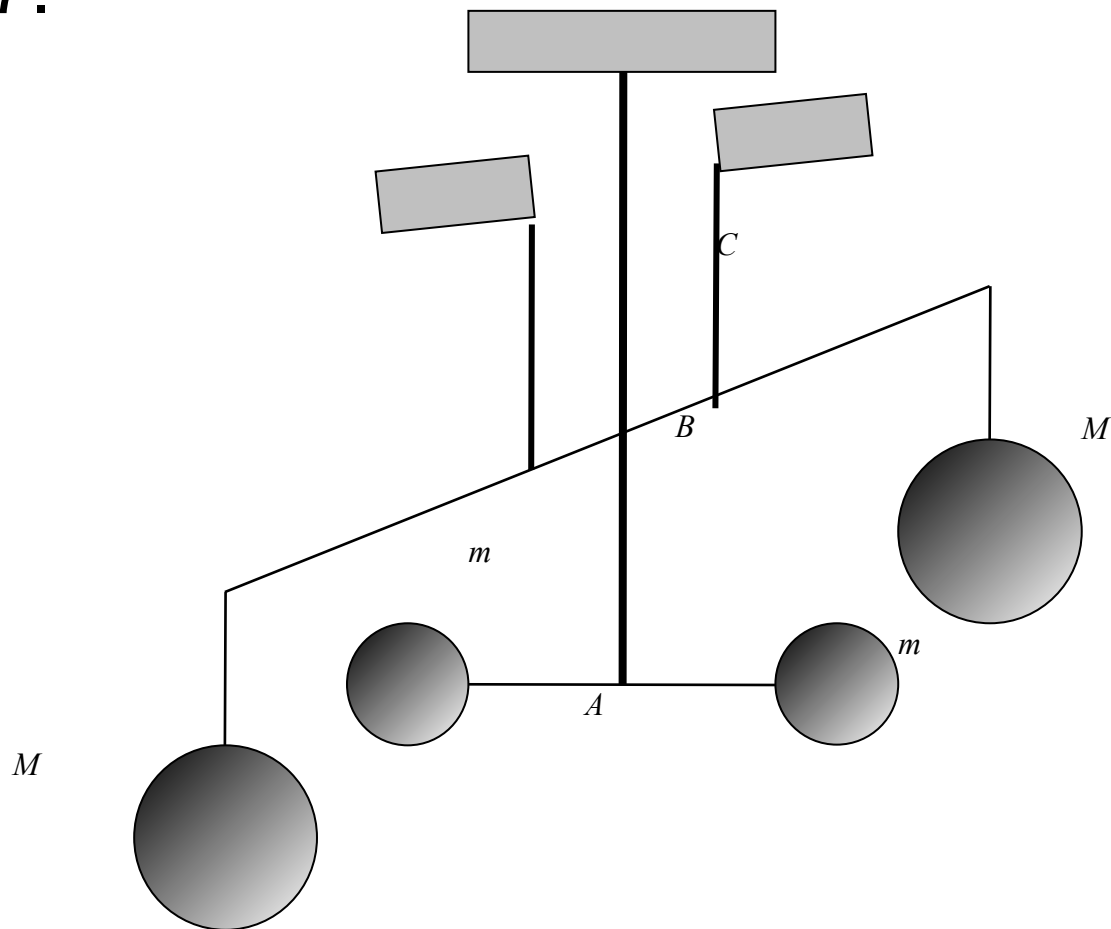


Рис. 37

## § 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 называемая **силой тяжести**.

$$\vec{P} = m\vec{g}$$

- Согласно фундаментальному физическому закону — **обобщенному закону Галилея**, все тела в одном и том же поле тяготения падают с одинаковым ускорением.

- 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

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

- **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*

- Если тело движется в поле тяготения Земли с ускорением  $\vec{a} \neq \vec{g}$ , то к этому телу приложена дополнительная сила  $\vec{N}$ , удовлетворяющая условию

$$\vec{N} + \vec{P} = m\vec{a}$$

- Тогда вес тела

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

т. е. если тело покоится или движется прямолинейно и равномерно, то  $\vec{a} = \mathbf{0}$  и  $\vec{P}' = m\vec{g}$

Если тело свободно движется в поле тяготения по любой траектории, то  $\vec{a} = \vec{g}$  и  $\vec{P}' = \mathbf{0}$ , т. е. тело будет невесомым.



