

## Лекция 7.

# Работа и мощность в механике. Закон сохранения энергии

- 1. Работа и мощность силы.*
- 2. Консервативные и диссипативные силы.*
- 3. Работа и энергия при вращательном движении.*
- 4. Плоское движение*
- 5. Связь между потенциальной энергией и силой.*
- 6. Механическая энергия частицы в силовом поле*
- 7. Полная механическая энергия*
- 8. Неинерциальные системы отсчета*

# 1. Работа и мощность силы.

$$dA = (\vec{F} \cdot d\vec{r})$$

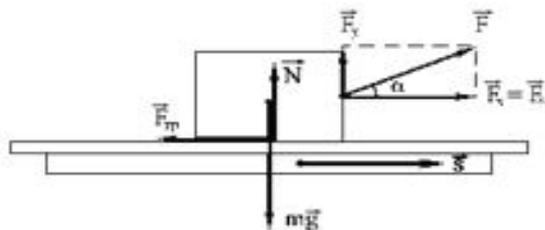
$$A = \int_A^B (\vec{F} \cdot d\vec{r})$$

$$\Phi = \frac{dA}{dt} = (\vec{F} \cdot \vec{v})$$

$$[A] = [\text{Дж}]$$

$$[\Phi] = [\text{ватт}]$$

# Механическая работа

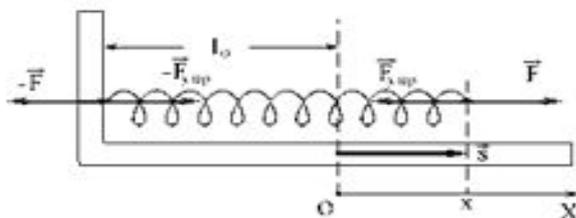


Внешние силы

$$A = F \cdot S \cdot \cos \alpha = F_S \cdot S$$

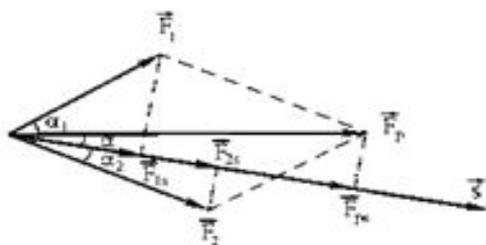
$$A_{\text{тр}} = -F_{\text{тр}} \cdot S$$

Силы упругости



$$F = F_S = kx; \quad A = \int (\vec{F} d\vec{x}) = \int kx dx = \frac{kx^2}{2}$$

$$A = \frac{kx^2}{2}$$

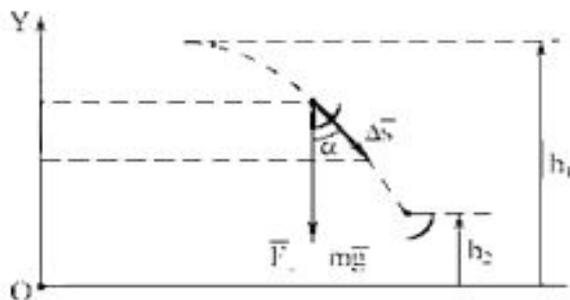


Система сил

$$F_{\rho} = F_1 + F_2$$

$$A = \sum_{i=1}^n A_i = F_1 \cdot S \cdot \cos \alpha_1 + F_2 \cdot S \cdot \cos \alpha_2 =$$

$$= F_{\rho} \cdot S \cdot \cos \alpha$$



Механическая работа силы тяжести

$$A = - (mgh_1 - mgh_2)$$

## 2. Консервативные и диссипативные силы

Поле, работа которого над телом по замкнутому пути равна нулю, называется **ПОТЕНЦИАЛЬНЫМ**.

Силы, работа которых не зависит от формы пути, а зависит от начального и конечного положения тела, называются **КОНСЕРВАТИВНЫМИ**.

А если зависит, то силы называются **неконсервативными**.

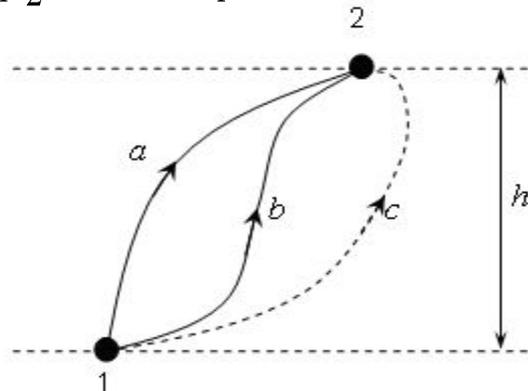
**Если работа какой-либо неконсервативной силы всегда меньше или равна нулю, то такая сила называется диссипативной.**

Потенциальная энергия не зависит от траектории движения.

