

Свистунов А.Ю.

**Физика. Часть 1 «Механика»** Учебное пособие для иностранных студентов высших учебных заведений. – Харьков, ХНАДУ, 2016. - 44 с.

Пособие составлено в соответствии с учебной программой по физике для довузовской подготовки иностранных граждан в аккредитованных высших учебных заведениях Украины. Пособие состоит из трех частей: кинематика поступательного и вращательного движения, динамика поступательного движения, элементы статики. Для закрепления основных знаний и умений студентов включены упражнения, приведен русско-англо-французский словарь.

Предназначено для иностранных студентов подготовительных факультетов. Также, может быть использовано иностранными студентами, которые изучают физику на первых курсах вузов, для повторения, систематизации и обобщения ранее полученных знаний.

# МЕХАНИКА

## 1.1. Кинематика поступательного и вращательного движения

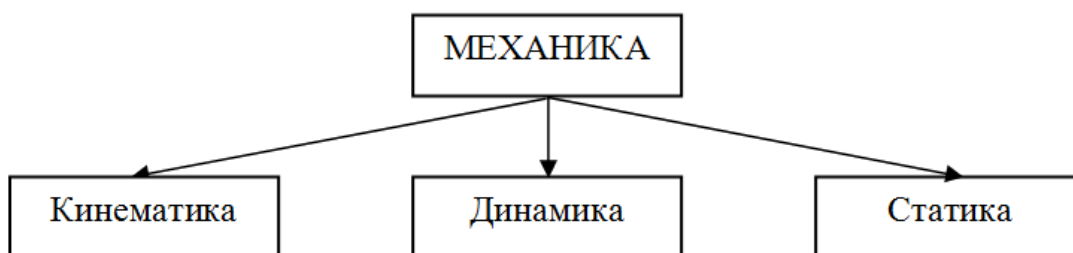
### 1.1.1. Предмет механики

**Механика** - это раздел физики, в котором изучаются закономерности механического движения и причины, которые вызывают или изменяют это движение. Механика делится на три раздела: кинематику, динамику и статику.

**Кинематика** изучает движение без учета причин, которые его вызывают.

**Динамика** изучает движение с учетом причин, которые его вызывают.

**Статика** - наука о равновесии.



Существует классическая, релятивистская и квантовая механика.

**Классическая механика** изучает движение макроскопических тел со скоростями, много меньшими скорости света в вакууме ( $v \ll c$ ,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с).

**Релятивистская механика** (или теория относительности) изучает движение тел со скоростями, соизмеримыми со скоростью света в вакууме.

**Квантовая механика** изучает движение микрочастиц (отдельные атомы, элементарные частицы).

### 1.1.2. Механическое движение. Модели в механике

Машина едет по дороге. Положение машины изменяется относительно дороги. Машина движется.

**Изменение положения одного тела относительно других тел с течением времени называется механическим движением.**

Человек сидит в машине. Положение человека изменяется относительно дороги. Человек движется относительно дороги.

Положение человека не изменяется относительно машины. Человек не движется относительно машины. Человек покоится относительно машины.

**Механическое движение является относительным. Покой является относительным.**

Для описания движения в механике используются *физические модели*. Простейшей моделью в механике является материальная точка.

**Тело, размерами и формой которого можно пренебречь в данной задаче, называется материальной точкой.**

На рисунке а) видно, что расстояния  $l_1$  и  $l_2$  между разными точками тел А и В сильно отличаются друг от друга ( $l_1 \neq l_2$ ). На рисунке б) видно, что расстояния  $d_1$  и  $d_2$  между разными точками тел С и D почти не отличаются друг от друга (приблизительно одинаковы  $d_1 \approx d_2$ ).

Когда расстояние между телами много больше размеров этих тел, тоже не нужно определять положение всех точек тела. В этом случае размерами и формой тел можно пренебречь и считать эти тела точками, которые имеют массу.

Машина едет из Харькова в Киев. Размеры машины много меньше расстояния между городами. Размеры и форму машины можно не учитывать в данной задаче. Машину в данной задаче можно считать материальной точкой.

Машина находится на заправке. Машину в данной задаче нельзя считать материальной точкой.

При вычислении траектории, по которой Земля движется вокруг Солнца, Землю можно рассматривать как материальную точку, так как ее радиус в 24000 раз меньше радиуса ее орбиты. Если тела движутся по поверхности Земли, то, она должна рассматриваться как протяженный объект.

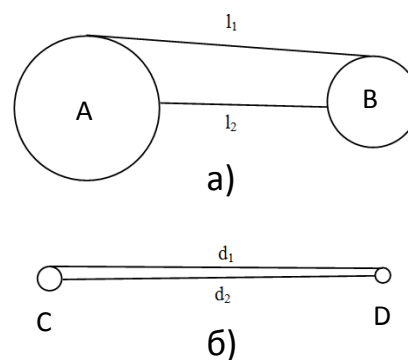
Материальная точка – модель, которую используют в физике для облегчения решения многих задач.

Любое тело можно рассматривать как совокупность материальных точек.

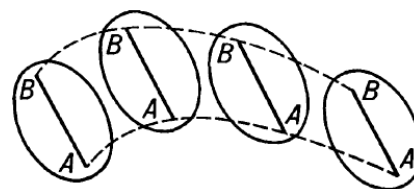
Тело может двигаться поступательно и вращательно.

### ***Поступательное движение.***

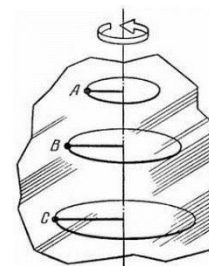
На рисунке видно, что любая прямая линия, проведенная внутри тела, которое движется поступательно остаётся параллельной сама себе.



Когда тело движется поступательно, положение всех его точек изменяется одинаково. Траектория движения всех точек тела одинакова. Поэтому при изучении поступательного движения рассматривают движение только одной точки тела.



**Вращательное движение** – движение, при котором все точки тела движутся по окружностям. Траектория движения каждой точки тела – окружность. Центры этих окружностей лежат на одной и той же прямой, которая называется осью вращения.



Разные точки тела могут двигаться по разным окружностям. Ось вращения может находиться и внутри и снаружи тела.

### 1.1.3. Определение положения точки в пространстве. Траектория. Путь. Перемещение

Для определения положения точки в пространстве в любой момент времени используют систему отсчета.

**Система отсчета** состоит из тела отсчета (материальная точка O, которая находится в начале координат), системы координат – координатных осей OX, OY, OZ и часов – прибора для измерения времени.

