Лекция 4.
Закон сохранения энергии

Вопросы:

- Механическая энергия. Работа и кинетическая энергия
- Понятие силового поля. Консервативные силы
- Работа в потенциальном поле. Потенциальные энергии упругих деформаций и тяготения
- Связь между потенциальной энергией и силой
- Закон сохранения энергии механической системы

Механическая энергия. Работа и кинетическая энергия

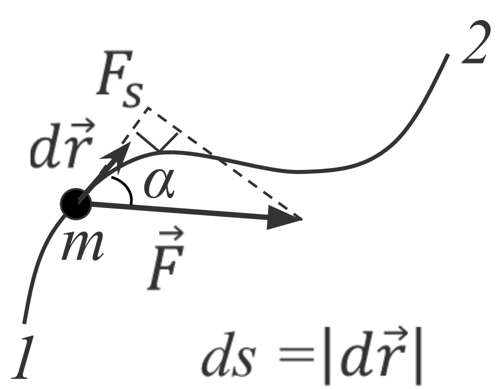
- Понятия энергии и работы широко используются в повседневной жизни. Эти понятия тесно связаны друг с другом. Например, говорят об энергичном или работоспособном человеке. Само слово «энергия» происходит от греческого слова ενεργια – деятель-ность.
- Известно, что работа совершается за счет запаса энергии и, наоборот, совершая работу, можно увеличить запас энергии в каком-либо объекте (устройстве). Например, совершая работу при заводе механических часов, мы создаем запас энергии в пружине, за счет которого затем идут часы.
- Энергия является общей количественной мерой движения и взаимодействия всех видов материи.

Механическая энергия. Работа и кинетическая энергия

- Энергия не исчезает и не возникает из ничего, она может лишь переходить из одной формы (вида) в другую. Это определяет суть Всеобщего закона сохранения и превращения энергии.
- Понятие энергии связывает воедино все явления природы. В соответствии с различными формами движения материи рассматривают следующие виды энергии:
- механическую;
- внутреннюю;
- электромагнитную;
- ядерную и др.
- Механическая энергия бывает двух видов: *кинетическая и потенциальная*.

Механическая энергия. Работа и кинетическая энергия

- *Кинетическая энергия* (или энергия движения) определяется массами и скоростями (импульсами) рассматриваемых тел.
- *Потенциальная энергия* (или энергия положения) зависит от взаимного расположения (от конфигурации) взаимодействующих друг с другом тел.
- Пусть частица массой m под действием переменной силы $\vec{F}$ совершает перемещение по некоторой траектории 1 – 2. Рассмотрим элементарное перемещение $d\vec{r}$, в пределах которого силу можно считать постоянной.



Тогда *элементарной работой* δA силы $\vec{F}$ на перемещении $d\vec{r}$ называют скалярное произведение:

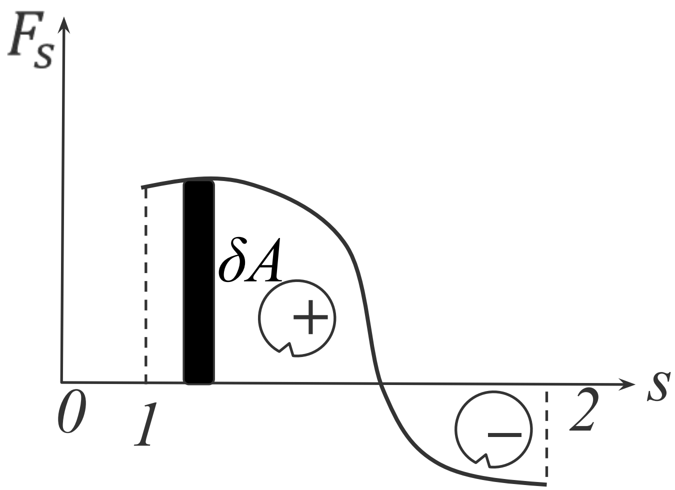
$$\delta A = \vec{F} \cdot d\vec{r} = F \cdot cos\alpha \cdot ds = F_s ds \quad (1)$$

Механическая энергия. Работа и кинетическая энергия

- Элементарная работа δA – величина алгебраическая: в зависимости от угла α она может быть как положительной, так и отрицательной, в частности, $\delta A = 0$ при $\alpha = 90°$, т.е. когда $\vec{F} \perp d\vec{r}$.
- Проведя интегрирование выражения (1) по пути 1-2, получим *полную работу силы* $\vec{F}$ на данном участке:

$$A_{12} = \int_1^2 \vec{F} d\vec{r} = \int_1^2 F_s ds \qquad (2)$$

- Размерность работы (и энергии) в СИ: [Дж] = [Н][м].