*Работа сил потенциального поля на конечном перемещении и на замкнутом пути.*

$$A = E_{p1} - E_{p2} = -\Delta E_p$$

$$A = \oint_L \vec{F} \cdot d\vec{r} = 0$$

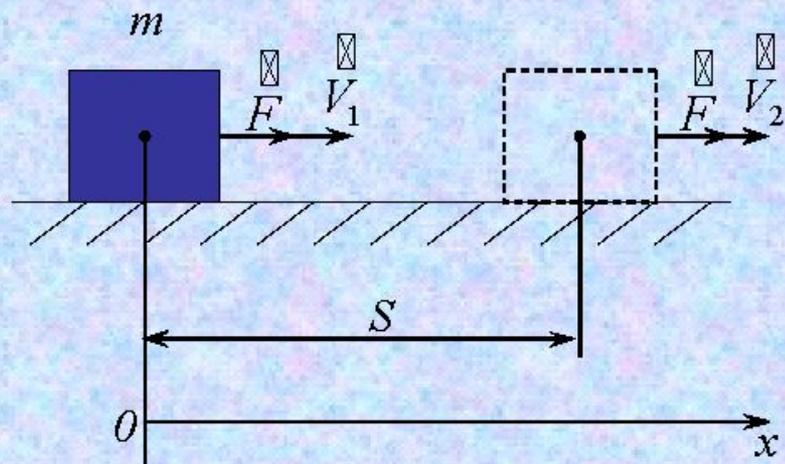


$$A_{1a2} = A_{1b2} = A_{1c2}$$

$$E_{p1} = 0; \quad E_{p2} = mgh$$

# Механическая работа и кинетическая энергия

## Скольжение по плоскости

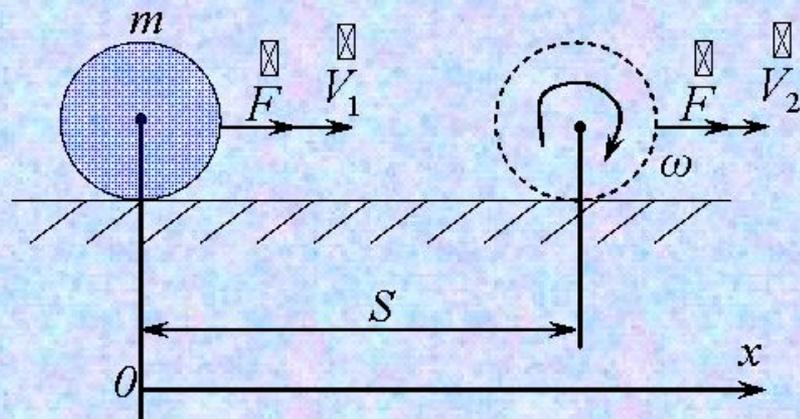


$$A = F \cdot S; \quad F = m \cdot a$$

$$\text{при } a = \text{const}, \quad S = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2a}$$

$$A = \frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2} = \Delta E_k, \quad \text{где } E_k = \frac{mV^2}{2}$$

## Качение по плоскости без проскальзывания (плоское движение)



$$A = E_k = E_k^{\text{пост}} + E_k^{\text{вращ}} = \frac{mV^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}$$

### 3. Работа и энергия при вращательном движении

В соответствии с законом изменения механической энергии системы элементарная работа всех внешних сил, действующих на твердое тело, равна приращению только кинетической энергии тела, так как его собственная потенциальная энергия при этом не меняется. Таким образом,

$$\Delta A = dT, \Delta A = d(I\omega^2/2).$$

Так как ось  $z$  совпадает с осью вращения, то  $\omega^2 = \omega_z^2$  и  $\Delta A = I\omega_z d\omega_z$ .

Но  $I d\omega_z = M_z dt$ . Учитывая, что  $\omega_z dt = d\varphi$ , получим  $\Delta A = M_z d\varphi$ .

Работа  $\Delta A$  - величина алгебраическая: если  $M_z$  и  $d\varphi$  имеют одинаковые знаки, то  $\Delta A > 0$ , если же их знаки противоположны, то  $\Delta A < 0$ .

Работа внешних сил при повороте твердого тела на конечный угол  $\varphi$  равна

$$A = \int_0^{\varphi} M_z d\varphi \qquad dA = (M \cdot d\varphi)$$

В случае, если  $M_z = \text{const}$ , то  $A = M_z \varphi$ .  $M_z$  – момент силы относительно оси;  $d\varphi$  - угловое перемещение;

Таким образом, работа внешних сил при вращении твердого тела вокруг неподвижной оси определяется моментом  $M_z$  этих сил относительно данной оси. Если силы таковы, что их момент  $M_z = 0$ , то работы они не производят.

$$E_k = \frac{I\omega^2}{2}$$

$I$  – момент инерции тела;

$\omega$  – угловая скорость;

## 4. Плоское движение

*Плоское движение – это такое движение, при котором все точки твердого тела движется в плоскостях, параллельных некоторой плоскости неподвижной в данной системе отсчета.*

При плоском движении центр масс  $C$  твердого тела движется в определенной плоскости, неподвижной в данной  $K$ -системе отсчета, а вектор его угловой скорости  $\omega$  все время остается перпендикулярным этой плоскости. Последнее означает, что в  $C$ -системе твердое тело совершает чисто вращательное движение вокруг неподвижной в этой системе оси, проходящей через центр инерции тела. Вращательное же движение твердого тела определяется уравнением, которое, справедливо в любой системе отсчета.

