

Лекция 4

26 сентября 2026 года

кандидат физико-математических наук
ТЕРЕЩЕНКО ГЕОРГИЙ ВИКТОРОВИЧ
gvter@yandex.ru

2) Силы упругости возникают в результате взаимодействия тел, сопровождающегося их деформацией.

Упругая сила пропорциональна смещению частицы из положения равновесия и направлена к положению равновесия:

$$\vec{F} = -k\vec{r} ,$$

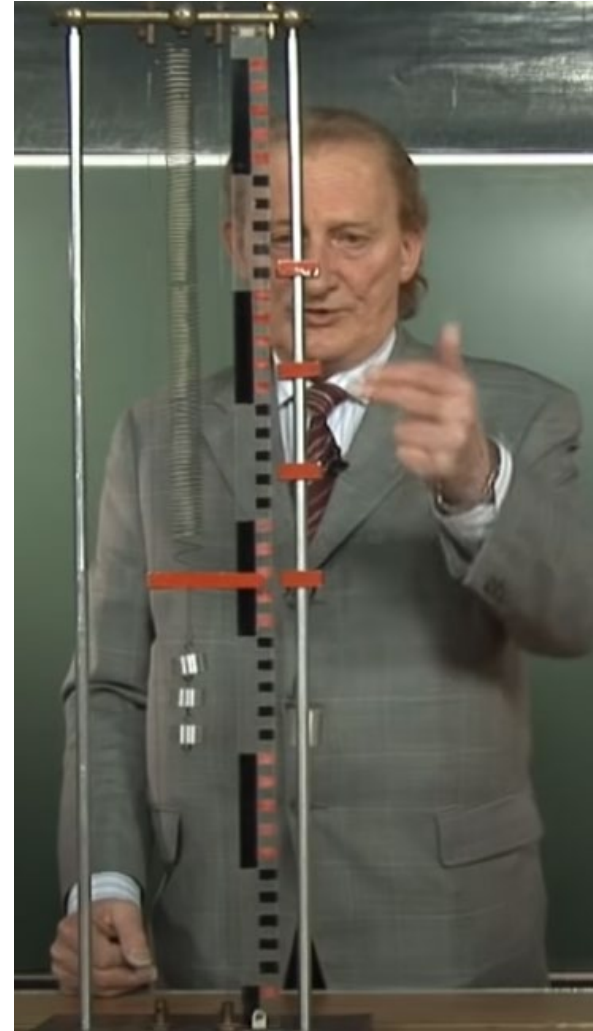
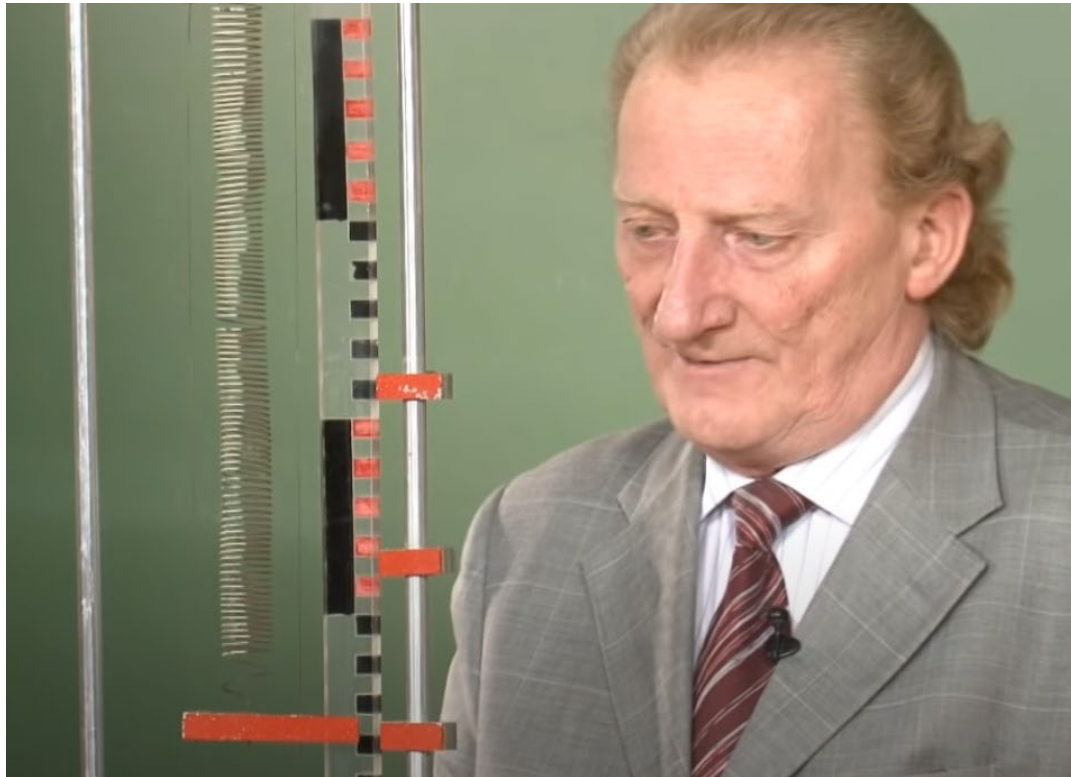
где $\vec{r}$ – радиус-вектор, характеризующий смещение частицы из положения равновесия, k – упругость. Примером такой силы является *сила упругости деформации пружины* при растяжении или сжатии:

$$F = -kx ,$$

где k – жёсткость пружины, x – упругая деформация.

<https://youtu.be/sYjyAujrtmw?si=pqy5kiIbINN4QHPh>

Закон Гука и нелинейные деформации.

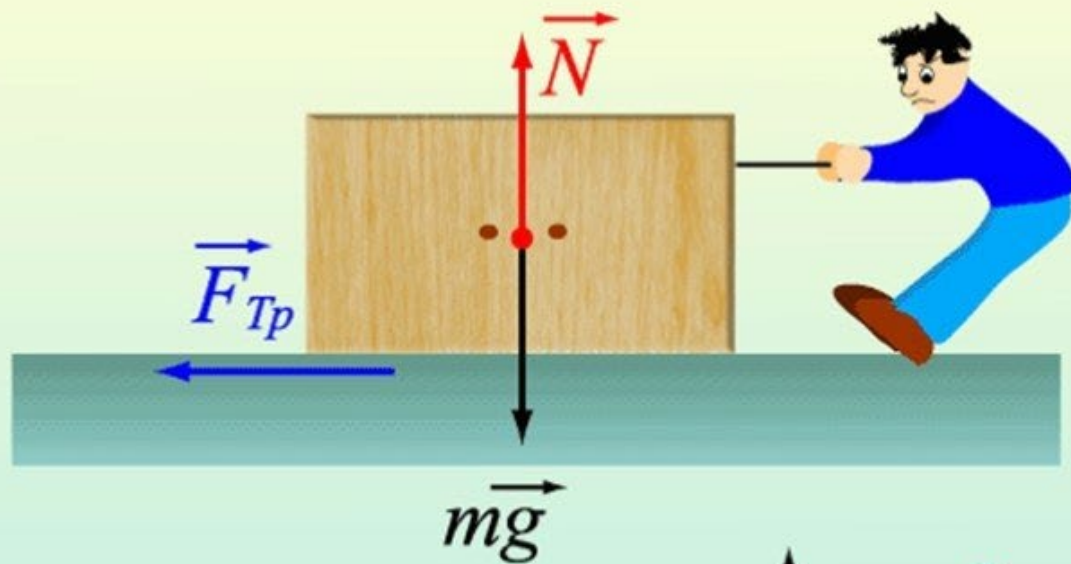


3) Сила трения скольжения возникает при скольжении данного тела по поверхности другого:

$$F_{\text{тр}} = kN ,$$

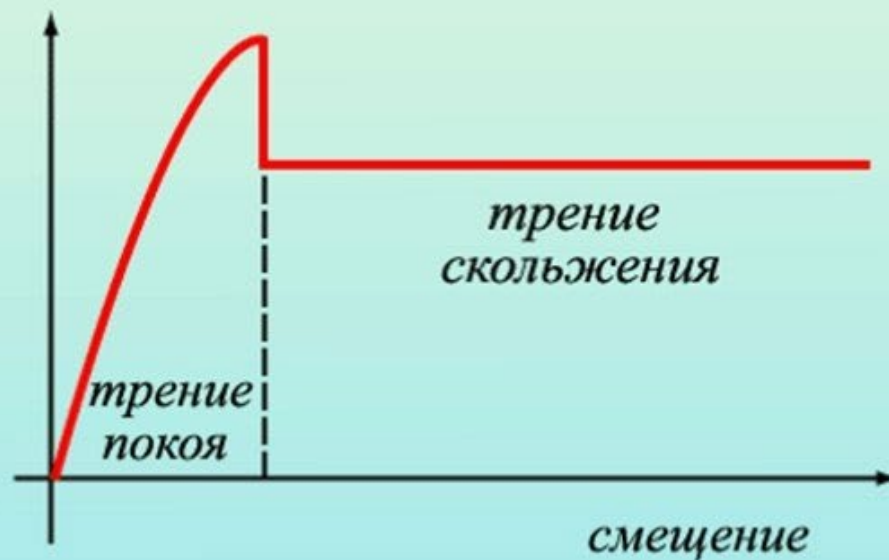
где k – коэффициент трения скольжения, зависящий от природы и состояния соприкасающихся поверхностей; N – сила нормального давления, прижимающая трущиеся поверхности друг к другу. Сила трения направлена по касательной к трущимся поверхностям в сторону, противоположную движению данного тела относительно другого.

Сила трения



Сила, возникающая
в плоскости
касания тел при их
относительном
перемещении

$$F_{тр} = \mu N$$

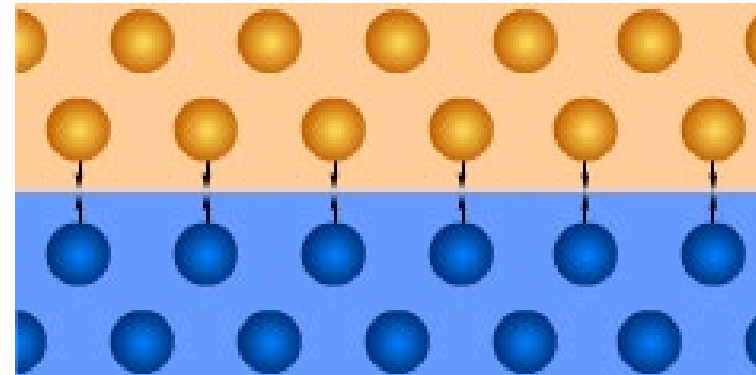


Причины трения

Шероховатость
поверхностей
соприкасающихся
тел



Взаимное притяжение
молекул
соприкасающихся
тел



Работа и энергия



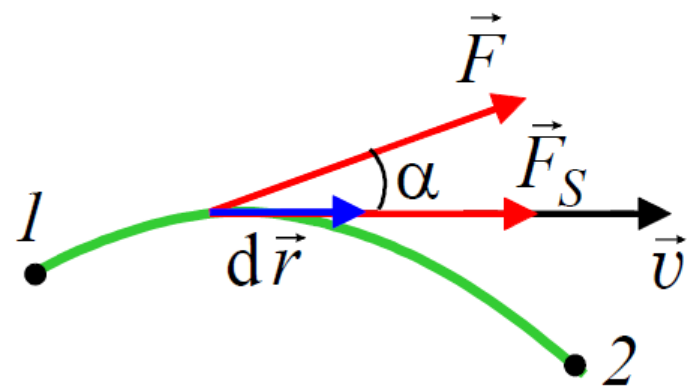
Работа, энергия, мощность

Энергия – это универсальная мера различных форм движения и взаимодействия. С различными формами движения материи связывают различные формы энергии: механическую, тепловую, электромагнитную, ядерную... Изменение механического движения тела вызывается силами, действующими на него со стороны других тел.

