ЧАСТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ КОЛЛЕДЖ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

ЛЕКЦИЯ 2. ТЕМА 1. МЕХАНИКА

Механика — раздел физики, изучающий механическое движение тел и взаимодействие между ними. Под механическим движением понимают изменение взаимного положения тел в пространстве с течением времени. Классическая механика описывает движения со скоростями, много меньшими скорости света, и применима к макроскопическим объектам; её основания были сформулированы Г. Галилеем и И. Ньютоном.

1. Кинематика материальной точки

1.1. Механическое движение. Система отсчёта

Механическое движение относительно: говоря о движении тела, необходимо указывать тело отсчёта, относительно которого рассматривается перемещение. Тело отсчёта, связанная с ним система координат и прибор для отсчёта времени образуют **систему отсчёта**. Материальной точкой называется тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.

1.2. Перемещение и путь

Перемещение — вектор $\Delta \mathrm{r}\vec{}\Delta r$, соединяющий начальное положение точки с конечным. **Путь** — длина участка траектории, пройденного точкой за рассматриваемый промежуток времени. Путь — скалярная величина, неотрицательная; при криволинейном движении он превышает модуль перемещения и совпадает с ним только при прямолинейном движении без изменения направления.

1.3. Скорость. Равномерное прямолинейное движение

Мгновенная скорость определяется как предел отношения перемещения к промежутку времени, за которое оно совершено:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$$

Равномерное прямолинейное движение — движение, при котором тело за любые равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения; скорость постоянна по модулю и направлению. Уравнение движения вдоль оси Ox:

$$x = x_0 + v_x t$$

где x_0 — начальная координата, v_x — проекция скорости на ось.

1.4. Ускорение. Равнопеременное движение

Ускорение — величина, равная пределу отношения изменения скорости к промежутку времени, в течение которого оно произошло:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

Равнопеременным (равноускоренным) называется движение с постоянным по модулю и направлению ускорением. При таком движении:

$$v_x = v_{0x} + a_x t, \qquad x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$$

Полезное соотношение, не содержащее времени:

$$v_x^2 - v_{0x}^2 = 2a_x(x - x_0)$$

Средняя скорость при равнопеременном движении равна полусумме начальной и конечной скоростей: $\langle v \rangle = (v_0 + v)/2$.

1.5. Свободное падение

Свободным падением называется движение тела под действием только силы тяжести. Вблизи поверхности Земли (при пренебрежении сопротивлением воздуха) все тела падают с одинаковым ускорением $g \approx 9{,}8\ \text{м/с}^2$, направленным вертикально вниз. Числовое значение g зависит от географической широты и высоты над уровнем моря (на полюсе $g \approx 9{,}83\ \text{м/с}^2$, на экваторе $g \approx 9{,}78\ \text{м/с}^2$).

Свободное падение — частный случай равнопеременного движения, поэтому к нему применимы формулы п. 1.4 с заменой a на g.

1.6. Движение тела, брошенного под углом к горизонту

Пусть тело брошено со скоростью v_0 под углом α к горизонту. Движение раскладывается на два независимых: равномерное по горизонтали (сопротивление воздуха не учитывается) и равнопеременное по вертикали:

$$v_x = v_0 \cos\alpha, \qquad v_y = v_0 \sin\alpha - gt$$

Траектория — парабола. Основные характеристики:

- время подъёма на максимальную высоту: $t_1 = \dfrac{v_0 \sin\alpha}{g}$;
- максимальная высота подъёма: $H = \dfrac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g}$;
- полное время полёта: $t = \dfrac{2v_0 \sin\alpha}{g}$;
- дальность полёта: $L = \dfrac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$.

Дальность максимальна при $\alpha = 45^\circ$; при углах α и $90^\circ - \alpha$ дальность одинакова.

1.7. Равномерное движение по окружности

При движении точки по окружности с постоянной по модулю скоростью направление скорости непрерывно меняется, следовательно, движение ускоренное. Основные характеристики:

- период T — время одного полного оборота; частота $\nu = 1/T$;
- угловая скорость: $\omega = \dfrac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$;
- линейная и угловая скорости связаны соотношением $v = \omega R$.