Работу можно также математически понимать как площадь под соответствующей зависимостью $F_s = f(s)$.

Механическая энергия. Работа и кинетическая энергия

Связь работы и кинетической энергии

- Пусть частица (материальная точка) массы m движется под действием силы $\vec{F}$ (в общем случае $\vec{F}$ - результирующая нескольких сил). Определим элементарную работу этой силы на перемещении $d\vec{r}$ с использованием уравнения динамики $\vec{F} = m\frac{d\vec{v}}{dt}$, т.е.

$$\delta A = \vec{F}d\vec{r} = m\frac{d\vec{v}}{dt}\cdot d\vec{r} = m(\vec{v}d\vec{v}), \tag{3}$$

где скалярное произведение $(\vec{v}d\vec{v}) = v(d\vec{v})_v = v\cdot dv$, а поэтому $\delta A = mvdv = d\left(m\frac{v^2}{2}\right)$. (4)

- Величину $K = \frac{mv^2}{2}$ - называют кинетической энергией частицы. Часто кинетическую энергию определяют через импульс $p = mv$ как $K = \frac{p^2}{2m}$.
- Таким образом $dK = \delta A$ – элементарное приращение кинетической энергии частицы равно элементарной работе.

Механическая энергия. Работа и кинетическая энергия

Связь работы и кинетической энергии

- При конечном перемещении частицы из т. 1 в т. 2:

$$\Delta K = K_2 - K_1 = A_{12}, \qquad (5)$$

где $A_{12} = \int_1^2 \vec{F} d\vec{r}$.

- *Вывод*. Работа результирующей всех сил, действующих на частицу, при ее некотором перемещении, идет на приращение кинетической энергии частицы. Если $A_{12} > 0$, то и $K_2 > K_1$ и $\Delta K > 0$
- *Замечание*. Часто это называют теоремой о кинетической энергии.
- При рассмотрении механической системы полную работу A, которую совершают все силы, действующие на все частицы системы, при изменении ее состояния в пространстве, можно представить как:

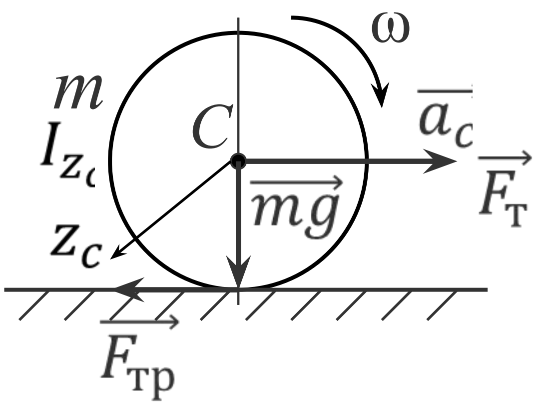
$$A = \sum_i A_i = \sum_i \Delta K_i = \Delta \sum_i K_i, \qquad (6)$$

где A_i - работа всех сил, действующих на i-ую частицу, ΔK_i - приращение кинетической энергии i-ой частицы; или (6) – в виде: ***A*=Δ*K***, где $K = \sum_i K_i$ - суммарная кинетическая энергия всей системы.

Механическая энергия. Работа и кинетическая энергия

Расчет приращения кинетической энергии тела

При рассмотрении плоского движения твердого тела массой m обычно изучают отдельно: 1) поступательное движение его центра масс и составляют уравнение движения $m\,\overrightarrow{a_c} = \vec{F}$; 2) вращательное движение тела вокруг оси, проходящей через центр масс z_c, и записывают уравнение динамики вращения в виде $I_{z_c} \cdot \vec{\varepsilon} = \overrightarrow{M_{z_c}}$ (здесь I_{z_c}- момент инерции тела, $\overrightarrow{M_{z_c}}$ - суммарный момент всех внешних сил относительно оси z_c, $\vec{\varepsilon} = \dfrac{d\vec{\omega}}{dt}$ - угловое ускорение тела).