Работа силы – это количественная характеристика процесса обмена энергией между взаимодействующими телами.

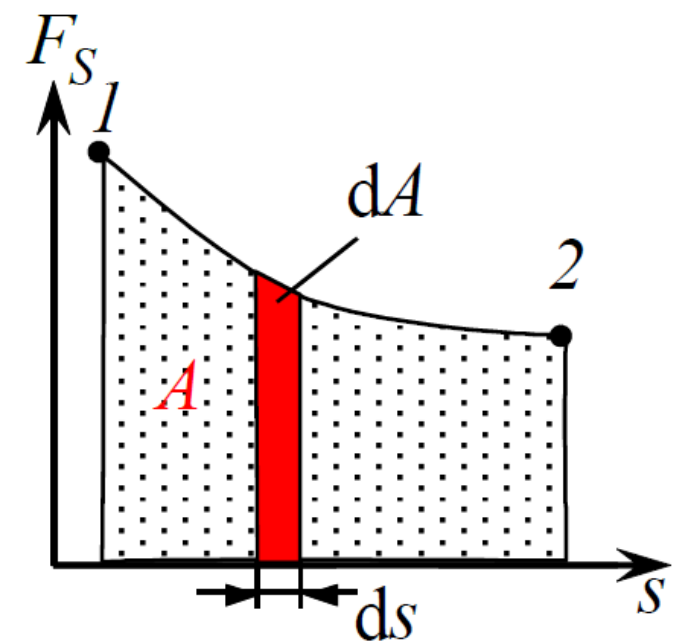
При *прямолинейном движении* тела под действием *постоянной* силы $\vec{F}$, которая составляет некоторый угол α с направлением перемещения, работа этой силы равна:

$$A = F_s s = F s \cos \alpha.$$



В общем случае сила может изменяться как по модулю, так и по направлению, поэтому этой формулой пользоваться нельзя. Однако на элементарном (бесконечно малом) перемещении $d\vec{r}$ можно ввести скалярную величину – **элементарную работу dA силы $\vec{F}$** :

$$dA = (\vec{F} \cdot d\vec{r}) = F \cos \alpha \cdot ds = F_s ds.$$



Тогда **работа силы на участке траектории** от точки 1 до точки 2 равна алгебраической сумме элементарных работ на отдельных бесконечно малых участках пути:

$$A = \int_1^2 F \, ds \cos \alpha = \int_1^2 F_s \, ds .$$

Если зависимость F_s от s представлена графически, то работа A определяется площадью заштрихованной фигуры (см. рисунок).

Консервативной (потенциальной) называют силу, работа которой определяется только начальным и конечным положениями тела и не зависит от формы пути. Консервативными силами являются силы тяготения, упругости. Все центральные силы консервативны. Примером **неконсервативных** сил являются силы трения.

Чтобы охарактеризовать скорость совершения работы, вводят понятие **мощности**. Мощность N равна скалярному произведению вектора силы на вектор скорости, с которой движется точка приложения этой силы.

$$N = \frac{dA}{dt} = \frac{\vec{F} d\vec{r}}{dt} = (\vec{F}, \vec{v})$$

Единица работы – джоуль (Дж) – работа совершаемая силой 1 Н на пути 1 м: $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Единица мощности – ватт (Вт): 1 Вт – мощность, при которой за время 1 с совершается работа 1 Дж: $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$.

Чтобы охарактеризовать *скорость совершения работы*, вводят понятие **мощности**. Мощность N равна скалярному произведению вектора силы на вектор скорости, с которой движется точка приложения этой силы.

$$N = \frac{dA}{dt} = \frac{\vec{F} d\vec{r}}{dt} = (\vec{F}, \vec{v})$$

Единица работы – джоуль (Дж) – работа совершаемая силой 1 Н на пути 1 м: $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Единица мощности – ватт (Вт): 1 Вт – мощность, при которой за время 1 с совершается работа 1 Дж: $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$.