Таким образом, мы имеем следующие два уравнения, описывающие плоское движение твердого тела:

$$\begin{aligned} m a_c &= F; \\ I_c \varepsilon_z &= M_{cz}, \end{aligned}$$

где  $m$  - масса тела,  $F$  - результирующая всех внешних сил,  $I_c$  и  $M_c$  - момент инерции и суммарный момент всех внешних сил относительно оси, проходящей через центр инерции тела.

Момент  $M_C$  включает в себя только внешние силы взаимодействия, несмотря на то что С-система в общем случае является неинерциальной. Это связано с тем, что суммарный момент сил инерции равен нулю как относительно центра масс, так и относительно любой оси, проходящей через эту точку. Поэтому его можно просто не учитывать.

Заметим также, что угловое ускорение  $\varepsilon_z$ , а следовательно,  $\omega_z$  и  $\varphi$  одинаковы в обеих системах отсчета, так как С-система движется *поступательно* относительно инерциальной К-системы отсчета.

Интегрируя уравнения

$$m\vec{a}_C = \vec{F}; \quad I_C \varepsilon_z = M_{\alpha},$$

с учетом начальных условий, можно найти зависимости  $r_C$  и  $\varphi(t)$  и, определяющие положение твердого тела в любой момент  $t$ .

При решении задачи о движении *несвободного* твердого тела необходимо использовать еще одно, дополнительное, условие, определяющее ограничения движения имеющимися связями. Оно дает кинематическую связь между линейным и угловым ускорениями.

Выведем уравнение для кинетической энергии твердого тела при плоском движении. Пусть тело совершает плоское движение в некоторой инерциальной К-системе отсчета. Чтобы найти его кинетическую энергию  $T$  в этой системе, воспользуемся формулой  $\vec{L} = \vec{L}' + [\vec{r}_0, \vec{p}]$ . Входящая в эту формулу величина  $L'$  в данном случае дает вклад в кинетическую энергию вращения тела в С-системе вокруг оси, проходящей через центр масс тела.  $E'_{\text{кин}} = I_c \omega^2 / 2$ , поэтому сразу можно записать  $E_{\text{кин}} = I_c \omega^2 / 2 + mV_c^2 / 2$ , где  $I_c$  - момент инерции тела относительно оси вращения, проходящей через его центр масс,  $\omega$  -угловая скорость тела,  $m$  - его масса,  $V_c$  - скорость центра инерции тела в К-системе отсчета

Таким образом, **кинетическая энергия твердого тела при плоском движении складывается из энергии вращения в С-системе и энергии, связанной с движением центра масс.**

$$E_k = \frac{m \cdot v_c^2}{2} + \frac{I_c \cdot \omega^2}{2}$$

$v_c$  – скорость центра масс;  $I_c$  – момент инерции относительно центра масс/

## 5. Связь между потенциальной энергией и силой

Определить поле сил  $\mathbf{F}(\mathbf{r})$  по заданной потенциальной энергии  $U(\mathbf{r})$  как функции положения частицы в поле.

При перемещении частицы из одной точки потенциального поля в другую работа, которую производят силы поля, может быть представлена как *убыль* потенциальной энергии частицы, т. е.  $A_{12} = U_1 - U_2 = -\Delta U$ . Это относится и к элементарному перемещению  $d\mathbf{r}$ :  $\Delta A = -dU$ , или  $(\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}) = -dU$ .

Учитывая, что  $(\mathbf{F} d\mathbf{r}) = F \cos \alpha ds = F_s ds$ , где  $ds$  - элементарный путь, т.е.  $F_s ds = -dU$ , где  $-dU$  - это *убыль* потенциальной энергии *в направлении перемещения*  $d\mathbf{r}$ . Отсюда  $F_s = -\partial U / \partial s$ , т. е. проекция силы поля - вектора  $\mathbf{F}$  - в данной точке на направление перемещения  $d\mathbf{r}$  равна с обратным знаком производной потенциальной энергии  $U$  по данному направлению.

Символ частной производной означает, что потенциальная энергия  $U(x, y, z)$  при дифференцировании должна рассматриваться как функция одного аргумента  $x$ , остальные же аргументы должны оставаться при этом постоянными.