Тело при таком движении обладает кинетической энергией:

$$K = K_{пос} + K_{вр},$$

где $K_{пос} = \dfrac{mv^2}{2}$, $K_{вр} = \dfrac{I_{z_c}\omega^2}{2}$ - энергии поступательного и вращательного движений.

Механическая энергия. Работа и кинетическая энергия

Расчет приращения кинетической энергии тела

- И так, работа всех внешних сил, действующих на твердое тело, равна приращению его кинетической энергии, т.е. $A_{\Sigma} = \Delta K$, где $\Delta K = \Delta K_{\text{пос}} + \Delta K_{\text{вр}}$.
- Причем элементарную работу при вращении можно определить как $\delta A_{\text{вр}} = dK_{\text{вр}} = d\left({}^{I_{z_c}\omega^2}/_2\right) = I_{z_c}\omega d\omega$, а с учетом уравнения динамики вращения $I_{z_c} \cdot d\omega = M_{z_c} \cdot d\,t$, получаем для $\delta A_{\text{вр}} = M_{z_c}\omega dt$ или $\delta A_{\text{вр}} = M_{z_c} d\varphi$.
- Таким образом при повороте тела на конечный угол φ работу всех внешних сил можно вычислять как:

$$A_{\text{вр}} = \int_0^{\varphi} M_{z_c} d\varphi.$$

- При поступательном движении приращение энергии:

$\Delta K_{\text{пос}} = A_{\text{пос}} = \int_0^{S_k} F ds$, а в случае $F = const$ имеем

$A_{\text{пос}} = F\int_0^t a_c t dt = F\int_0^t \frac{F}{m} t dt = \frac{F^2}{m}\frac{t^2}{2}$, где учтено, что

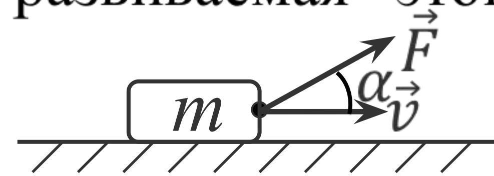
$$ds = d\left(\frac{a_c t^2}{2}\right) = a_c t dt \text{ а } a_c = \frac{F}{m}.$$

Механическая энергия. Работа и кинетическая энергия

Понятие мощности

- Для характеристики скорости, с которой совершается работа, вводят величину, называемую *мощностью*.
- Мощность - это работа, совершаемая силой за единицу времени.
- Если за промежуток времени dt сила $\vec{F}$ совершает работу $\delta A = \vec{F} d\vec{r}$, то мощность, развиваемая этой силой в данный момент времени:

$$P = \vec{F} d\vec{r}/dt = \vec{F} \cdot \vec{v}$$



- Таким образом, мощность равна скалярному произведению вектора силы на вектор скорости, с которой движется точка приложения данной силы.

Мощность, как и работа, - величина алгебраическая.

Зная мощность силы $\vec{F}$, можно найти работу, которую совершает сила за конечный промежуток времени t как

$$A_{12} = \int_1^2 \vec{F} d\vec{r} = \int_0^t \vec{F} \vec{v} dt = \int_0^t P dt.$$

Размерность мощности в СИ: [Вт]=[Дж]/[с].