## § 24. Поле тяготения и его напряженность

- Гравитационное взаимодействие между телами осуществляется с помощью **поля тяготения**, или **гравитационного поля**.
- Это поле порождается телами и является формой существования материи. Основное свойство поля тяготения заключается в том, что на всякое тело массой  $m$ , внесенное в это поле, действует сила тяготения

$$\vec{F} = m\vec{g} \quad (24.1)$$

- Вектор  $\vec{g}$  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 **центральный**, 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.

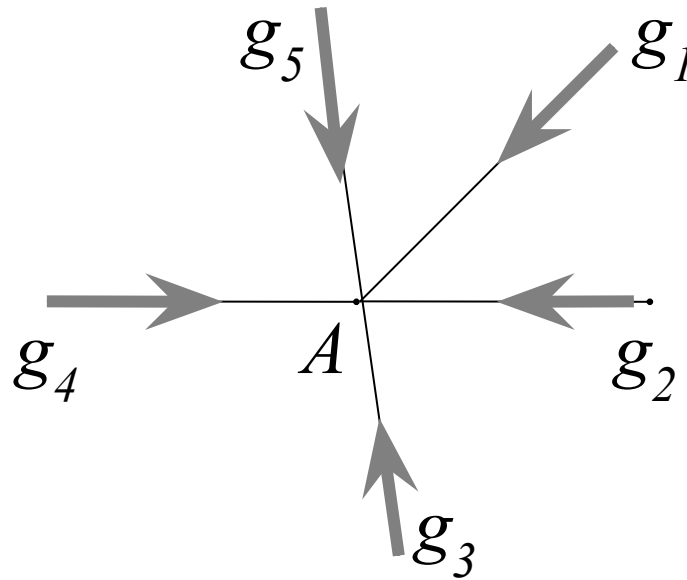


Рис. 38

## § 25. Работа в поле тяготения. Потенциал поля тяготения

- Вычислим, 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

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

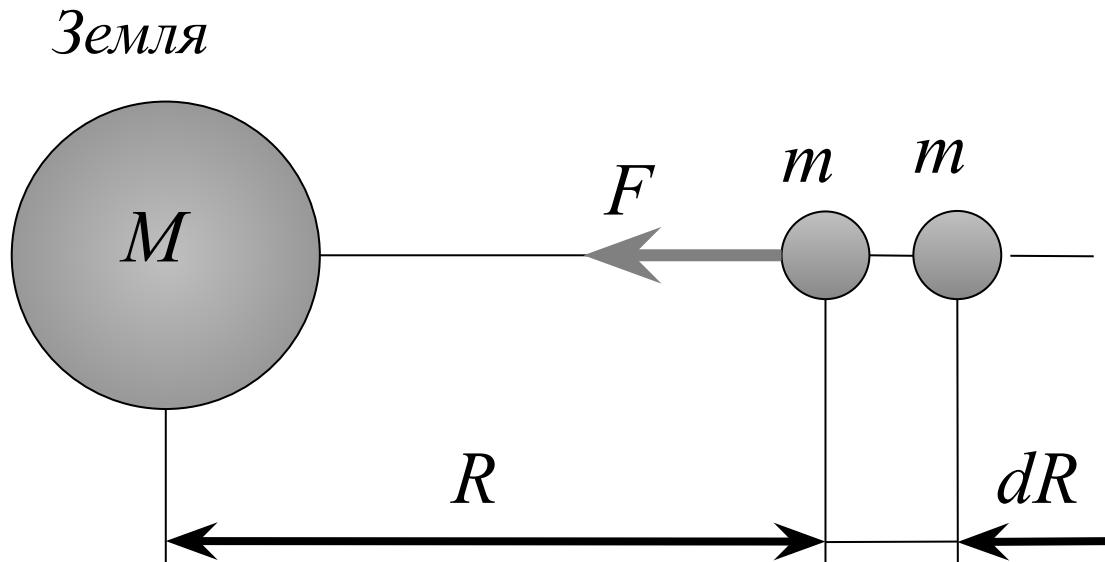


Рис. 39

- Если тело перемещать с  $R_1$  расстояния до  $R_2$  , то затрачивается работа

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

- 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

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

- В формулы входит только разность потенциальных энергий в двух состояниях, поэтому для удобства принимают потенциальную энергию при  $R_2 \rightarrow \infty$  равной нулю (  $\lim_{R_2 \rightarrow \infty} \Pi_2 = 0$  при  $R_2 \rightarrow \infty$  ).
- Тогда (25.3) запишется в виде  $\Pi_1 = -GmM / R_1$ .
- А так как первая точка была выбрана произвольно, то можно записать

$$\Pi = -GmM / R$$

- Величину  $\varphi = \Pi / m$ ,
- являющуюся энергетической характеристикой поля тяготения, называют потенциалом.