Ускорение направлено к центру окружности и называется центростремительным:

$$a_c = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$$

2. Динамика: законы Ньютона

2.1. Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчёта

Существуют системы отсчёта, относительно которых свободные тела (не взаимодействующие с другими телами) сохраняют состояние покоя или равномерного прямолинейного движения — **инерциальные системы отсчёта** (ИСО). Первый закон Ньютона устанавливает существование ИСО и свойство тел, называемое инерцией. Системы отсчёта, движущиеся относительно ИСО с ускорением, неинерциальны.

Сила — мера взаимодействия тел, в результате которого тело изменяет свою скорость или деформируется; сила — векторная величина. **Масса** — скалярная физическая величина, являющаяся мерой инертности тела и мерой его гравитационного взаимодействия; аддитивна.

Импульс тела:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

2.2. Второй закон Ньютона

В инерциальной системе отсчёта ускорение тела пропорционально равнодействующей сил и обратно пропорционально его массе:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \cdots + \vec{F}_n}{m}$$

В наиболее общем виде основной закон классической динамики формулируется через импульс: скорость изменения импульса тела равна равнодействующей приложенных сил:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$$

Эта форма справедлива и при переменной массе (например, для ракеты).

2.3. Третий закон Ньютона

Тела действуют друг на друга силами, равными по модулю и противоположными по направлению, вдоль одной прямой:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Силы приложения и противодействия приложены к разным телам и не компенсируют друг друга; они всегда одной природы.

2.4. Закон всемирного тяготения. Гравитационное поле

Закон, открытый И. Ньютоном: тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}, \qquad G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$$

Здесь G — гравитационная постоянная. Закон справедлив для материальных точек и однородных сфер.

Гравитационное поле — поле тяготения, посредством которого осуществляется взаимодействие масс; напряжённость гравитационного поля $\vec{g} = \vec{F}/m$. У поверхности Земли:

$$g = G\frac{M_\oplus}{R_\oplus^2} \approx 9{,}8\ \text{м/с}^2$$

2.5. Сила тяжести. Вес

Сила тяжести — сила притяжения тела Землёй (небесным телом), $F_т = mg$. **Вес тела** — сила, с которой тело вследствие притяжения действует на опору или подвес. Вес равен силе тяжести только при покое или движении опоры с постоянной скоростью. При движении с вертикальным ускорением a вес $P = m(g \pm a)$; при $a = g$ (свободное падение) тело находится в состоянии **невесомости** — вес равен нулю, тогда как сила тяжести продолжает действовать.

2.6. Способы измерения массы тел

Массу измеряют двумя принципиально разными методами:

- **взвешивание** — сравнение сил (весов) с помощью рычажных или пружинных весов; пружинные весы измеряют именно вес, поэтому результат зависит от g;
- **инерционный метод** — измерение ускорения, сообщаемого телу известной силой: $m = F/a$; результат не зависит от гравитационных условий.

В Международной системе единиц килограмм с 2019 года определяется через фиксированное числовое значение постоянной Планка; эталонный способ его воспроизведения — ваттовые весы (метод Киббла) и кремниевые сферы.

2.7. Силы в механике

Помимо силы тяжести, в механике рассматриваются:

- **сила упругости** — возникает при деформации тела и по закону Гука пропорциональна удлинению: $F = -kx$, где k — жёсткость;
- **сила трения** — сопротивление относительному перемещению соприкасающихся тел; максимальная сила трения покоя и сила трения скольжения $F_{\text{тр}} = \mu N$, где μ — коэффициент трения, N — сила реакции опоры. Трение покоя изменяется от нуля до максимального значения;
- **сила сопротивления среды**, зависящая при малых скоростях от скорости (при больших — от её квадрата);
- **сила реакции опоры и натяжения нити** — силы упругой природы.

3. Законы сохранения в механике

3.1. Закон сохранения импульса

Совокупность взаимодействующих тел образует систему. Импульс системы равен сумме импульсов тел. Внутренние силы (силы взаимодействия между телами системы) не изменяют импульс системы в силу третьего закона Ньютона. Отсюда:

импульс замкнутой системы сохраняется:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \cdots + \vec{p}_n = \text{const}$$

Если система незамкнута, но внешние силы скомпенсированы или проекция их равнодействующей на данную ось равна нулю, сохраняется проекция импульса на эту ось. При больших силах и малых временах взаимодействия (удар, выстрел) закон сохранения импульса применим и к незамкнутым системам, поскольку импульс внешних сил за малый промежуток времени пренебрежимо мал.