Понятие силового поля. Консервативные силы

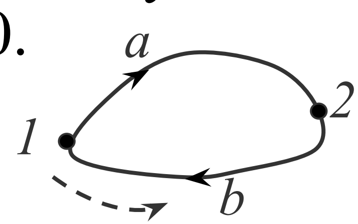
- Известно, что кроме контактных взаимодействий, возникающих между соприкасающимися телами, наблюдаются также взаимодействия между телами, удаленными друг от друга. Подобные взаимодействия осуществляются посредством физических полей, которые представляют собой особую форму материи.
- Каждое тело создает в окружающем его пространстве особое состояние, называемое *силовым полем*. Это поле проявляет себя в действии сил на другие тела (пробные частицы). Также говорят, что частица находится в поле сил, если в каждой точке пространства на частицу действует сила $\vec{F}$. Например, частица может находится в поле сил тяжести, в поле упругих сил, в поле кулоновских сил, в поле сил сопротивления (будучи в потоке жидкости или газа).
- *Замечание.* Если силы во всех точках поля одинаковы по модулю и направлению, то такое *поле* называют *однородным*. Если поле не изменяется со временем, то его называют *стационарным*. В частном случае однородного, стационарного поля имеем $\vec{F} = \overline{const}$

Понятие силового поля. Консервативные силы

- Работа, которую совершают силы поля при перемещении частицы из т. 1 в т. 2, зависит, вообще говоря, от пути (от траектории) между этими точками.
  Вместе с тем имеются силовые поля, в которых работа, совершаемая над частицей, не зависит от пути.

Классификация сил в механике

- *Силы*, работа которых не зависит от пути, по которому двигалась частица, а зависит лишь от начального и конечного положения частицы, называются *консервативными*.
- *Силы*, работа которых зависит от пути, называются *неконсервативными.*
- *Свойство консервативных сил* можно сформулировать иначе: силы поля являются консервативными, если в стационарном случае их работа на любом замкнутом пути равна 0.



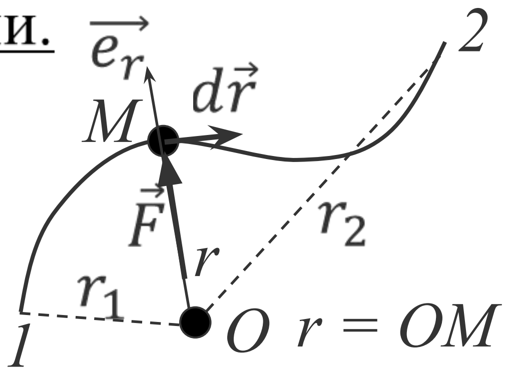
Так как $A_0 = A_{1a2} + A_{2b1}$ и A_{2b1}= -A_{1b2}, то тогда A_0= $A_{1a2} - A_{1b2}$= 0, так как в нашем случае $A_{1a2} = A_{1b2}$, ч.т.д.

Понятие силового поля. Консервативные силы

- *Силы*, зависящие только от расстояния между взаимодействующими частицами и направленные по прямой, проходящей через центры этих частиц, называются *центральными*. Например, гравитационные, кулоновские, упругие силы – это центральные силы.
- Центральную силу, действующую на частицу M со стороны частицы O (силовой центр), можно представить в виде:

$$\vec{F} = f(r)\overrightarrow{e_r}, \qquad (7)$$

где $f(r)$ – функция, зависящая при данном характере взаимодействия только от расстояния r между частицами. <u>Центральные силы являются консервативными.</u>



Элементарная работа силы (7) на перемещении $d\vec{r}$ есть $\delta A = \vec{F} d\vec{r} = f(r)\overrightarrow{e_r} d\vec{r} = f(r)dr$, так как $\overrightarrow{e_r} d\vec{r} = dr$ Тогда работа этой силы на произвольном пути от т. 1 до т. 2:

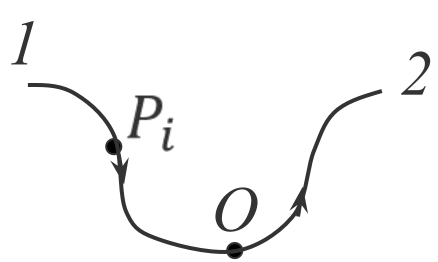
$$A_{12} = \int_{r_1}^{r_2} f(r)dr \qquad (8)$$