Положение точки в пространстве можно описать двумя способами:

- 1) векторным, т. е. задать радиус-вектор  $\vec{r}$ . **Радиус-вектором** называется вектор, проведенный из начала координат в данную точку;
- 2) координатным - задать три координаты - x, y, z (рис. 1.1).

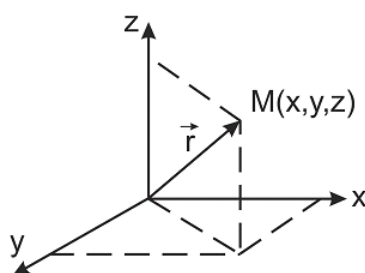


Рис.1.1

Модуль радиус-вектора вычисляется по теореме Пифагора

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} . \quad (1.1)$$

При перемещении точки в пространстве она описывает некоторую кривую, называемую **траекторией** материальной точки.

На рисунке показаны различные виды движения материальной точки.

Пусть при движении материальная точка описывает прямую линию (рис.а). Тогда траекторией данного движения является **прямая линия**. Такое движение называется **прямолинейным движением**.

Пусть при движении материальная точка описывает кривую линию (рис. б). Тогда траекторией данного движения является **кривая линия**. Такое движение называется **криволинейным движением**.

Траектория может быть прямой линией или кривой линией.

Движение может быть прямолинейным (траектория – прямая) или криволинейным (траектория – кривая).

Частный случай кривой линии – **окружность**.

Пусть при движении материальная точка описывает окружность (рис.в). Тогда траектория движения тела – окружность. Такое движение называется **движением по окружности**.

Расстояние, отсчитанное вдоль траектории, представляет собой длину пути  $\Delta S$  (рис. 1.2) или просто пройденный путь.

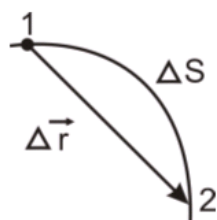
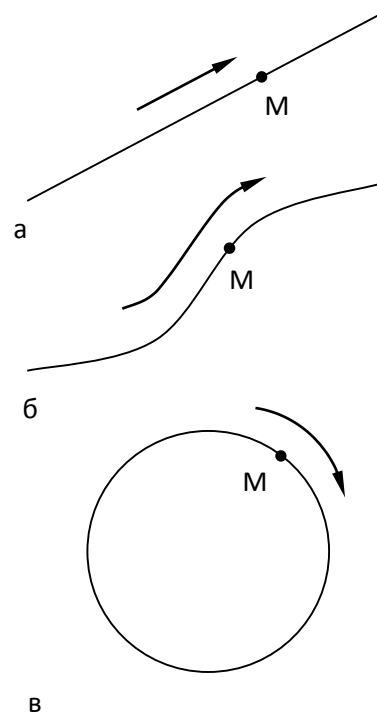


Рис.1.2

Перемещением называется вектор  $\Delta \vec{r}$ , соединяющий начальное и конечное положение материальной точки (рис. 1.2). Вектор перемещения показывает откуда и куда переместилась точка.

### Вопросы для самоконтроля:

1. Что такое механическое движение?
2. Как вы понимаете, что механическое движение и покой относительны? Приведите примеры.
3. Что такое Механика?
4. Сформулируйте основную задачу механики.
5. Из каких частей состоит механика?
6. Что такое материальная точка?
7. Может ли Земля быть материальной точкой? Если «Да», то в каких случаях. Если «Нет», то почему?
8. Что такое поступательное и вращательное движение?
9. Что значит определить положение тела в пространстве?

### Кинематические характеристики движения

Перемещение  $\Delta\vec{r}$ , скорость  $\vec{v}$ , ускорение  $\vec{a}$  являются кинематическими характеристиками движения материальной точки, а также кинематическими характеристиками поступательного движения.

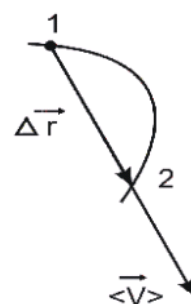
#### 1.1.4. Скорость

Скорость характеризует направление и быстроту перемещения точки или тела в пространстве.

*Средней скоростью* называется отношение перемещения к промежутку времени, за которое это перемещение произошло

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}. \quad (1.2)$$

Средняя скорость направлена так же, как вектор перемещения  $(\langle \vec{v} \rangle \uparrow \uparrow \Delta\vec{r})$  (рис. 1.3).



Модуль средней скорости равен

Рис.1.3

$$\langle v \rangle = |\langle \vec{v} \rangle| = \frac{|\Delta\vec{r}|}{\Delta t}$$

**Скоростью (или мгновенной скоростью) материальной точки называется предел отношения ее перемещения к промежутку времени, за которое это перемещение произошло, при бесконечном убывании промежутка времени, т. е.**

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \langle \vec{v} \rangle. \quad (1.3)$$

В математике такой предел называется производной. **Скорость** равна производной от радиус-вектора по времени

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}. \quad (1.4)$$

**Скорость направлена по касательной к траектории**, так как при  $\Delta t \rightarrow 0$   $\Delta \vec{r}$  сливается с касательной (рис. 1.4).

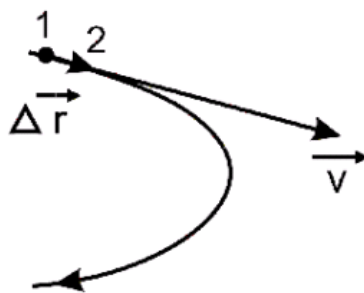


Рис.1.4

При  $\Delta t \rightarrow 0$   $|\Delta \vec{r}| = \Delta S$ , поэтому  $|\vec{v}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t}$ .

**Модуль скорости равен производной от пути по времени:**

$$v = |\vec{v}| = \frac{dS}{dt}. \quad (1.5)$$

### 1.1.5. Ускорение. Нормальное и тангенциальное ускорение

Ускорение характеризует быстроту изменения скорости. **Среднее ускорение** вычисляется как отношение изменения скорости к промежутку времени, за которое это изменение произошло

$$\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}. \quad (1.6)$$

**Мгновенным ускорением** (или просто ускорением) называется предел отношения изменения скорости к промежутку времени при бесконечном убывании промежутка времени

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \langle \vec{a} \rangle. \quad (1.7)$$

Иначе, ускорение равно производной от скорости по времени

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (1.8)$$

Ускорение может быть направлено под любым углом к скорости (рис. 1.5).

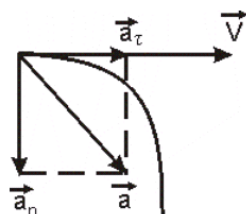


Рис.1.5

Ускорение может быть разложено на две взаимно перпендикулярные составляющие: нормальное  $\vec{a}_n$  и тангенциальное  $\vec{a}_\tau$ .