3.2. Реактивное движение

Реактивное движение — движение тела, возникающее при отделении от него части его массы с некоторой скоростью. Ракета выбрасывает продукты сгорания назад и приобретает импульс в противоположном направлении; уравнение движения ракеты переменной массы (уравнение Мещерского) имеет вид:

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} + \vec{F}_r$$

где $\vec{F}_r$ — реактивная сила. При отсутствии внешних сил из закона сохранения импульса следует формула Циолковского, связывающая скорость ракеты с отношением масс. Реактивное движение используют ракеты, реактивные самолёты, кальмары и медузы в живой природе.

3.3. Работа силы. Мощность

Работа постоянной силы:

$$A = Fs\cos\alpha$$

где α — угол между силой и перемещением. При переменной силе работа равна площади под графиком $F_x(x)$ или вычисляется интегралом $A = \int \vec{F}\cdot d\vec{r}$. Единица работы — джоуль (1 Дж = 1 Н·м).

Мощность — быстрота совершения работы:

$$P = \frac{A}{t}, \qquad P = \vec{F}\cdot\vec{v}$$

Единица мощности — ватт (1 Вт = 1 Дж/с).

3.4. Кинетическая и потенциальная энергия. Консервативные силы

Кинетическая энергия — энергия движения:

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

Теорема о кинетической энергии: изменение кинетической энергии тела равно алгебраической сумме работ всех приложенных сил:

$$E_{k2} - E_{k1} = A_{\text{всех сил}}$$

Сила называется **потенциальной (консервативной)**, если её работа не зависит от формы траектории, а определяется начальным и конечным положениями тела (работа по замкнутому пути равна нулю). К потенциальным силам относятся сила тяжести и сила упругости; силы трения потенциальными не являются.

Потенциальная энергия — энергия взаимодействия, определяемая взаимным положением тел:

$$E_p = mgh \quad (\text{в поле тяжести, с произвольным нулём отсчёта}), \qquad E_p = \frac{kx^2}{2} \quad (\text{упругая деформация})$$

Работа потенциальной силы равна убыли потенциальной энергии: $A = E_{p1} - E_{p2}$.

3.5. Закон сохранения механической энергии

Полная механическая энергия — сумма кинетической и потенциальной энергий:

$$E = E_k + E_p$$

В замкнутой системе, между телами которой действуют только силы тяготения и упругости, полная механическая энергия сохраняется:

$$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$$

Если в системе действуют силы трения, механическая энергия убывает, переходя во внутреннюю энергию (в тепло); при этом сохраняется полная энергия — это проявление всеобщего закона сохранения и превращения энергии.

3.6. Применение законов сохранения

Законы сохранения — наиболее общие и мощные инструменты механики; во многих задачах они позволяют найти ответ без детального анализа сил. Типичные применения:

- **абсолютно неупругий удар**: тела соединяются и движутся вместе; сохраняется импульс, механическая энергия частично переходит во внутреннюю: $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{u}$;
- **абсолютно упругий удар**: сохраняются и импульс, и кинетическая энергия — так сталкиваются бильярдные шары, молекулы газа;
- **баллистические задачи**: высота и дальность броска находятся из законов сохранения энергии и разложения движения на составляющие;
- **реактивные задачи**: скорость отдачи при выстреле, движение ракеты;
- **маятник и падение тел**: скорость в нижней точке определяется из равенства $mgh = mv^2/2$.

Законы сохранения импульса и энергии справедливы не только в классической механике, но и в релятивистской физике и микромире, что делает их фундаментальными принципами всей физики.

Заключение

Механика строится на трёх законах Ньютона, описывающих связь сил и движения, и на законах сохранения импульса и энергии, которые выполняются независимо от деталей взаимодействия. Кинематика даёт математический аппарат описания движения (скорость, ускорение, траектории), динамика объясняет его причины, а законы сохранения связывают начальное и конечное состояния системы, минуя промежуточные этапы. Именно эта структура — от частных формул к общим принципам — делает классическую механику образцом фундаментальной физической теории.