Работа в потенциальном поле

- Рассмотрим стационарное поле консервативных сил, в котором перемещается частица из разных точек P_i в фиксированную точку O. Работа сил поля здесь будет некоторой функцией радиуса-вектора $\vec{r}$ точки P. Обозначив эту функцию как $U(\vec{r})$, получим:

$$A_{PO} = \int_P^O \vec{F} d\vec{r} = U(\vec{r}) \qquad (9)$$

- Функцию $U(\vec{r})$ называют *потенциальной энергией* частицы в данном силовом поле.
- Определим работу в поле консервативных сил при перемещении частицы из т. 1 в т. 2; причем, так как работа не зависит от пути, выберем путь, проходящий через т. O. Тогда $A_{12} = A_{1O} + A_{O2} = A_{1O} - A_{2O}$ или с учетом (9) имеем:



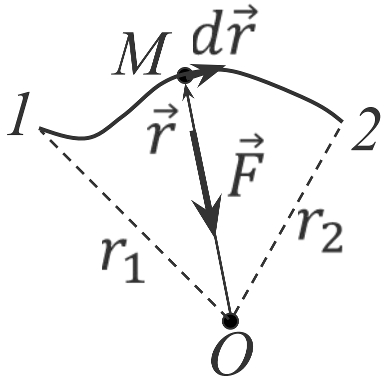
$$A_{12} = \int_1^2 \vec{F} d\vec{r} = U_1 - U_2 \qquad (10)$$

Работа сил поля на пути 1-2 равна убыли потенциальной энергии частицы в данном поле.

Потенциальные энергии упругих деформаций и тяготения

- Формула (10) позволяет найти выражение $U(\vec{r})$ для любого стационарного поля консервативных сил (такие поля еще называют *потенциальными*). Для этого достаточно вычислить работу A_{12} и представить ее в виде убыли некоторой функции, которая и есть потенциальная энергия $U(\vec{r})$.

1. <u>Работа упругой силы $\vec{F} = -\text{к}\vec{r}$</u>, где к – коэффициент упругости, $\vec{r}$ - радиус-вектор частицы M относительно т. O (силовой центр). Переместим частицу в поле уругой силы по произвольному пути 1-2 и определим работу A_{12}.

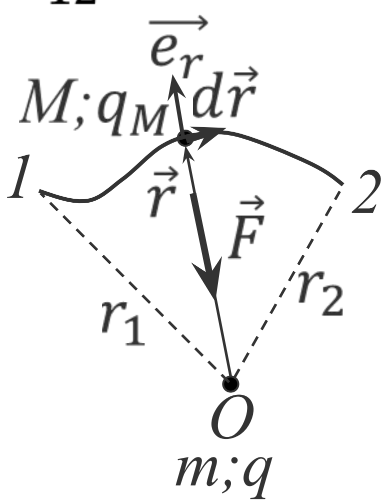


Элементарная работа $\delta A = \vec{F}d\vec{r} = -\text{к}\vec{r}\cdot d\vec{r}$, где $\vec{r}d\vec{r} = r(d\vec{r})_r = rdr$, поэтому $\delta A = -\text{к}rdr = -d\left(\frac{\text{к}r^2}{2}\right)$.

Таким образом полная работа на пути 1-2: $A_{12} = -\int_{r_1}^{r_2} d\left(\frac{\text{к}r^2}{2}\right) = \frac{\text{к}r_1^2}{2} - \frac{\text{к}r_2^2}{2}$, где справа стоит убыль потенциал. энергии; а значит $U(r) = \frac{\text{к}r^2}{2}$ - потенц. энергия частицы в поле упругой силы.

Потенциальные энергии упругих деформаций и тяготения

2. Работа гравитационной (или кулоновской) силы $\vec{F} = \left(\frac{\alpha}{r^2}\right)\overrightarrow{e_r}$, где α – соответствующая постоянная (для гравитационного взаимодействия $\alpha = -\gamma m M$, для кулоновского взаимодействия $\alpha = kqq_M$), $\overrightarrow{e_r}$ - орт радиус-вектора $\vec{r}$ частицы M относительно т. O (силовой центр). Переместим частицу в поле данной силы по произвольному пути 1-2 и определим работу A_{12}.