**Нормальное ускорение** характеризует изменение скорости по направлению. Оно перпендикулярно к скорости  $(\vec{a}_n \perp \vec{v})$  (см. рис. 1.5). Модуль нормального ускорения вычисляется как

$$a_n = \frac{v^2}{R}, \quad (1.9)$$

где  $R$  - радиус кривизны траектории.

**Тангенциальное ускорение** определяет быстроту изменения скорости по величине (т. е. по модулю). Оно параллельно скорости  $(\vec{a}_\tau \uparrow \vec{v})$ , если движение ускоренное, и противоположно скорости  $(\vec{a}_\tau \downarrow \vec{v})$ , если движение замедленное.

Модуль тангенциального ускорения вычисляется как производная от модуля скорости по времени



$$a_{\tau} = \frac{dv}{dt}. \quad (1.10)$$

Модуль полного ускорения вычисляется по теореме Пифагора

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_{\tau}^2}. \quad (1.11)$$

В зависимости от значений  $\vec{a}_n$  и  $\vec{a}_{\tau}$  движение классифицируется по траектории и ускорению. Например, при  $a_n = 0$  и  $a_{\tau} = 0$  - это равномерное прямолинейное движение, при  $a_{\tau} > 0, a_n \neq 0$  - это ускоренное криволинейное движение.

### 1.1.6. Скорость и путь при поступательном движении

Приведем формулы вычисления длины пути и скорости при равномерном и равнопеременном движении.

1. **Равномерным движением** называется движение, при котором скорость по модулю не изменяется.

При равномерном движении

$$a = 0, \quad v = const, \quad S = v \cdot t.$$

2. **Равнопеременное движение.** Прямолинейным равнопеременным движением называется такое неравномерное движение, при котором мгновенное ускорение – постоянная величина  $\vec{a} = const$ .

В случае прямолинейного равнопеременного движения вектор ускорения не изменяется ни по направлению, ни по модулю.

**Равнопеременное движение, при котором скорость материальной точки увеличивается по модулю, называется равноускоренным.**

В этом случае говорят, что тело ускоряется (набирает скорость, разгоняется).

**Равнопеременное движение, при котором скорость материальной точки уменьшается по модулю, называется равнозамедленным.**

В этом случае говорят, что тело замедляется (теряет скорость, тормозит, останавливается).

## Математическое представление равнопеременного движения

Пусть в момент времени  $t_0 = 0$  скорость материальной точки была равна  $\vec{v}_0$ . В момент времени  $t$  скорость стала  $\vec{v}$ . Ускорение  $\vec{a}$  при равнопеременном движении равно:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$$

Отсюда получим уравнение зависимости скорости от времени для прямолинейного равнопеременного движения:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$$

Запишем это выражение в проекциях на координатную ось:

$$\boxed{v_x = v_{0x} + a_x t} \quad (**)$$

Для удобства представления и изучения механического движения, используют графики зависимости пути от времени, координаты от времени, скорости от времени, ускорения от времени.

**Графики** – это линии, которые показывают, как физические величины зависят от времени. Графики дают возможность увидеть и понять, как изменяется физическая величина со временем.

Рассмотрим графики зависимости проекции скорости от времени  $v_x(t)$  для различных равнопеременных движений (Рис. 1.6).

Графики (1) и (2) соответствуют равноускоренному равнопеременному движению. На этих графиках модули скоростей тел увеличиваются.

График (3) соответствует равнозамедленному равнопеременному движению. На этом графике модуль скорости тела уменьшается.

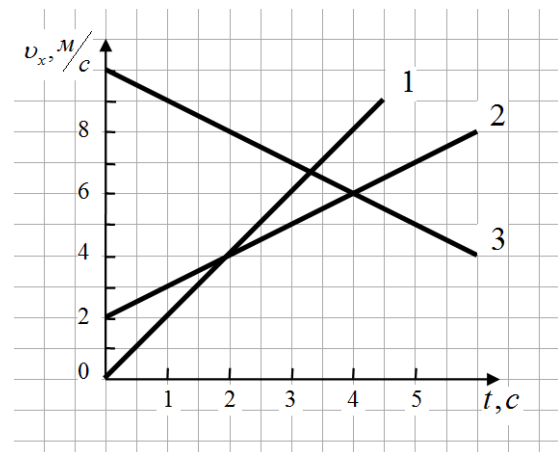


Рис. 1.6.

Из графика (1) видно, что начальная скорость тела равна нулю  $v_{0x} = 0$ . Это тело движется без начальной скорости.

Из графиков (2) и (3) видно, что начальная скорость этих тел не равна нулю  $v_{0x} \neq 0$ . Эти тела движутся с начальной скоростью.

**Пример 1.** Для примера рассмотрим график (2). Начальная скорость движения тела  $v_{0x}$  в начальный момент времени  $t_0 = 0$  равна  $2 \text{ м/с}$ . Так как скорость тела увеличивается, движение равноускоренное. Найдём ускорение, с которым движется тело. Для этого выберем произвольный промежуток времени, в течение которого двигалось тело. Пусть  $\Delta t = 4 \text{ с}$ . За  $4 \text{ с}$  скорость тела изменилась на значение  $\Delta v_x = v_x - v_{0x}$ :

$$\Delta v_x = 6 \text{ м/с} - 2 \text{ м/с} = 4 \text{ м/с};$$

тогда ускорение данного равноускоренного движения равно:

$$a_x = \frac{4 \text{ м/с}}{4 \text{ с}} = 1 \text{ м/с}^2.$$

Подставим значения  $v_{0x}$  и  $a_x$  в формулу (\*\*). Запишем для этого случая уравнение зависимости проекции скорости от времени  $v_x(t)$ :

$$v_x(t) = 2 + t.$$

**Пример 2.** Теперь рассмотрим график (3). Начальная скорость движения тела  $v_{0x}$  в начальный момент времени  $t_0 = 0$  равна  $10 \text{ м/с}$ . Найдём ускорение, с которым движется тело. Для этого выберем произвольный промежуток времени, в течение которого двигалось тело. Пусть  $\Delta t = 5 \text{ с}$ . Так как модуль скорости тела уменьшается в течение этого времени, то это равнозамедленное движение.