Итак, взяв с обратными знаками частные производные функции  $U$  по  $x$ ,  $y$  и  $z$ , мы найдем проекции  $F_x$ ,  $F_y$  и  $F_z$  вектора  $\mathbf{F}$  на орты  $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{k}$ . Отсюда легко найти и сам вектор:  $\vec{F} = iF_x + jF_y + kF_z$ , или

$$\vec{F} = -\left(\frac{\partial U}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial U}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial U}{\partial z}\vec{k}\right).$$

Величину, стоящую в скобках, называют *градиентом скалярной функции*  $U$  и обозначают  $\text{grad}U$  или  $\nabla U$ . Мы будем пользоваться вторым, более удобным, обозначением, где значок  $\nabla$  "набла" означает символический векторный оператор

$$\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$$

Поэтому  $\nabla U$  формально можно рассматривать как произведение символического вектора  $\nabla$  на скаляр  $U$ .

Таким образом, связь между силой поля и потенциальной энергией как функцией координат можно представить в следующем компактном виде:

$$\vec{F} = -\nabla U,$$

т. е. *сила поля  $F$  равна со знаком минус градиенту потенциальной энергии* частицы в данной точке поля. Можно сказать и проще: сила поля  $F$  равна *антиградиенту* потенциальной энергии. Последняя формула дает возможность, зная функцию  $U(\mathbf{r})$ , восстановить поле сил  $F(\mathbf{r})$ .

## 6. Механическая энергия частицы в силовом поле

Рассмотрим понятие кинетической энергии частицы. Пусть частица массы  $m$  движется под действием некоторой силы  $F$  (в общем случае эта сила  $F$  может быть результирующей нескольких сил). Найдем элементарную работу, которую совершает эта сила на элементарном перемещении  $dr$ . Имея в виду, что  $F = m dv/dt$  и  $dr = v dt$ , запишем  $\Delta A = F dr = m v dv = d(mv^2/2)$ .

Отсюда видно, что работа результирующей силы  $F$  идет на приращение некоторой величины стоящей в скобках, которую называют **кинетической энергией** частицы.

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2}.$$

Т.е. **приращение кинетической энергии частицы на некотором перемещении равно алгебраической сумме работ всех сил**, действующих на частицу на том же перемещении. Если  $A_{12} > 0$ , то  $E_{\text{кин}2} > E_{\text{кин}1}$ , т. е. кинетическая энергия частицы увеличивается; если же  $A_{12} < 0$ , то  $E_{\text{кин}2} < E_{\text{кин}1}$ , то есть кинетическая энергия уменьшается.

Уравнение можно представить и в другой форме, поделив обе части его на соответствующий промежуток времени  $dt$ :

$$\frac{dE_{кин}}{dt} = \vec{F}\vec{v} = N.$$

Это значит, что производная кинетической энергии частицы по времени равна мощности  $N$  результирующей силы  $F$ , действующей на частицу.

Теперь можно ввести понятие полной механической энергии частицы. Приращение кинетической энергии частицы равно элементарной работе результирующей всех сил  $F$ , действующих на частицу. Что это за силы? Если частица находится в интересующем нас потенциальном поле, то на нее действует консервативная сила  $F_k$  со стороны этого потенциального поля. Кроме того, на частицу могут действовать и другие силы, имеющие иное происхождение. Назовем их *сторонними силами*  $F_{см}$ .

Таким образом, результирующая  $F$  всех сил, действующих на частицу, может быть представлена в виде  $\vec{F} = \vec{F}_k + \vec{F}_{см}$ . Работа всех этих сил идет на приращение кинетической энергии частицы:

Работа сил поля равна убыли потенциальной энергии частицы, т. е.  $\Delta A_k = -dU$ . Тогда

$$dE_{кин} + dU = d(E_{кин} + U) = \Delta A_{см}.$$

Отсюда видно, что работа сторонних сил идет на приращение величины  $E_{\text{кин}} + U$ . Эту величину - сумму кинетической и потенциальной энергии - называют **полной механической энергией частицы в поле**:  $E = E_{\text{кин}} + U$ .

Заметим, что полная механическая энергия  $E$ , как и потенциальная, определяется с точностью до прибавления несущественной произвольной постоянной.

Изменение полной энергии 
$$\frac{dE}{dt} = \vec{F}_{\text{см}} \vec{v}.$$

Это значит, что производная полной механической энергии частицы по времени равна мощности результирующей всех сторонних сил, действующих на частицу.