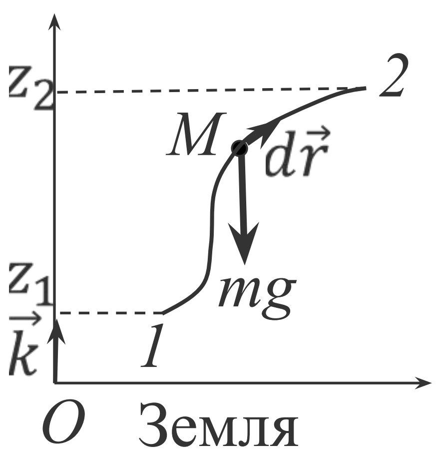


Элементарная работа $\delta A = \vec{F} d\vec{r} = \left(\frac{\alpha}{r^2}\right)\overrightarrow{e_r} \cdot d\vec{r}$, где $\overrightarrow{e_r} d\vec{r} = dr$, поэтому $\delta A = \alpha \frac{dr}{r^2} = -d\left(\frac{\alpha}{r}\right)$.

Таким образом полная работа на пути 1-2: $A_{12} = -\int_{r_1}^{r_2} d\left(\frac{\alpha}{r}\right) = \frac{\alpha}{r_1} - \frac{\alpha}{r_2}$, где справа стоит убыль потенциал. энергии; а значит $U(r) = \frac{\alpha}{r}$ - потенциальная энергия частицы M в поле сил тяготения (или кулоновских сил).

Потенциальные энергии упругих деформаций и тяготения

2. <u>Работа однородной силы тяжести</u> $\vec{F} = -mg\vec{k}$, где $\vec{k}$ – орт вертикальной оси z. Переместим частицу в поле данной силы по произвольному пути 1-2 и определим работу A_{12}.



Элементарная работа $\delta A = \vec{F} d\vec{r} = -mg\vec{k} \cdot d\vec{r}$, где $\vec{k} d\vec{r} = (dr)_k = dz$, поэтому $\delta A = -mgdz = -d(mgz)$.

Таким образом полная работа на пути 1-2: $A_{12} = -\int_{r_1}^{r_2} d(mgz) = mg(z_1 - z_2)$, где справа стоит убыль потенциал. энергии; а значит $U(r) = mgz$ - потенциальная энергия частицы, поднятой на высоту $h = z$ над Землей.

Вывод. Потенциальная энергия зависит только от положения частицы относительно других, взаимодействующих с ней, частиц (тел).

Связь между потенциальной энергией и силой

- Определим поле сил $\vec{F}(\vec{r})$ по заданной потенциальной энергии $U(\vec{r})$, как функцию положения частицы в поле. Известно, что работа консервативных сил по перемещению частицы в стационарном поле из т. 1 в т. 2 есть убыль потенциальной энергии частицы в данном поле, т.е. $A_{12} = U_1 - U_2 = -\Delta U$, где ΔU- приращение энергии частицы. Для элементарной работы: $\delta A = -dU$, где по определению $\delta A = \vec{F}d\vec{r}$. Таким образом, $\vec{F}d\vec{r} = -dU$, а переходя к проекциям $\vec{F}d\vec{r} = F_s ds$, получаем дифференциальную связь: $F_s ds = -dU$, или для силы поля: $$F_s = -\frac{\partial U}{\partial s}, \qquad (11)$$
 где $\frac{\partial}{\partial s}$ - частная производная по направлению (перемещения).
- Таким образом, <u>проекция силы поля $\vec{F}$ в данной точке на направление перемещения $d\vec{r}$ (или пути ds) равна взятой с обратным знаком производной от потенциальной энергии U по данному направлению</u>.

Связь между потенциальной энергией и силой

- Если с рассматриваемым силовым полем связать систему декартовых координат $\{x,\ y,\ z\}$, то искомый вектор можно представить: $\vec{F} = F_x\vec{i} + F_y\vec{j} + F_z\vec{k}$, где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - орты осей $\{x,\ y,\ z\}$. А взяв с обратными знаками частные производные функции $U(\vec{r}) = U(x, y, z)$ по координатам, найдем проекции силы, т.е. $F_x = -\frac{\partial U}{\partial x}$, $F_y = -\frac{\partial U}{\partial y}$, $F_z = -\frac{\partial U}{\partial z}$. Таким образом, получаем для силы выражение: $\vec{F} = -\left(\frac{\partial U}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial U}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial U}{\partial z}\vec{k}\right)$. (12)

  Величину, стоящую в скобках, называют градиентом скалярной функции U и обозначают кратко: $\overrightarrow{gradU}$ или $\nabla \cdot U$. Символический оператор-вектор («набла»): $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial}{\partial z}\vec{k}$ в декартовой системе координат.