За  $\Delta t = 5 \text{ с}$  скорость тела изменилась на значение  $\Delta v_x = v_x - v_{0x}$ :

$$\Delta v_x = 5 \text{ м/с} - 10 \text{ м/с} = -5 \text{ м/с};$$

тогда ускорение данного равноускоренного движения равно:

$$a_x = \frac{-5 \text{ м/с}}{5 \text{ с}} = -1 \text{ м/с}^2$$

Знак "–" перед значением проекции ускорения  $a_x$  показывает, что ускорение тела  $\vec{a}$  направлено в сторону, противоположную выбранному положительному направлению движения. **За положительное направление прямолинейного движения принимают направление оси ОХ.** В этом случае направление вектора ускорения не совпадает с направлением оси ОХ.

Другими словами, если направление ускорения совпадает с направлением оси ОХ, то проекция ускорения на ось ОХ положительна  $a_x > 0$ . Если ускорение

тела направлено противоположно оси ОХ, то проекция ускорения на ось ОХ отрицательна  $a_x < 0$ .

Подставим значения  $v_{0x}$  и  $a_x$  в формулу (\*\*). Запишем для этого случая уравнение зависимости проекции скорости от времени  $v_x(t)$ . Для этого случая уравнение зависимости проекции скорости от времени  $v_x(t)$  будет иметь вид:

$$v_x(t) = 10 - t.$$

Пользуясь этим уравнением, определим проекцию скорости тела (3) (рис.) через 15 секунд:

$$v_x = 10 - 1 \cdot 15 = -5 \text{ м/с}.$$

Знак "–" перед значением проекции скорости  $v_x$  ( $v_x < 0$ ) показывает, что скорость тела  $\vec{v}$  направлена в сторону, противоположную выбранному положительному направлению движения. В этом случае направление вектора скорости не совпадает с направлением оси ОХ.

Если  $v_x > 0$  (перед значением проекции скорости  $v_x$  стоит знак "+"), то это значит, что скорость тела  $\vec{v}$  направлена в ту же сторону, что и выбранное положительное направление движения. В этом случае направление вектора скорости совпадает с направлением оси ОХ.

Другими словами, если направление скорости тела совпадает с направлением оси ОХ, то проекция скорости на ось ОХ положительна  $v_x > 0$ . Если скорость тела направлена противоположно оси ОХ, то проекция скорости на ось ОХ отрицательна  $v_x < 0$ .

Частным случаем равнопеременного движения является свободное падение тела.

**Свободным падением** называется движение тел, которое происходит под действием притяжения Земли в безвоздушном пространстве (в вакууме).

При свободном падении с небольшой высоты  $h$  от поверхности Земли ( $h \ll R_3$  где  $R_3$  – радиус Земли) все тела движутся с постоянным ускорением  $\vec{g}$ , направленным по вертикали (по радиусу Земли) вниз (Рис. 1.7). Ускорение  $\vec{g}$  называется *ускорением свободного падения*. Оно зависит от высоты над

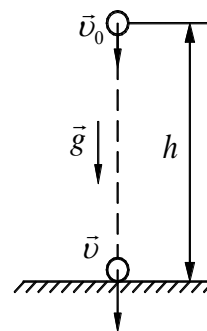


Рис. 1.7.

уровнем моря и от географической широты. Для вычислений используется среднее значение ускорения  $g = 9,8 \text{ м/с}^2 (\Rightarrow \approx 10 \text{ м/с}^2)$ .

Для нахождения характеристик этого движения используется система уравнений для равнопеременного движения. Для более удобного применения этих формул ускорение  $|\vec{a}|$  заменено на  $|\vec{g}|$ , путь  $s$  на  $h$ :

$$v = v_0 \pm gt$$

$$h = v_0 t \pm \frac{gt^2}{2}$$

$$v^2 - v_0^2 = \pm 2gh$$

### Задачи

1. Мяч упал с высоты 3 м, а затем отскочил от пола и поднялся на высоту 1 м. Во сколько раз путь пройденный мячом больше модуля перемещения?  $\left(\eta = \frac{S}{\Delta r}\right)$

2. Движущийся равномерно автомобиль сделал разворот и описал половину дуги окружности. Во сколько раз путь, который проехал автомобиль, больше модуля его перемещения?  $\left(\eta = \frac{S}{\Delta r}\right)$

3. Велогонщик за первые два часа проехал 90 км, а следующие полчаса он двигался со скоростью 54 км/ч. Какова средняя путевая скорость?

4. Грузовик проехал первую половину пути со средней скоростью  $\langle v_1 \rangle = 72$  км/ч, а вторую – со средней скоростью  $\langle v_2 \rangle = 36$  км/ч. Определить среднюю путевую скорость.

5. Первую четверть пути поезд проехал со скоростью 25 м/с. Средняя путевая скорость оказалась равной 20 м/с. С какой скоростью поезд проехал оставшуюся часть пути?

6. Сколько времени затратил гоночный автомобиль на преодоление прямолинейного участка пути  $S=1,8$  км со скоростью 270 км/ч?

7. Парашютист спускается на Землю со скоростью 4 м/с при спокойном состоянии воздуха. С какой скоростью он будет двигаться при горизонтальном ветре, скорость которого 3 м/с?

8. Какую скорость должен сообщить мотор катеру, чтобы при скорости течения реки 1,2 м/с, катер двигался перпендикулярно к берегу реки со скоростью 3,2 м/с?

9. Рыбак переплывает на лодке реку шириной 300 м. Скорость течения реки 1,2 м/с; скорость, сообщаемая лодке рыбаком, 1,6 м/с. На какое расстояние относит лодку вниз по течению? Какой путь пройдет лодка?

10. За какое время скорость автомобиля при равноускоренном движении увеличилась с 5м/с до 20м/с, если он при этом прошел расстояние 200м?

11. Поезд, который имел скорость 10м/с, стал двигаться равноускоренно с ускорением 0,15м/с<sup>2</sup>. Какой он достиг скорости, пройдя таким образом один километр пути?

12. Тело брошено вертикально вверх со скоростью 30 м/с. На какой высоте и через сколько времени скорость тела будет в 3 раза меньше, чем в начале подъема? Сопротивление воздуха не учитывать.

13. Стрела, выпущенная из лука вертикально вверх, упала на Землю через 6с. Какова начальная скорость стрелы и максимальная высота подъема. Сопротивлением воздуха пренебречь.

14. Пловец, который спрыгнул с пятиметровой вышки, погрузился в воду на глубину 2м. Сколько времени и с каким ускорением происходило погружение. Сопротивлением воздуха пренебречь.

### 1.1.7. Кинематические характеристики вращательного движения. Угловая скорость и угловое ускорение

При вращательном движении все точки тела описывают окружности, при этом радиус-векторы поворачиваются на угол  $\Delta\varphi$  за время  $\Delta t$ . Для того, чтобы указать, в какую сторону совершается поворот, элементарные повороты изображают в виде вектора  $d\vec{\varphi}$ . По модулю  $|d\vec{\varphi}|$  равен величине угла поворота, а направление подчиняется правилу правого винта (рис. 1.8). Быстроту вращения характеризует угловая скорость  $\vec{\omega}$ .