Лошади́ная си́ла (русское обозначение: **л.с.**; английское: **hp**; немецкое: **PS**; французское: **CV**) — внесистемная единица **мощности**.

В мире существует несколько единиц измерения под названием «лошадиная сила». В России, если речь не идёт про автомобили, как правило, под лошадиной силой имеется в виду так называемая «**электрическая лошадиная сила**», равная точно 746 **ваттам**.

В настоящее время в России формально лошадиная сила выведена из употребления, однако до сих пор применяется для расчёта **транспортного налога** и **ОСАГО**, где применяется **налоговая лошадиная сила**, установленная равной 735,499 Вт^[1]. В России, как и во многих других странах, она всё ещё широко распространена в среде, где используются двигатели внутреннего сгорания (автомобили, мотоциклы, тракторная техника, мотокофы и триммеры). Как правило, под лошадиной силой имеется в виду так называемая «**метрическая лошадиная сила**», равная 735,49875 **ваттам**.

Кинетическая и потенциальная энергия механической системы

Кинетическая энергия механической системы (K) – это энергия механического движения этой системы.

Сила, действуя на покоящееся тело и вызывая его движение, совершает работу, а энергия движущегося тела возрастает на величину затраченной

работы. Таким образом, *приращение кинетической энергии частицы на элементарном перемещении равно элементарной работе на том же перемещении:*

$$dK = dA.$$

Тело массой m , движущееся со скоростью v , обладает кинетической энергией:

$$dA = \vec{F} d\vec{r} = m \frac{d\vec{v}}{dt} d\vec{r} = m\vec{v} d\vec{v} = mv dv = dK \Rightarrow K = \int_0^v mv dv = \frac{mv^2}{2}.$$

Кинетическая энергия зависит только от массы и скорости тела. Поэтому кинетическая энергия: (1) является функцией состояния системы; (2) всегда положительна; (3) неодинакова в разных инерциальных системах отсчёта.

Прилагательное «кинетический» происходит от греческого слова κίνησις (kinesis, «движение»).

Понятия «кинетическая энергия» и «работа» в их нынешнем научном значении восходят к середине XIX века. В 1829 году Гаспар-Гюстав Кориолис опубликовал статью Du Calcul de l'Effet des Machines, в которой излагалась математика того, что по сути является кинетической энергией. Создание и введение в оборот самого термина «кинетическая энергия» приписывают Уильяму Томсону (лорду Кельвину) с 1849—1851 гг. Ренкин, который ввел термин «потенциальная энергия» в 1853 году, позже цитировал У. Томсона и П. Тэйта с заменой слова «кинетическая» на «фактическая».

Потенциальная энергия (W) – это механическая энергия системы тел, определяемая их взаимным расположением и характером сил взаимодействия между ними.

Потенциальная энергия системы, подобно кинетической энергии, является функцией состояния системы. Она зависит *только от конфигурации системы* и её положения по отношению к внешним телам.

Примеры потенциальной энергии:

- 1) Потенциальная энергия тела массой m на высоте h : $W = mgh$.
- 2) Потенциальная энергия пружины, растянутой на длину x : $W = \frac{kx^2}{2}$.

Единица кинетической и потенциальной ***энергии*** – Джоуль (Дж).

Закон сохранения энергии

Полная механическая энергия системы – энергия механического движения и взаимодействия $E = K + W$ – равна сумме кинетической и потенциальной энергий.