- И так можно записать векторную связь:

$$\vec{F} = -\nabla U, \tag{13}$$

  т.е. сила поля $\vec{F}$ равна со знаком минус градиенту потенциальной энергии частицы в данной точке поля.

Закон сохранения энергии механической системы

Полная механическая энергия частицы

- Если частица находится в стационарном поле консервативных сил, то на нее действует сила этого поля $\overrightarrow{F_{п}}$ и кроме того, на нее могут действовать и другие, сторонние силы $\overrightarrow{F_{стор}}$, не имеющие отношение к данному полю. Сторонние силы могут быть как консервативными, так и неконсервативными. Таким образом, результирующая всех сил, действующих на частицу будет $\vec{F} = \overrightarrow{F_{п}} + \overrightarrow{F_{стор}}$, а работа этих сил, как известно, идет на приращение кинетической энергии частицы, т.е. $\Delta K = A_{п} + A_{стор}$, где $A_{п}$- работа сил поля, $A_{стор}$- работа сторонних сил.
- Работа сил поля равна убыли потенциальной энергии частицы, т.е. $A_{п} = -\Delta U$, а подставив последнее в выражение для ΔK, получаем $\Delta K = -\Delta U + A_{стор}$ или

$$\Delta(K + U) = A_{стор} \qquad (14)$$

Сумма $(K + U) = E$ – это полная механическая энергия частицы.

Закон сохранения энергии механической системы

Полная механическая энергия частицы

- Таким образом, приращение полной механической энергии частицы на некотором пути (1-2) равно алгебраической сумме работ всех сторонних сил, действующих на частицу на том же пути:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = A_{\text{стор}} \qquad (15)$$

- Отсюда следует закон сохранения механической энергии частицы: если сторонние силы отсутствуют или таковы, что не совершают работы в течение рассматриваемого времени, то полная механическая энергия частицы в стационарном поле консервативных сил остается постоянной за это время, т.е. $E = const$.

Закон сохранения энергии механической системы

- Теперь рассмотрим механическую систему частиц, взаимодействующих между собой, и находящуюся под воздействием внешних сил. Причем внешние силы можно разделить на: 1) силы со стороны внешнего заданного поля $\vec{F}_{\text{п}}^{\text{вн}}$, 2) внешние сторонние силы $\vec{F}_{\text{стор}}^{\text{вн}}$, не относящиеся к данному полю. А внутренние силы взаимодействия частиц подразделяются на: 1) внутренние консервативные силы $\vec{F}_{\text{кон}}^{\text{внут}}$ и 2) внутренние неконсервативные (или диссипативные) силы $\vec{F}_{\text{некон}}^{\text{внут}}$.
- Как известно, приращение кинетической энергии системы частиц равно работе, которую совершают все силы, действующие на все частицы системы, т.е.

$$\Delta K = A^{\text{вн}} + A^{\text{внут}} = A^{\text{вн}} + A_{\text{кон}}^{\text{внут}} + A_{\text{некон}}^{\text{внут}} \qquad (16)$$

При этом работа внутренних консервативных сил (это центральные силы взаимодействия частиц) равна убыли собственной потенциальной энергии системы, т.е. $A_{\text{кон}}^{\text{внут}} = -\Delta U_{\text{соб}}$, где $U_{\text{соб}} = \frac{1}{2}\sum_i U_i$ (U_i - потенц. энергия взаимодействия i-ой частицы со всеми остальными частицами системы).