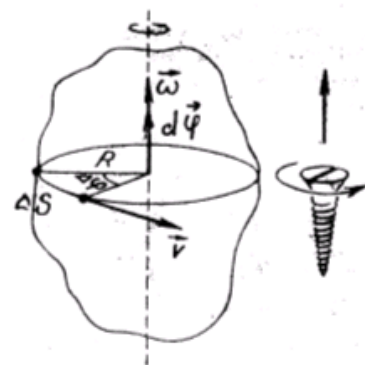


Рис.1.8

**Угловой скоростью** называется производная от угла поворота по времени. Модуль угловой скорости равен

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt}. \quad (1.12)$$

Вектор угловой скорости направлен вдоль оси вращения по правилу правого винта (рис. 1.6). При равномерном вращении угловая скорость  $\omega$  связана с периодом обращения  $T$  и частотой вращения  $\nu$  следующим образом

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \quad (1.13)$$

Модуль угловой скорости выражается в радианах в секунду (рад/с). Быстрота изменения угловой скорости характеризуется угловым ускорением  $\varepsilon^{\uparrow}$ .

**Угловым ускорением** называется производная от угловой скорости по времени. Модуль углового ускорения равен

$$\varepsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.14)$$

При вращении тела вокруг неподвижной оси угловое ускорение  $\vec{\varepsilon}^{\uparrow}$  также как и угловая скорость  $\vec{\omega}$  направлено вдоль оси вращения. При ускоренном движении эти вектора сонаправлены ( $\vec{\varepsilon}^{\uparrow} \uparrow \vec{\omega}$ ), при замедленном - противоположны ( $\vec{\varepsilon}^{\uparrow} \downarrow \vec{\omega}$ ). Угловое ускорение измеряется в рад/с<sup>2</sup>.

При равномерном вращении

$$\varepsilon = 0, \quad \omega = \text{const}, \quad \varphi = \omega t.$$

При равнопеременном вращении

$$\varepsilon = \text{const}, \quad \omega = \omega_0 \pm \varepsilon t, \quad \varphi = \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2},$$

Где  $\omega_0$  - начальная угловая скорость. Знак "+" - при равноускоренном движении. Знак "-" - при равнозамедленном движении.

### 1.1.8. Связь между линейной и угловой скоростью, линейным и угловым ускорением

При вращении твердого тела вокруг неподвижной оси линейные скорости  $\vec{v}$  и линейные (тангенциальные) ускорения  $\vec{a}_\tau$  для различных его точек будут различны. Угловая скорость  $\vec{\omega}$  и угловое ускорение  $\vec{\varepsilon}$  будут одинаковыми для всех точек вращающегося тела.

Для того чтобы найти связь между модулями линейной и угловой скорости нужно использовать известное в геометрии соотношение между центральным углом  $\Delta \varphi$  и дугой, на которую он опирается (рис. 1.8)

$$\Delta S = R \cdot \Delta \varphi .$$

Отсюда:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = R \cdot \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} .$$

Используя формулы (1.5) и (1.12), получим

$$v = \omega \cdot R . \quad (1.15)$$

Формула (1.15) показывает, что линейная скорость равна угловой, умноженной на радиус.

Чтобы найти связь между модулями линейного (тангенциального) и углового ускорений, продифференцируем формулу (1.15)

$$\frac{dv}{dt} = \frac{d\omega}{dt} \cdot R .$$

Воспользуемся формулами (1.10) и (1.14) и получим

$$a_{\tau} = \varepsilon \cdot R . \quad (1.16)$$

Из формулы (1.16) следует, что линейное (тангенциальное) ускорение равно угловому, умноженному на радиус.

### Вопросы для самоконтроля:

1. На какие разделы делится механика?
2. Какие простейшие модели используются в механике?
3. Что называется поступательным движением? Вращательным?
4. Как определяют положение точки в пространстве?
5. Чем отличаются путь и перемещение?
6. Какие Вы знаете кинематические характеристики поступательного движения? Дайте определение скорости, ускорения.
7. Что характеризует нормальное ускорение? Что тангенциальное? Как они вычисляются?
8. Как вычисляются скорость и путь при поступательном движении?



9. Расскажите о кинематических характеристиках вращательного движения. Дайте определение угловой скорости и углового ускорения.

10. Как связаны линейные и угловые характеристики?

### Задачи

1. Угловая скорость вала мотора  $62,8$  рад/с. Найти число оборотов вращения вала за две минуты.

2. Автомобиль движется по горизонтальному шоссе со скоростью  $9,42$  м/с. Сколько оборотов в минуту совершают его колеса, если они катятся по шоссе без проскальзывания, а внешний диаметр покрышек колеса равен  $0,6$  м.

3. Минутная стрелка часов в три раза длиннее секундной. Во сколько раз линейная скорость конца минутной стрелки меньше, чем скорость конца секундной стрелки?

4. Камень, который привязан к веревке длиной  $l=1$  метр, вращается в вертикальной плоскости, совершая  $180$  оборотов в минуту. В тот момент, когда скорость направлена вертикально вверх, веревка обрывается. На какую высоту от точки отрыва взлетит камень? Сопротивлением воздуха пренебречь.

5. Во сколько раз нормальное (центростремительное) ускорение точки на конце минутной стрелки часов больше, чем (нормальное) центростремительное ускорение точки конца часовой стрелки, если минутная стрелка в  $1,5$  раза длиннее часовой?

## 1.2. Динамика поступательного движения

Классическая динамика была создана английским ученым Исааком Ньютоном в XVII веке, но не утратила своего значения до настоящего времени.

**Динамика** – это раздел классической механики, в котором изучается влияние взаимодействия сил между телами на механическое движение. Основу классической механики составляют три закона, которые сформулировал Ньютон в результате обобщения многочисленных опытных данных. В динамике вводятся новые понятия, такие, как сила, масса, импульс.

### 1.2.1. Силы в механике

**Силой** называется мера действия одного тела на другое, т. е. мера взаимодействия тел.

В физике известно четыре вида взаимодействия тел:

- ядерное (между нуклонами атомного ядра);

- слабое (при распаде некоторых элементарных частиц);
- электромагнитное (между частицами, имеющими электрический заряд);
- гравитационное (между любыми частицами).