Закон сохранения энергии: в системе тел, между которыми действуют только *консервативные силы*, полная механическая энергия сохраняется, т.е. не изменяется со временем:

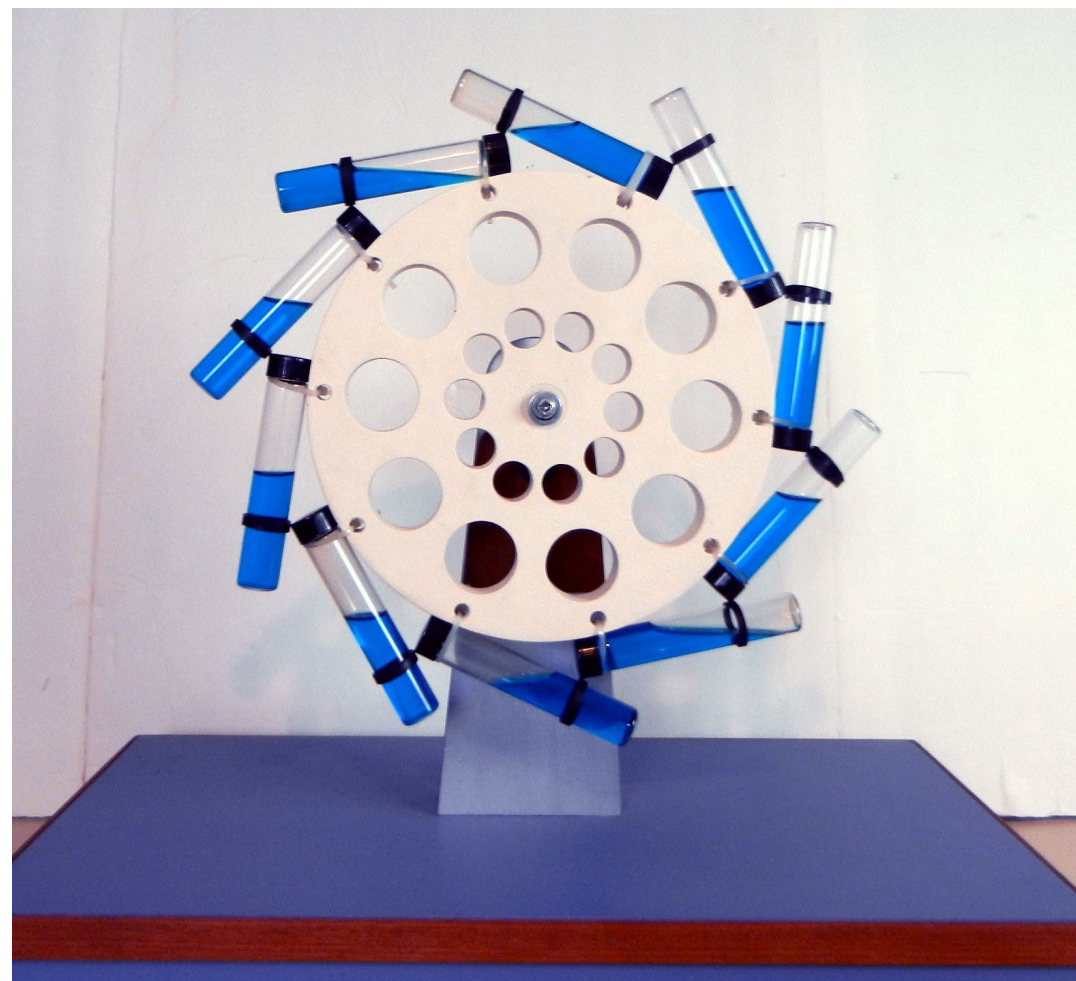
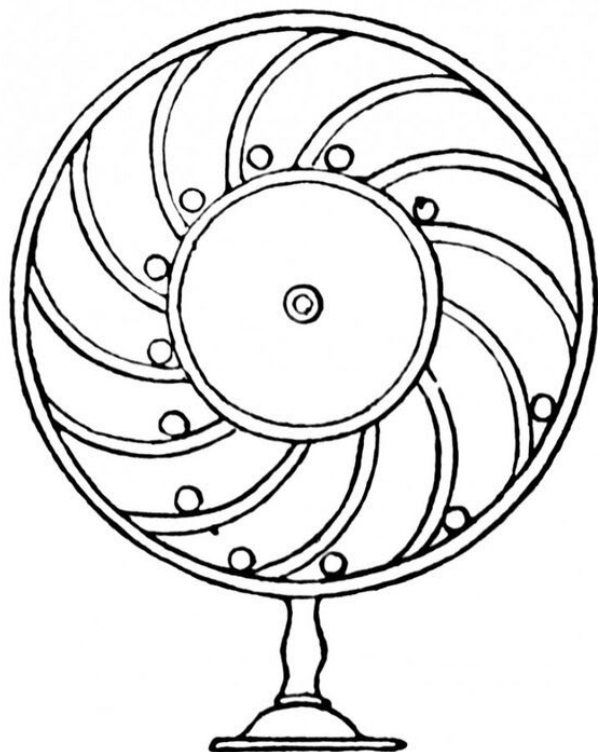
$$K + W = E = \text{const} .$$