Итак, мы установили, что полная механическая энергия частицы может измениться под действием только сторонних сил. Отсюда непосредственно вытекает закон сохранения полной механической энергии частицы во внешнем поле: **если сторонние силы отсутствуют или таковы, что алгебраическая сумма их мощностей равна нулю в течение интересующего нас времени, то полная механическая энергия частицы остается постоянной за это время**. Иначе говоря,  $E = E_{\text{кин}} + U = \text{const}$ , или  $mv^2/2 + U(\mathbf{r}) = \text{const}$ .

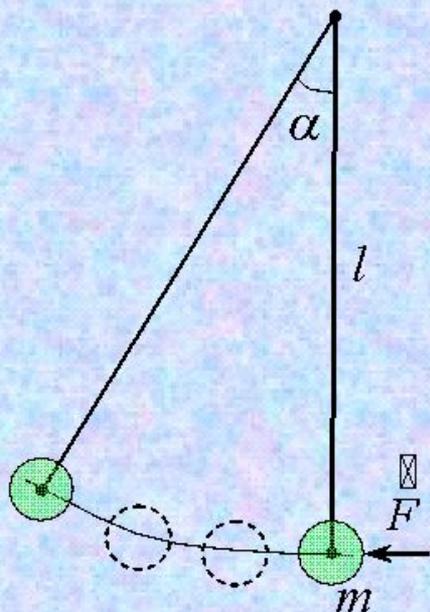
Уже в такой простейшей форме данный закон сохранения позволяет достаточно легко получать ответы на ряд важных вопросов без привлечения уравнений движения, что, часто сопряжено с проведением громоздких и утомительных расчетов. Именно это обстоятельство и превращает законы сохранения в весьма действенный инструмент исследования.

**Кинетическая энергия есть количественная мера поступательного движения тела.**

**Потенциальная энергия – способность тела совершать работу за счет изменения своего положения относительно тел, взаимодействующих с ним.**

**Работа консервативных сил при перемещении материальной точки (тела) равна убыли потенциальной энергии.**

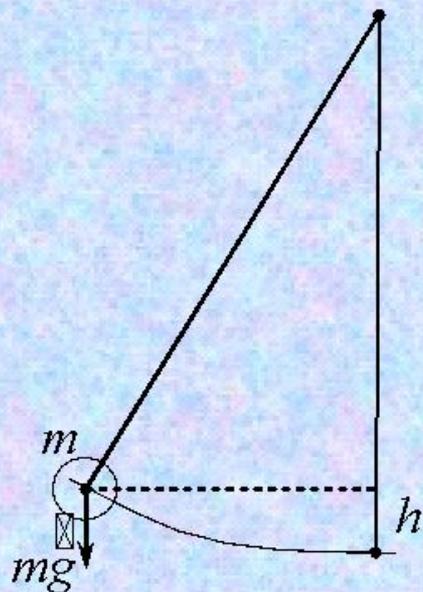
# Полная механическая энергия



Работа

внешней силы

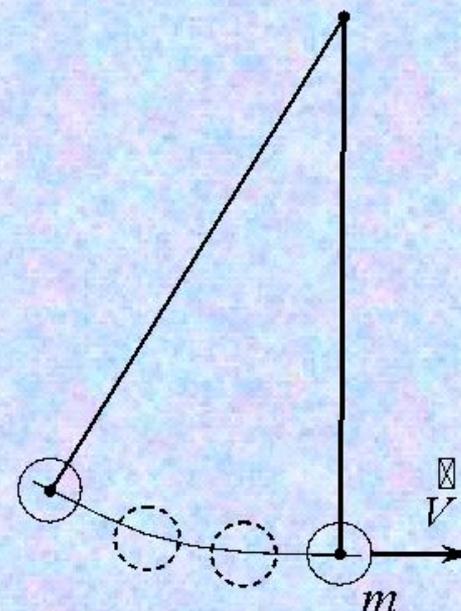
$$\delta A = (\vec{F} \cdot d\vec{S})$$



Потенциальная

энергия

$$E_{\text{п}} = mgh$$



Кинетическая

энергия

$$E_k = \frac{mV^2}{2}$$

$$\Delta E = \sum_{i=1}^n A_i$$

*В замкнутой системе, или в системе, в которой действуют только консервативные силы, полная механическая энергия сохраняется.*

Более глубокое осмысливание этого вопроса привело к фундаментальному выводу о существовании в природе универсального закона сохранения энергии: *энергия никогда не создается и не уничтожается, она может только переходить из одной формы в другую или обмениваться между отдельными частями материи.*

При этом понятие энергии пришлось расширить введением новых форм ее (помимо механической) - энергия электромагнитного поля, химическая энергия, ядерная и др.