Ядерное и слабое взаимодействие в механике не рассматриваются. Электромагнитное взаимодействие проявляется в механике в виде сил трения и упругости. Гравитационное взаимодействие является самым "слабым". Однако, при наличии больших масс (планеты, звезды и т. д.) оно является весьма существенным. Поэтому для большинства явлений механики, происходящих на Земле, нужно учитывать силу тяготения (т. е. гравитационное взаимодействие).

**Гравитационная сила** (или сила **всемирного тяготения**) является фундаментальной силой. Гравитация является всеобщим законом для всей Вселенной. Закон всемирного тяготения, открытый Ньютоном, формулируется следующим образом.

**Два тела (материальные точки) притягиваются друг к другу по прямой, которая их соединяет, с силами, прямо пропорциональными произведению их масс и обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними**

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}, \quad (1.17)$$

где  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \right)$  - гравитационная постоянная.

Перечислим некоторые нефундаментальные силы, которые используются при решении задач в механике.

**Сила тяжести**

$$P = mg, \quad (1.18)$$

где  $m$  - масса тела,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  - ускорение свободного падения.

**Сила трения**

$$F_{\text{тр}} = \mu N, \quad (1.19)$$

где  $\mu$  - коэффициент трения,  $N$  - сила нормального давления. Сила трения направлена против движения.

## **Сила упругости**

$$F_{\text{упр}} = -k\Delta x,$$

где  $k$  - коэффициент упругости,  $\Delta x$  - деформация (изменение длины тела):

$$\Delta x = x_2 - x_1.$$

Формулу для силы упругости можно записать проще, если считать, что

$$x_2 = x, x_1 = 0.$$

Тогда:

$$F_{\text{упр.}} = -kx. \quad (1.20)$$

Сила упругости вычисляется по закону Гука, согласно которому упругая деформация пропорциональна действующей на тело силе.

### **1.2.2. Масса и импульс тела**

Опыт показывает, что всякое тело сопротивляется попыткам изменить его состояние. Это свойство называется инертностью.

**Масса** - это мера инертности тела.

Масса также определяет гравитационные свойства и определяется количеством вещества, заключенного в теле.

**Импульс тела** равен произведению массы тела на его скорость. Это векторная величина

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}. \quad (1.21)$$

### **1.2.3. Законы Ньютона**

В основе классической динамики лежат три закона Ньютона, полученные как результаты обобщения опытных фактов.

**I закон Ньютона** называют законом инерции.

**Всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока воздействие на него других тел не заставит изменить его это состояние.**

Первый закон Ньютона (также, как другие) выполняется только для инерциальных систем отсчета. **Инерциальной системой отсчета** называется такая система отсчета, относительно которой тело, свободное от внешних воздействий, либо покоится, либо движется равномерно и прямолинейно.

**II закон Ньютона** называют основным законом динамики поступательного движения. Приняты такие две формулировки. Первая формулировка справедлива для движения тел с постоянной массой.

**Результирующая сила, действующая на тело, равна массе тела, умноженной на его ускорение**

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}, \quad (1.22)$$

где 
$$\vec{F} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i$$

Вторая формулировка является более общей, она справедлива для движения тел как для классической, так и для релятивистской механики. Она читается так: **результирующая сила, действующая на тело, равна производной по времени от импульса тела**

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}. \quad (1.23)$$

Отсюда:  $\vec{F} \cdot dt = d\vec{p}$  или  $\vec{F} \cdot \Delta t = \Delta \vec{p}$ .

Произведение силы на время ее действия называется импульсом силы. Следовательно, **импульс силы равен изменению импульса тела.**

**III закон Ньютона носит** название закона взаимодействия. Он утверждает, что всякое действие тел друг на друга носит характер взаимодействия.

**При взаимодействии тел сила, действующая со стороны первого тела на второе, равна по величине и противоположна по направлению силе, действующей со стороны второго тела на первое.**

Эти силы приложены к разным телам, всегда действуют парами и являются силами одной природы. Например, на рис. 1.7 показаны гравитационные силы, действующие между двумя телами.

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}. \quad (1.24)$$

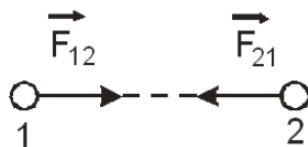


Рис.1.7

Этот закон позволяет осуществить переход от динамики *отдельной* материальной точки к динамике *системы* материальных точек. Это следует из того, что для системы материальных точек взаимодействие сводится к силам парного взаимодействия между материальными точками.

Единицей измерения силы в системе СИ является ньютон (Н)

$$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

#### 1.2.4. Закон сохранения импульса

Закон сохранения импульса является одним из основных законов природы. В механике его можно получить из II и III законов Ньютона. Он справедлив для системы материальных точек, на которые либо не действуют внешние силы, либо векторная сумма всех внешних сил равна нулю. Система, на которую не действуют внешние силы, называется *замкнутой системой*.

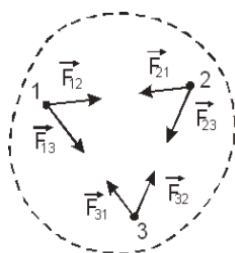


Рис.1.8

Для вывода закона сохранения импульса рассмотрим замкнутую систему, состоящую из трех тел. (рис. 1.8). Тогда между телами системы действуют только внутренние силы.

По III закону Ньютона (1.24)

$$\begin{aligned}\vec{F}_{12} &= -\vec{F}_{21} \\ \vec{F}_{23} &= -\vec{F}_{32} \\ \vec{F}_{13} &= -\vec{F}_{31}.\end{aligned}$$

По II закону Ньютона (1.23)

$$+ \begin{cases} \frac{d\vec{p}_1}{dt} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} \\ \frac{d\vec{p}_2}{dt} = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{23} \\ \frac{d\vec{p}_3}{dt} = \vec{F}_{31} + \vec{F}_{32}. \end{cases}$$

Сложим левые и правые части уравнений

$$\frac{d\vec{p}_1}{dt} + \frac{d\vec{p}_2}{dt} + \frac{d\vec{p}_3}{dt} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{21} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{31} + \vec{F}_{23} + \vec{F}_{32} = 0$$

Преобразуем это уравнение

$$\frac{d}{dt}(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3) = 0$$

Назовем  $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3$  импульсом системы.

**Импульсом системы** называется векторная сумма импульсов тел, входящих в систему.

Тогда:  $\frac{d\vec{p}}{dt} = 0$  и  $\vec{p} = const$ , если внешние силы отсутствуют.

Закон сохранения импульса читается так: **импульс замкнутой системы сохраняется.**

Отметим, что импульс сохраняется и для незамкнутых систем при условии, что векторная сумма внешних сил равна нулю.