- **Потенциал поля тяготения  $\varphi$**  — 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

$$\varphi = -GM / R, \quad (25.4)$$

- где  $R$  — расстояние от этого тела до рассматриваемой точки.
- Из формулы (25.4) вытекает, что геометрическое место точек с одинаковым потенциалом образует сферическую поверхность ( $R = \text{const}$ ).



- Такие поверхности, для которых потенциал постоянен, называются **ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫМИ**.

- 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,  $dA = Fdl$  ( $dl$  — элементарное перемещение).

- Т.е.  $dA = mg dl = -m d\varphi$ ,

$$g = -\frac{d\varphi}{dl}.$$

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

Можно показать, что

$$\vec{g} = - \operatorname{grad} \varphi, \quad (25.5)$$

$$\operatorname{grad} \varphi = i \frac{\partial \varphi}{\partial x} + j \frac{\partial \varphi}{\partial y} + k \frac{\partial \varphi}{\partial z}$$

Знак минус в формуле (25.5) указывает, что вектор напряженности  $\vec{g}$  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

$$P = GmM / R_0^2 \text{ и } g = P / m = GM / R_0^2, \quad (25.6)$$

- то, учитывая условие  $h \ll R_0$ , получим

$$\Pi = mGMh / R_0^2 = mgh.$$

## § 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** 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, действует сила тяготения Земли, сообщая ему нормальное ускорение  $v_1^2 / r$  .  
По второму закону Ньютона,

$$GmM / r^2 = mv_1^2 / r .$$

- Если спутник движется недалеко от поверхности Земли, тогда  $r \approx R_0$  (радиус Земли) и  $g = GM / R_0^2$  .  
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** называют ту наименьшую скорость, которую необходимо 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:

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

- Следовательно

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

- **Третьей космической скоростью** называют скорость, которую необходимо сообщить телу на Земле, чтобы оно покинуло пределы Солнечной системы, преодолев притяжение Солнца. Третья космическая скорость равна 16,7 км/с.
- 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

- Законы Ньютона выполняются только в инерциальных системах отсчета. Системы отсчета, движущиеся относительно инерциальной системы с ускорением, называются **неинерциальными**.
- Законы динамики можно применять и для неинерциальных систем, 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.