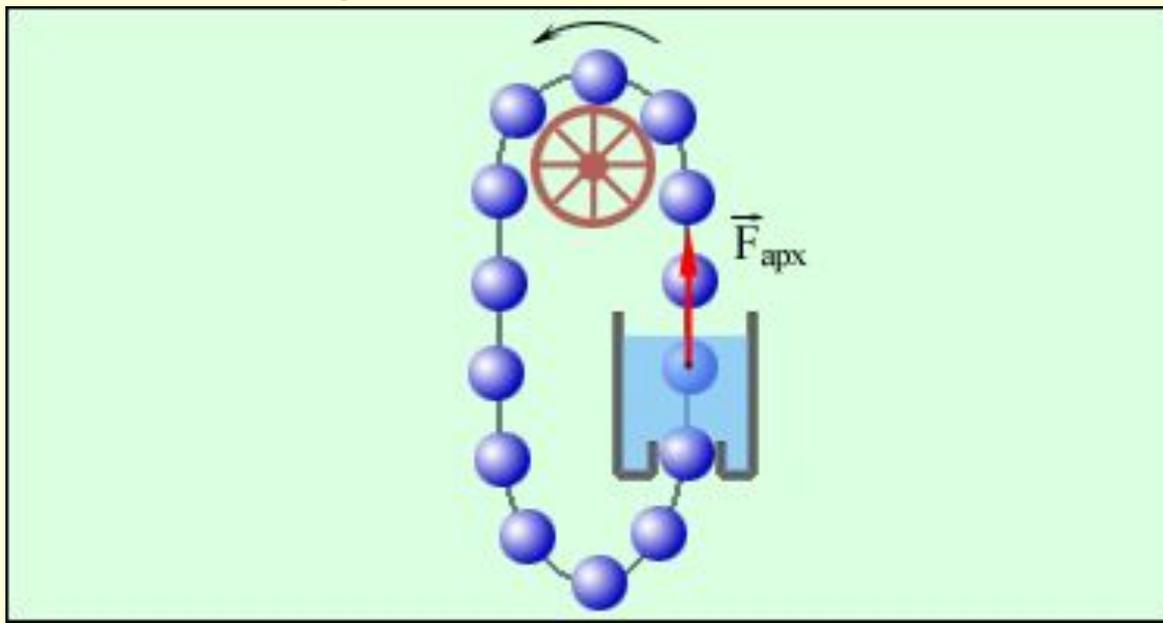
Универсальный закон сохранения энергии охватывает, таким образом, и те физические явления, на которые законы Ньютона не распространяются. Поэтому он не может быть выведен из этих законов, а должен рассматриваться как самостоятельный закон, представляющий собой одно из наиболее широких обобщений опытных фактов.

В заключение отметим, что при решении большинства задач закон сохранения энергии применяют обычно совместно с законом сохранения или импульса, или момента импульса, или с тем и другим одновременно.

Одним из следствий закона сохранения и превращения энергии является утверждение о невозможности создания «вечного двигателя» (*perpetuum mobile*) – машины, которая могла бы неопределенно долго совершать работу, не расходуя при этом энергии.

История хранит немало число проектов «вечного двигателя». В некоторых из них ошибки «изобретателя» очевидны, в других эти ошибки замаскированы сложной конструкцией прибора, и бывает очень непросто понять, почему эта машина не будет работать. Бесплодные попытки создания «вечного двигателя» продолжаются и в наше время. Все эти попытки обречены на неудачу, так как закон сохранения и превращения энергии «запрещает» получение работы без затраты энергии.

Один из проектов «вечного двигателя».



# 8. Неинерциальные системы отсчета

## Принцип относительности Галилея и преобразования Галилея

Если у нас обе системы инерциальные (то есть  $\overset{\square}{a}_{O'} = 0$ ) и тело  $A$  движется с ускорением  $\overset{\square}{a}'_A = \overset{\square}{a}_A$ , то  $\overset{\square}{a}_A \neq 0$  – ускорение инвариантно по отношению к переходу из одной инерциальной системы отсчёта в другую. Ускорения появляются при наличии силы, действующей на тело  $A$ :  $F = m \cdot \overset{\square}{a}_A = m \overset{\square}{a}'_A = F'$ .

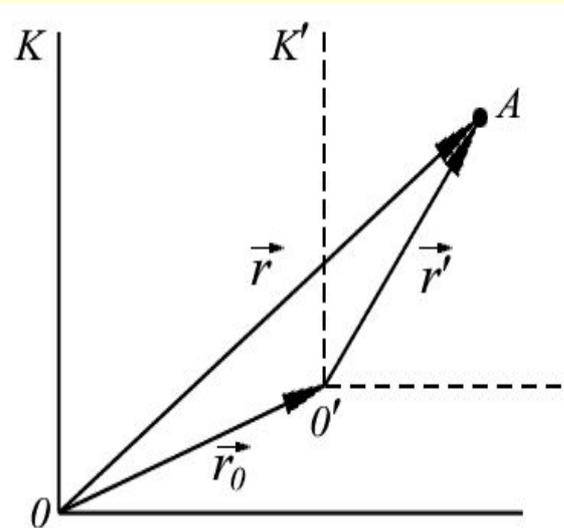
То есть, при переходе из одной инерциальной системы отсчёта в другую силы, действующие на тела, не меняются. А следовательно, выполняется **принцип относительности Галилея**: все механические явления в различных инерциальных системах отсчёта протекают одинаковым образом, вследствие чего никакими механическими опытами невозможно установить, покоится ли данная система отсчёта или движется равномерно и прямолинейно. Поскольку