Закон сохранения энергии механической системы

- Тогда уравнение (16) принимает вид:

$$\Delta K + \Delta U_{\text{соб}} = A^{\text{вн}} + A^{\text{внут}}_{\text{некон}} \text{или } \Delta(K + U_{\text{соб}}) = A^{\text{вн}} + A^{\text{внут}}_{\text{некон}} \quad (17)$$

- Введем понятие собственной механической энергии системы $E_{\text{соб}} = K + U_{\text{соб}}$, тогда выражение (17) можно записать как:

$$\Delta E_{\text{соб}} = A^{\text{вн}} + A^{\text{внут}}_{\text{некон}} \quad (18)$$

- Т.е. приращение собственной механической энергии системы равно алгебраической сумме работ всех внешних сил и всех внутренних неконсервативных сил.
- Из (18) следует закон сохранения собственной механической энергии системы: *механическая энергия замкнутой системы частиц, в которой нет неконсервативных (диссипативных) сил, сохраняется в процессе движения*, т.е. $E_{\text{соб}} = K + U_{\text{соб}} = \text{const}$.
- Такую механическую систему принято также называть консервативной системой. Если замкнутая система не консервативна, т.е. в ней есть диссипативные силы, то ее мех. энергия – убывает, так как всегда $A^{\text{внут}}_{\text{некон}} < 0$.

Закон сохранения энергии механической системы

- К неконсервативным (иначе диссипативным) силам относят силы трения и силы сопротивления, которые можно представить обобщенной зависимостью $\overrightarrow{F_{дис}} = -k\vec{v}$, где k – положительный коэффициент, зависящий от скорости, $\vec{v}$ - скорость одного тела относительно другого (или среды). Диссипативные силы действуют парно, причем $\overrightarrow{F_{1дис}} = -\overrightarrow{F_{2дис}}$.
- Элементарная работа пары диссипативных сил:

$\delta A_{дис} = \overrightarrow{F_{1дис}} \cdot \overrightarrow{v_1} dt + \overrightarrow{F_{2дис}} \cdot \overrightarrow{v_2} dt = \overrightarrow{F_{1дис}} (\overrightarrow{v_1} - \overrightarrow{v_2}) dt = - k\vec{v}\ \vec{v} dt = -kv^2 dt$, где $\vec{v} = \overrightarrow{v_1} - \overrightarrow{v_2}$ - относительная скорость. Т.е. работа произвольной пары диссипативных сил всегда отрицательна, а, следовательно, и суммарная работа всех пар диссипативных сил также отрицательна, ч.т.д.

Закон сохранения энергии механической системы

- Если работу всех внешних сил представить как алгебраическую сумму работ внешнего заданного поля сил и внешних сторонних сил: $A^{\text{вн}} = A_{\text{п}}^{\text{вн}} + A_{\text{стор}}^{\text{вн}}$, то в этом случае $A_{\text{п}}^{\text{вн}} = -\Delta U_{\text{вн}}$, т.е. есть убыль внешней потенциальной энергии.
- Тогда выражение для $A^{\text{вн}}$ можно записать как:
  $A^{\text{вн}} = -\Delta U_{\text{вн}} + A_{\text{стор}}^{\text{вн}}$ и, подставив последнее выражение в формулу для приращения собственной энергии системы, получаем

$$\Delta E_{\text{соб}} = -\Delta U_{\text{вн}} + A_{\text{стор}}^{\text{вн}} + A_{\text{некон}}^{\text{внут}}$$

$$\text{или } \Delta(E_{\text{соб}} + U_{\text{вн}}) = A_{\text{стор}}^{\text{вн}} + A_{\text{некон}}^{\text{внут}} \qquad (19)$$

- Величину $(E_{\text{соб}} + U_{\text{вн}}) = E$ – называют полной механической энергией системы частиц, находящейся во внешнем стационарном поле консервативных сил.
- Таким образом, приращение полной механической энергии системы определяется суммой работ внешних сторонних сил и внутренних диссипативных сил:

$$\Delta E = A_{\text{стор}}^{\text{вн}} + A_{\text{некон}}^{\text{внут}}. \qquad (20)$$

Закон сохранения энергии механической системы

- Из уравнения (20) следует закон сохранения полной механической энергии системы во внешнем стационарном поле консервативных сил:
- если на систему частиц не действуют внешние сторонние силы и нет внутренних диссипативных сил, то полная механическая энергия системы остается постоянной, т.е. $E = (E_{\text{соб}} + U_{\text{вн}}) = \text{const}$.