На основе закона сохранения импульса можно объяснить отдачу оружия при стрельбе, реактивное движение и т. д. Закон сохранения импульса является одним

из важнейших законов природы. Он выполняется всегда и везде - в космосе и микромире, для макротел и микрочастиц.

### 1.2.5. Работа в механике. Мощность

Понятие работа является обобщением повседневного опыта человека. Но в механике это понятие является более узким и более точным, чем в быту.

**Работой постоянной силы** в механике называется произведение модуля вектора силы на модуль вектора перемещения и на косинус угла между направлением силы и направлением перемещения (рис. 1.9)

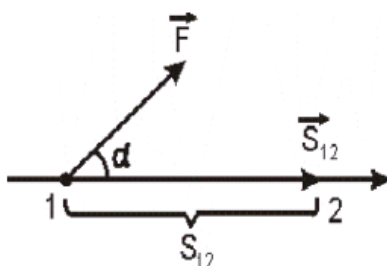


Рис.1.9

$$A = F \cdot \Delta S \cdot \cos \alpha . \quad (1.25)$$

Эта формула справедлива, если тело движется прямолинейно и на него действует постоянная сила. Длина пути тогда равна модулю вектора

перемещения  $|\vec{S}_{12}| = \Delta S$ .

Из формулы (1.25) следует, что работа может быть положительной (если  $\cos \alpha > 0$ ), отрицательной ( $\cos \alpha < 0$ ) или равной нулю ( $\cos \alpha = 0$ ). Если работа положительная ( $A > 0$ ), то это значит, что внешние силы совершают над телом работу. Если работа отрицательная ( $A < 0$ ), то тело совершает работу над внешними телами.

Единицей работы в системе СИ является джоуль (Дж)

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

В общем случае, движение может происходить по криволинейной траектории под действием переменной силы (рис. 1.10).

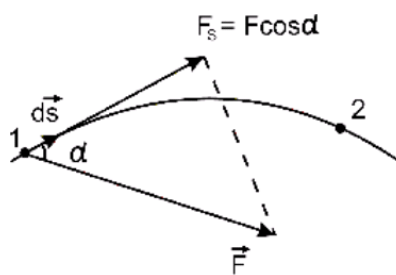


Рис.1.10

Тогда сначала нужно вычислить элементарную работу на малом участке пути, на котором движение можно считать прямолинейным, а силу постоянной

$$dA = F_S dS, \quad (1.26)$$

где  $F_S = F \cos \alpha$ ;  $F_S$  - проекция силы на направление перемещения.

Суммарную работу находят интегрированием

$$A = \int_1^2 F_S dS. \quad (1.27)$$

По этой формуле вычисляется работа переменной силы.

Работа, совершаемая в единицу времени, называется **мощностью**

$$P = \frac{dA}{dt}. \quad (1.28)$$

Единица мощности - ватт (Вт)

$$1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}.$$

### 1.2.6. Механическая энергия

Проблема энергии касается каждого человека. От потребления энергии непосредственно зависит благосостояние людей, поэтому надо четко представлять себе, что такое энергия, и как она распределяется.

В соответствии с различными формами движения материи существуют разные виды энергии: механическая, химическая, тепловая, электрическая, ядерная и т. д.



Для сравнения различных форм движения материи требуется общий эквивалент, подобно тому, как деньги являются общим эквивалентом, позволяющим сравнивать различные товары. В физике мерой перехода одних форм движения в другие является **энергия**. Изменение энергии связано с совершением работы. Итак, **энергией** называется способность тела совершать работу.

В механике тело способно совершить работу в двух случаях:

- 1) если оно движется, т. е. обладает кинетической энергией;
- 2) если оно находится в потенциальном поле сил, т. е. обладает потенциальной энергией.

### 1.2.7. Кинетическая энергия

**Кинетической энергией** называется энергия движущегося тела. Найдем формулу для кинетической энергии и покажем, что **изменение кинетической энергии равно работе равнодействующей силы**.

Элементарная работа равна

$$dA = F_S dS$$

Используя формулы (1.22), (1.8), (1.5), получим

$$dA = m \cdot a \cdot dS = m \cdot \frac{dv}{dt} \cdot dS = m \cdot v \cdot dv$$

Суммарная работа по формуле (1.27) равна

$$A = \int_{v_1}^{v_2} m \cdot v \cdot dv = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = W_{K_2} - W_{K_1}$$

Отсюда кинетическая энергия вычисляется по формуле

$$W_K = \frac{mv^2}{2}. \quad (1.29)$$

Кинетическая энергия всегда положительная, она измеряется в тех же единицах, что и работа. Если  $A > 0$ , то  $W_{к2} > W_{к1}$ , т. е. кинетическая энергия тела возрастает, следовательно, внешние силы над телом совершают работу.

Если  $A < 0$ , то  $W_{к2} < W_{к1}$ , т. е. кинетическая энергия тела убывает, значит тело совершает работу.

### 1.2.8. Консервативные силы

Примерами консервативных сил являются сила тяжести и сила упругости.

Основным свойством консервативных сил является то, что работа консервативных сил не зависит от формы траектории. Покажем это на примере работы силы тяжести ( $F = mg$ , см. формулу (1.18)).

Покажем, что работа силы тяжести (формула (1.25)) одинакова для двух разных путей (для пути 1 - 3 и пути 1 - 2 - 3), обозначения длин путей приведены на рис. 1.11

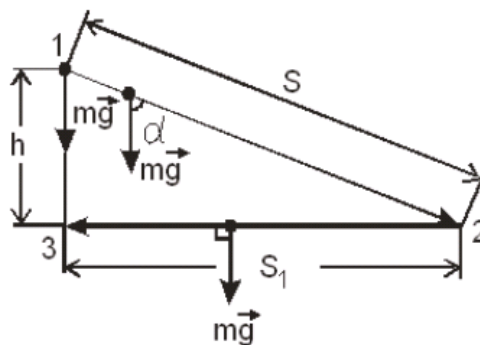


Рис.1.11

$$A_{1-3} = mgh \cos 0^\circ = mgh$$

$$A_{1-2-3} = A_{1-2} + A_{2-3}$$

$$A_{1-2} = mgS \cos \alpha = mgh$$

$$h = S \cos \alpha$$

$$A_{2-3} = mgS_1 \cos 90^\circ = 0$$

$$A_{1-2-3} = mgh = A_{1-3}.$$

Из последней формулы следует, что работа силы тяжести не зависит от формы траектории.

**Консервативными силами** называются силы, работа которых не зависит от формы траектории, а определяется только начальной и конечной координатами тел. Силы, которые не удовлетворяют этому правилу, называются **неконсервативными**. Примером неконсервативных сил является сила трения.