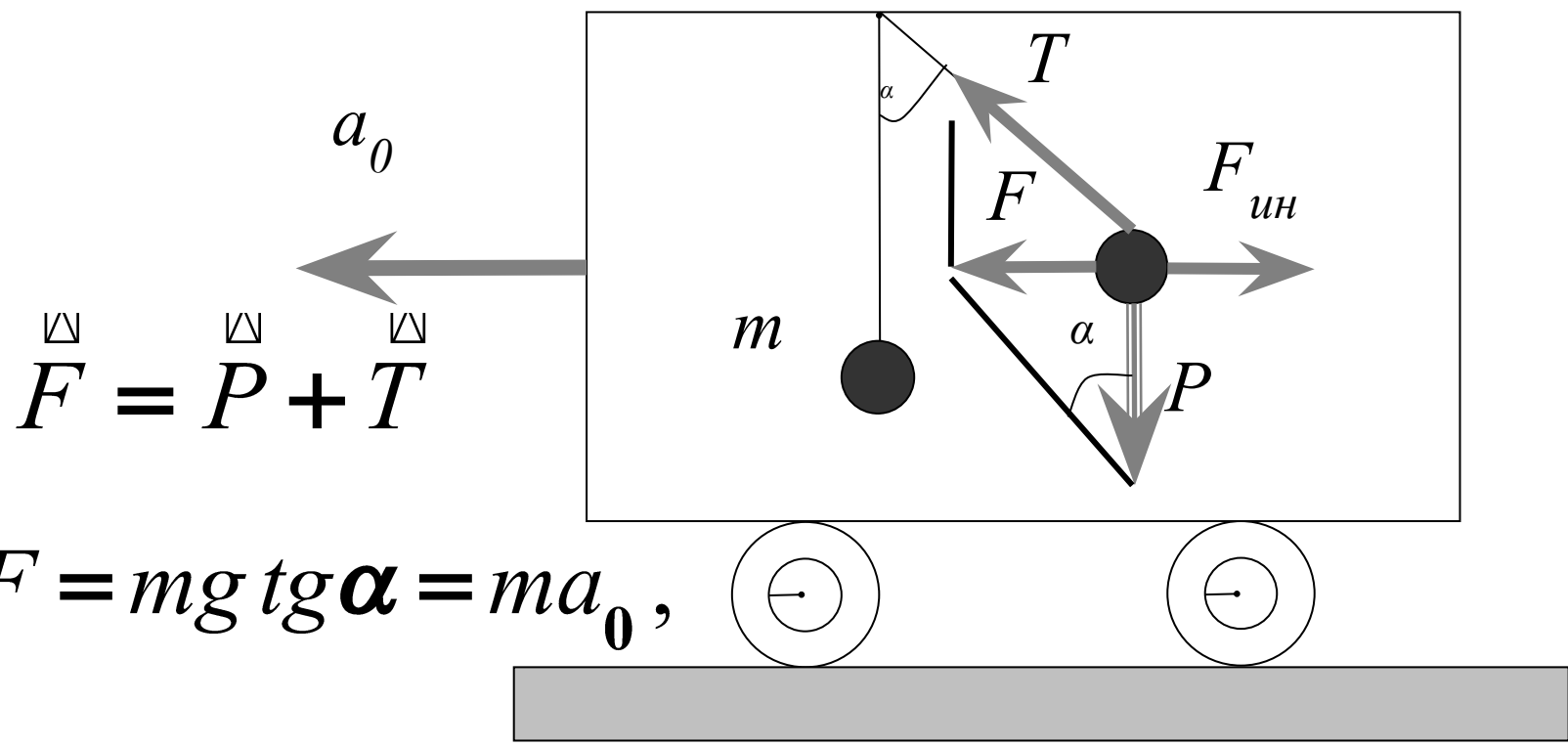
- $$m\overset{\boxtimes}{a}' = \overset{\boxtimes}{F} + \overset{\boxtimes}{F}_{ин} \quad (27.1)$$

- где  $\overset{\boxtimes}{a}'$  - ускорение в неинерциальной системе,
- $\overset{\boxtimes}{F}_{ин}$  - сила инерции,  $\overset{\boxtimes}{F} = m\overset{\boxtimes}{a}$  ( $\overset{\boxtimes}{a}$  - ускорение в инерциальной системе).

- Т.е. 
$$m\overset{\boxtimes}{a}' = m\overset{\boxtimes}{a} + \overset{\boxtimes}{F}_{ин} .$$

- 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.

- 1. Силы инерции при ускоренном поступательном движении системы отсчета.