Это – **фундаментальный** закон природы. Он является следствием однородности времени – инвариантности физических законов относительно выбора начала отсчёта времени.

Механические системы, на тела которых действуют только консервативные силы (внутренние и внешние), называются **консервативными системами**. В консервативных системах полная механическая энергия остаётся постоянной. Могут лишь происходить превращения кинетической энергии в потенциальную и обратно в эквивалентных количествах, так что полная энергия остаётся неизменной.

<https://youtu.be/RHUBGkRaoeE?si=378bml6453nCqbDW>

7 ВЕЧНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ



Диссипативные системы – системы, в которых механическая энергия постепенно уменьшается за счёт преобразования в другие (немеханические) формы энергии. В системе, в которой действуют также неконсервативные силы, например, силы трения, *полная механическая энергия системы не сохраняется*. Однако при "исчезновении" механической энергии всегда возникает эквивалентное количество энергии другого вида. Таким образом, **энергия никогда не исчезает и не появляется вновь, она лишь превращается из одного вида в другой**. В этом заключается *физическая сущность* закона сохранения и превращения энергии – сущность неуничтожимости материи и её движения.

Соударения

Удар (соударение) – это столкновение двух или более тел, при котором взаимодействие длится очень короткое время.

Центральный удар – это удар, при котором тела до удара движутся по прямой, проходящей через их центры масс.

Абсолютно упругий удар – столкновение двух тел, в результате которого в обоих взаимодействующих телах не остаётся никаких деформаций, и вся кинетическая энергия, которой обладали тела до удара, после удара снова превращается в кинетическую энергию. **Выполняются законы сохранения импульса и сохранения механической энергии.**

https://youtu.be/_0y_J5KqQA8?si=m-8heALhpZ1U2f2F



Обозначим скорости шаров с массами m_1 и m_2 до удара через $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$, после удара – через $\vec{v}'_1$ и $\vec{v}'_2$. Рассмотрим прямой центральный удар. Законы

сохранения: $m_1 v_1 + m_2 v_2 = m'_1 v'_1 + m_2 v'_2$, $\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v'^2_1}{2} + \frac{m_2 v'^2_2}{2}$.

Отсюда: $v'_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2 v_2}{m_1 + m_2}$, $v'_2 = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1 v_1}{m_1 + m_2}$.

<https://youtu.be/RWeF1r-Epbw?si=6csrRzt8z4xrCO6D>



Абсолютно неупругий удар – это столкновение двух тел, в результате которого тела объединяются, двигаясь дальше как единое тело.

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{v}, \quad \vec{v} = \frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2}. \quad \text{При } m_1 = m_2 \quad \vec{v} = \frac{\vec{v}_1 + \vec{v}_2}{2}.$$

Не выполняется закон сохранения механической энергии: вследствие деформации часть кинетической энергии переходит во внутреннюю энергию тел (разогрев). Это уменьшение равно:

$$\Delta K = \left(\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} \right) - \frac{(m_1 + m_2) v^2}{2} = \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} (v_1 - v_2)^2.$$

Если ударяемое тело было первоначально неподвижно ($v_2 = 0$), то:

$$v = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2}, \quad \Delta K = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \frac{m_1 v_1^2}{2}. \quad \text{Если } m_2 \gg m_1, \text{ то } v \ll v_1 \text{ и } \Delta K \approx K_1.$$