$\overset{\square}{a}_{O'} = 0$ , то  $\overset{\square}{r}_A(t) = \overset{\square}{r}'_A(t) + \overset{\square}{v}_{O'} \cdot t$  – **преобразование Галилея**.

Если нештрихованная система инерциальная, а штрихованная – не инерциальная (то есть  $\vec{a}_{O'} \neq 0$ ) и тело  $A$  в инерциальной системе движется с ускорением  $\vec{a}_A \neq 0$ , то  $\vec{a}'_A = \vec{a}_A - \vec{a}_{O'}$ . Умножим все части уравнения на массу тела  $A$ :  $m \cdot \vec{a}'_A = m \cdot \vec{a}_A - m \cdot \vec{a}_{O'}$ . Поскольку  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}_A$ , то  $m \cdot \vec{a}'_A = \vec{F} - m \cdot \vec{a}_{O'}$ .

Д'Аламбер предложил ввести понятие фиктивной **силы инерции**  $F_{in} = -m \cdot \vec{a}_{O'}$ . Отличие силы инерции от реальных сил в том, что нет никакого тела, которое действует на изучаемое тело и, следовательно, **в отношении силы инерции нельзя говорить о выполнимости третьего закона Ньютона**. Однако понятие силы инерции очень удобно, поскольку для расчёта ускорения в неинерциальной системе отсчёта можно пользоваться формулой  $\vec{F} = m \cdot \vec{a}'_A$ , понимая под  $\vec{F}$  сумму реальных сил и **силы инерции**.

При поступательном движении неинерциальной системы отсчёта относительно инерциальной системы ускорение **одинаково для всех точек пространства**.

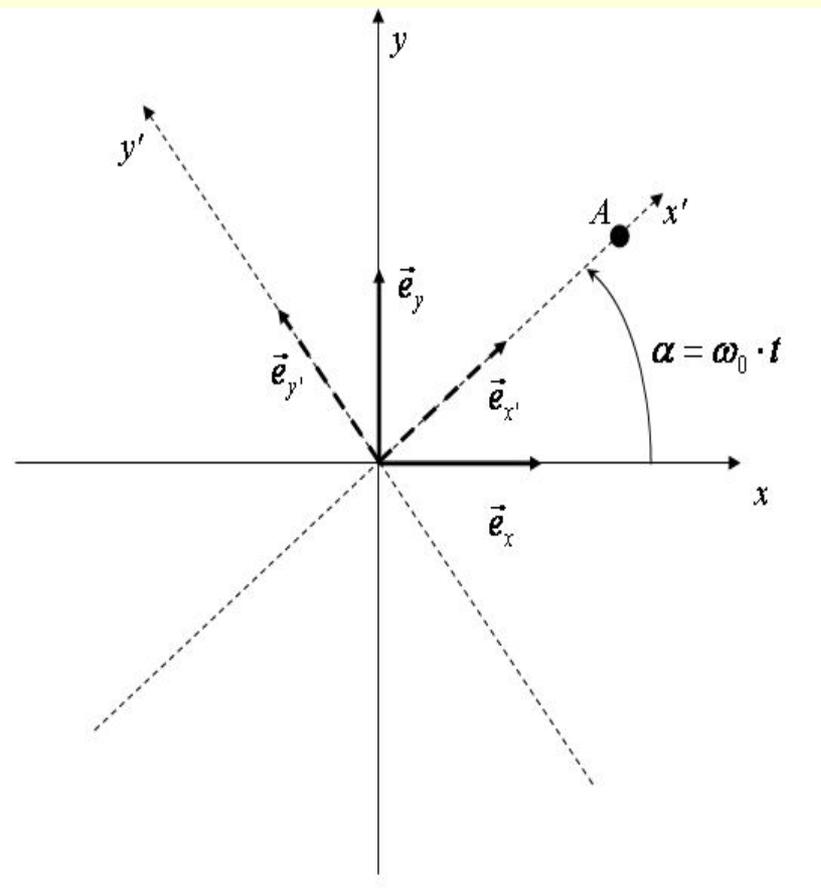


Если же неинерциальная система вращается, то это не так. Рассмотрим случай, когда оси  $z$  и  $z'$  совпадают и штрихованная система вращается относительно инерциальной нештрихованной с постоянной угловой скоростью. Пусть тело массой  $m$  находится в точке  $A$ , неподвижной во вращающейся (штрихованной) системе отсчёта. В этом случае радиус-вектор точки  $A$   $\vec{r} = R \cdot \vec{e}_{x'}$ , где  $R$  – расстояние от начала координат до точки  $A$ . При этом орт координаты  $x'$

$$\vec{e}_{x'} = \cos(\omega_0 \cdot t) \cdot \vec{e}_x + \sin(\omega_0 \cdot t) \cdot \vec{e}_y$$