$$\vec{F} = \vec{P} + \vec{T}$$

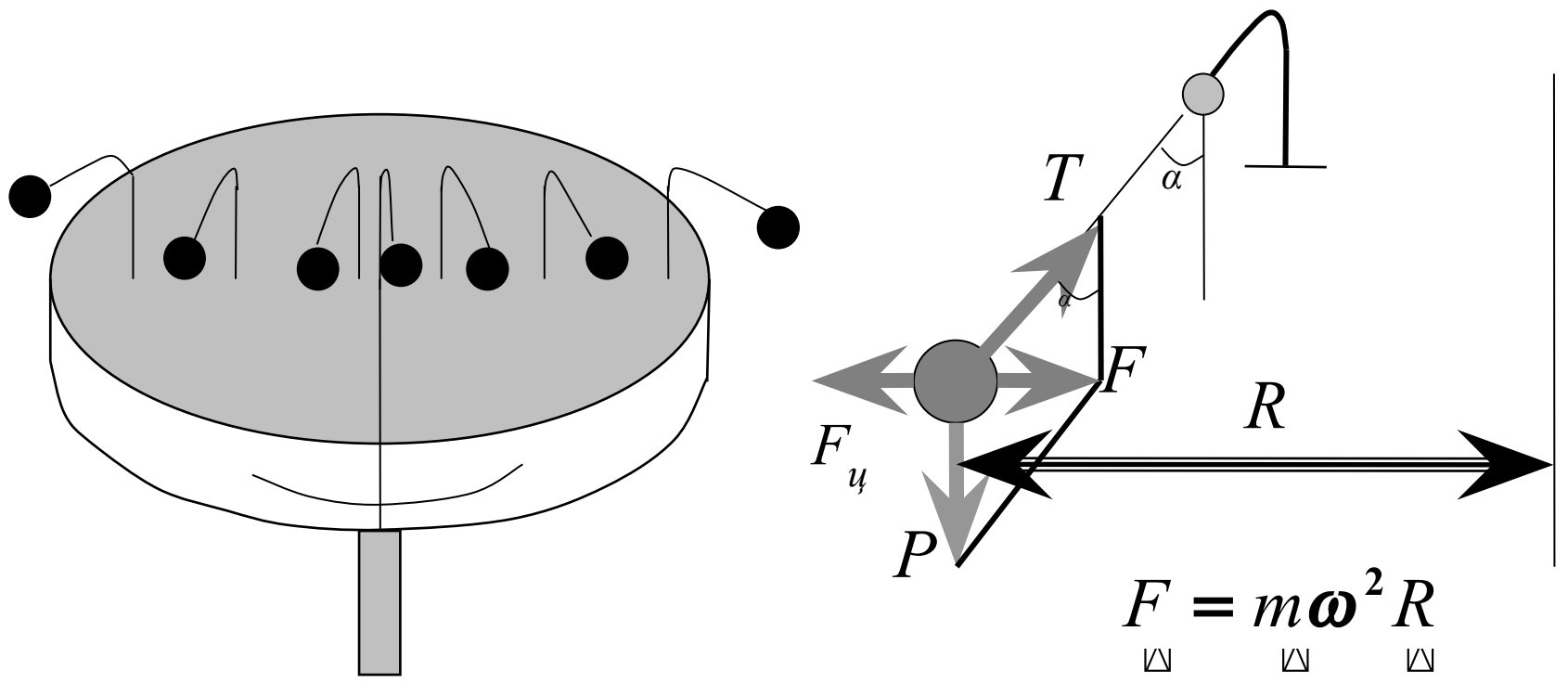
$$F = mg \operatorname{tg} \alpha = ma_0,$$

$$\operatorname{tg} \alpha = a_0 / g,$$

Рис. 40

$$\vec{F}_{ин} = -m\vec{a}_0. \quad (27.2)$$

- **2. Силы инерции, действующие на тело, покоящееся во вращающейся системе отсчета.**
- Пусть диск равномерно вращается с угловой скоростью ( $\omega = \text{const}$ ) вокруг вертикальной оси, проходящей через его центр.



$$F_u = -m\omega^2 R.$$

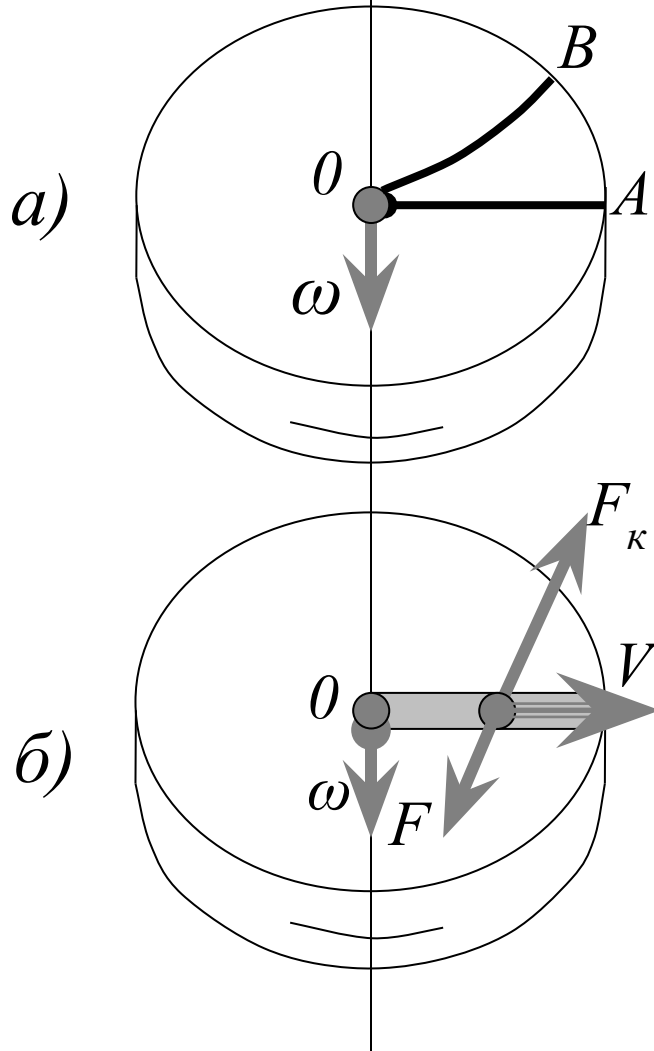
Рис. 41

$$F = m\omega^2 R$$

$$\underbrace{F}_{\square} = \underbrace{P}_{\square} + \underbrace{T}_{\square}$$

$$F = mg \operatorname{tg} \alpha = m\omega^2 R$$

- 3. Силы инерции, действующие на тело, движущееся во вращающейся системе отсчета.



$$F_k = 2m [v' \omega]$$

- Кариолисова сила инерции

Рис. 42

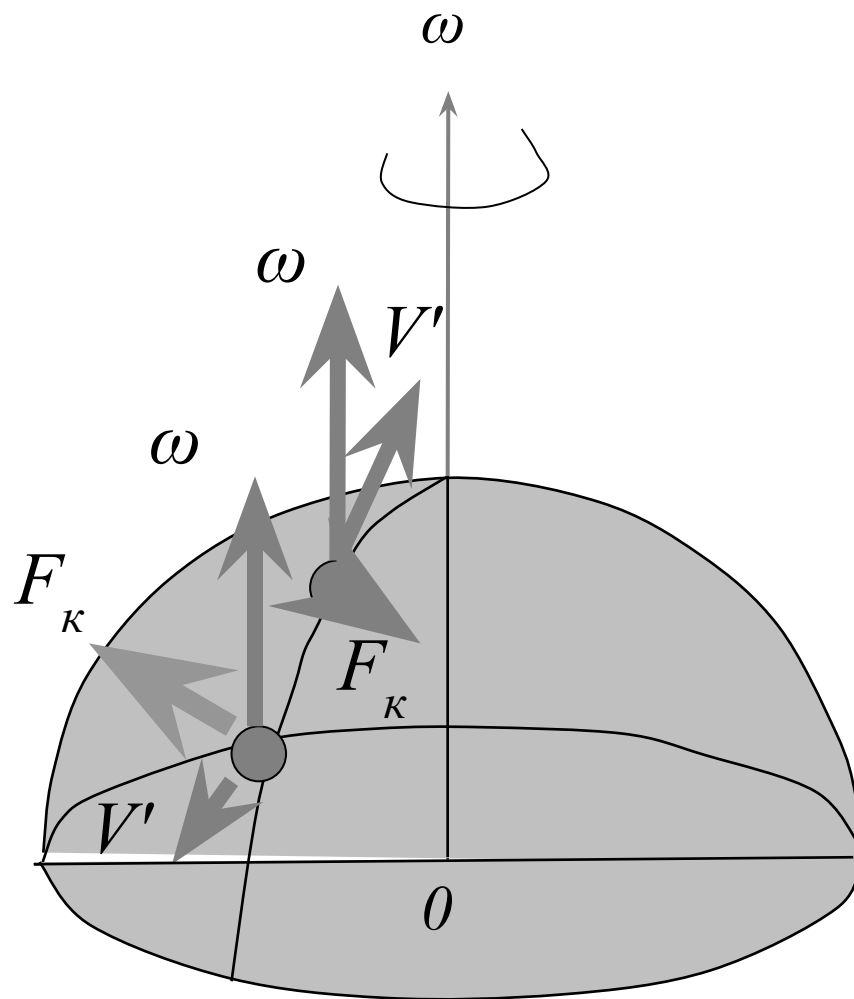


Рис. 43

# Основной закон динамики для неинерциальных систем отсчета:

$$m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{ин} + \vec{F}_{ц} + \vec{F}_{к},$$

- **Силы инерции**

- *вызываются не взаимодействием тел, а **ускоренным движением системы отсчета***

- 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.

- При некоторых условиях силы инерции и силы тяготения невозможно различить.
- 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**.