, а орт координаты  $y'$

$$\vec{e}_{y'} = -\sin(\omega_0 \cdot t) \cdot \vec{e}_x + \cos(\omega_0 \cdot t) \cdot \vec{e}_y$$



Заметим, что  $\frac{d\vec{e}_{x'}}{dt} = \omega_0 \cdot \vec{e}_{y'}$ , а  $\frac{d\vec{e}_{y'}}{dt} = -\omega_0 \cdot \vec{e}_{x'}$ . Скорость точки

А: 
$$\vec{v} = \frac{dr}{dt} = \frac{d(R \cdot \vec{e}_{x'})}{dt} = R \cdot \frac{d\vec{e}_{x'}}{dt} = R \cdot \omega_0 \cdot \vec{e}_{y'}$$
,

а ускорение 
$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{d(R \cdot \omega_0 \cdot \vec{e}_{y'})}{dt} = -R \cdot \omega_0 \cdot \frac{d\vec{e}_{y'}}{dt} = -R \cdot \omega_0^2 \cdot \vec{e}_{x'}$$
.

Следовательно, в инерциальной системе на это тело действует сила  $\vec{F} = m \cdot \vec{a} = -m \cdot R \cdot \omega_0^2 \cdot \vec{e}_{x'}$ , направленная к центру вращения. Поскольку тело А в неинерциальной системе отсчёта неподвижно, то  $\vec{a}' = 0$  и  $\vec{F}' = \vec{F} + \vec{F}_{in} = 0$ . Отсюда  $\vec{F}_{in} = -\vec{F} = m \cdot R \cdot \omega_0^2 \cdot \vec{e}_{x'}$  и направлена от центра вращения. Такая сила инерции называется

**центробежной**  $\vec{F}_{цб}$ .

Рассмотрим случай, когда тело  $A$  движется от центра вращения вдоль оси  $x'$  с постоянной скоростью  $v'$ . Тогда  $\vec{r} = R \cdot \vec{e}_{x'} = (R_0 + v' \cdot t) \cdot \vec{e}_{x'}$ ,

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d(R \cdot \vec{e}_{x'})}{dt} = \frac{d((R_0 + v' \cdot t) \cdot \vec{e}_{x'})}{dt} = v' \cdot \vec{e}_{x'} + R \cdot \frac{d\vec{e}_{x'}}{dt} = v' \cdot \vec{e}_{x'} + R \cdot \omega_0 \cdot \vec{e}_{y'}$$

, а 
$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = v' \cdot \omega_0 \cdot \vec{e}_{y'} + v' \cdot \omega_0 \cdot \vec{e}_{y'} - R \cdot \omega_0^2 \cdot \vec{e}_{x'} = 2 \cdot v' \cdot \omega_0 \cdot \vec{e}_{y'} - R \cdot \omega_0^2 \cdot \vec{e}_{x'}$$

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} = 2 \cdot m \cdot v' \cdot \omega_0 \cdot \vec{e}_{y'} - m \cdot R \cdot \omega_0^2 \cdot \vec{e}_{x'}$$

Следовательно, в инерциальной системе на это тело действует сила

Поскольку тело  $A$  в неинерциальной системе отсчёта движется

равномерно и прямолинейно,  $\vec{a}' = 0$  то и  $\vec{F}' = \vec{F} + \vec{F}_{in} = 0$ . Отсюда

$$\vec{F}_{in} = -\vec{F} = -2 \cdot m \cdot v' \cdot \omega_0 \cdot \vec{e}_{y'} + m \cdot R \cdot \omega_0^2 \cdot \vec{e}_{x'} = -2 \cdot m \cdot v' \cdot \omega_0 \cdot \vec{e}_{y'} + \vec{F}_{цб}$$

Значит, кроме центробежной силы на тело, движущееся в неинерциальной системе отсчёта равномерно и прямолинейно действует ещё одна сила инерции – сила Кориолиса:

$$\vec{F}_{Кор} = -2 \cdot m \cdot v' \cdot \omega_0 \cdot \vec{e}_{y'} = 2 \cdot m \cdot [\vec{v}'; \omega_0]$$

которая направлена перпендикулярно направлению движения.

Полная сила инерции в этом случае 
$$\vec{F}_{in} = \vec{F}_{цб} + \vec{F}_{Кор} .$$