### 1.2.9. Потенциальная энергия

**Потенциальной энергией** называется энергия, обусловленная взаимным расположением тел или их частей друг относительно друга.

Универсальной формулы для расчета потенциальной энергии нет.

Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия двух тел равна:

$$W_p = G \cdot \frac{m_1 m_2}{r}, \quad (1.30)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  - массы взаимодействующих тел,  $r$  - расстояние между центрами

масс,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \right)$  - гравитационная постоянная.

Потенциальная энергия тела, поднятого на высоту  $h$ , равна

$$W_p = mgh, \quad (1.31)$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  - ускорение свободного падения.

Потенциальная энергия упруго сжатой пружины равна

$$W_p = \frac{k(\Delta x)^2}{2}, \quad (1.32)$$

где  $k$  - коэффициент упругости,  $\Delta x$  - деформация (изменение длины тела).

**Работа в потенциальном поле сил равна убыли потенциальной энергии:**

$$A_{1,2} = -(W_{p2} - W_{p1}). \quad (1.33)$$

### Полная механическая энергия тела

**Полной механической энергией** называется сумма кинетической и потенциальной энергий

$$W = W_k + W_p. \quad (1.34)$$

#### 1.2.10. Закон сохранения механической энергии

Закон сохранения энергии является одним из основных законов в физике и технике. Он накладывает строгие ограничения на возможность перераспределения энергии в замкнутой системе и преобразования ее из одной формы в другую. Этот закон получен на основе обобщения большого количества опытных данных.

**Полная механическая энергия замкнутой системы, между телами которой действуют только консервативные силы, остается постоянной,**

$$W = W_k + W_p = const$$

Если система незамкнутая, но внешние силы также являются консервативными, то механическая энергия также сохраняется.

Если в замкнутой системе, кроме консервативных сил действуют неконсервативные силы (например, сила трения), то полная механическая энергия изменяется. Тогда справедлив закон изменения механической энергии.

**Изменение полной механической энергии замкнутой системы равно работе неконсервативных сил**

$$\Delta W = W_2 - W_1 = A_{\text{т.с.}}$$

Заметим, что силы трения совершают отрицательную работу. Поэтому наличие силы трения в замкнутой системе приводит к уменьшению ее полной механической энергии.

Следует иметь в виду, что при исчезновении механической энергии всегда возникает эквивалентное количество энергии другого вида (например, теплоты). В самой общей форме закон сохранения энергии формулируется следующим образом.

***Энергия никуда не исчезает и не появляется вновь, она лишь превращается из одного вида в другой.***

Закон сохранения энергии является фундаментальным законом природы. Он справедлив как для систем макротел, так и для систем микротел.

### 1.2.11. Соударение двух тел

Рассмотрим два примера на применение законов сохранения импульса и энергии при соударении двух тел. Существует два предельных вида удара: абсолютно упругий и абсолютно неупругий.

#### **Абсолютно упругий удар шаров**

***Абсолютно упругим ударом*** называется такой удар, при котором тела разлетаются, не меняя своего строения и формы. Запишем закон сохранения импульса для абсолютно упругого удара

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2,$$

где  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  - скорости тел до удара,

$\vec{u}_1$  и  $\vec{u}_2$  - скорости тел после удара.

Закон сохранения энергии для абсолютно упругого удара шаров запишется в следующем виде

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}.$$

В этом случае кинетическая энергия системы до удара равна кинетической энергии системы после удара.

Решая совместно два уравнения, получим скорости шаров после удара.

### Абсолютно неупругий удар шаров

**Абсолютно неупругим ударом** называется такой удар, после которого тела меняют свою форму и движутся как единое целое с одинаковой скоростью или покоятся. Запишем закон сохранения импульса для абсолютно неупругого удара

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \cdot \vec{u},$$

где  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  - скорости тел до удара,  
 $\vec{u}$  - общая скорость после удара.

Запишем закон сохранения энергии в общем форме для абсолютно неупругого удара шаров

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2) \cdot u^2}{2} + W_{\text{деф}},$$

где  $W_{\text{деф}}$  - энергия деформации.

В этом случае сохраняется полная энергия системы, включая энергию деформации.

### Вопросы для самоконтроля:

1. Что называется силой? Приведите примеры сил в механике.
2. Сформулируйте законы Ньютона. Для каких систем они справедливы?
3. Получите из II и III законов Ньютона закон сохранения импульса.
4. Что называется работой в механике?
5. Что называется кинетической энергией? Как она вычисляется?
6. Что называется потенциальной энергией? Как она вычисляется?

7. Какие силы называются консервативными? Неконсервативными?
8. Сформулируйте закон сохранения энергии.
9. Запишите законы сохранения энергии и импульса для упругого и неупругого ударов шаров.

### Задачи

1. Подвешенное к динамометру тело массой 2 кг поднимается вертикально вверх. Что покажет динамометр при подъеме с ускорением  $2 \text{ м/с}^2$ ; при равномерном подъеме?
2. Грузовой автомобиль взял на буксир легковой автомобиль массой 2 т и, двигаясь равноускоренно из состояния покоя, за 50 с проехал 400 м. На сколько удлинился буксировочный трос жесткостью 200 кН/м? Сопротивлением воздуха и силой скольжения пренебречь.
3. По наклонной плоскости с углом наклона к горизонту  $30^\circ$  скользит тело. Найти скорость тела в конце третьей секунды от начала движения, если коэффициент трения 0,3.
4. С какой скоростью должен двигаться мотоциклист по вогнутому участку шоссе с радиусом 10 м, чтобы сила давления мотоциклиста в нижней точке участка была в два раза больше силы тяжести?
5. Два груза массами 200 г и 300 г соединены нитью, перекинутой через неподвижный блок, который подвешен к пружинным весам. Определите ускорение грузов, натяжение нити и показания весов.
6. Найдите массу Солнца, зная, что средняя скорость движения по орбите 30 км/с, а радиус орбиты Земли  $1,5 \cdot 10^8$  км.
7. Поезд массой 2000 т, движущийся прямолинейно, увеличил скорость от 36 км/ч до 72 км/ч. Найти изменение импульса поезда.
8. С лодки массой 200 кг, движущейся со скоростью 1 м/с, прыгает мальчик массой 50 кг в горизонтальном направлении со скоростью 7 м/с. Какова скорость движения лодки после прыжка мальчика, если мальчик прыгает с кормы в сторону, противоположную движению лодки; с носа по ходу движения?
9. Сигнальная ракета, масса которой без заряда 400 г, при сгорании топлива поднимается на высоту 125 м. Определить скорость выхода газов из ракеты, считая, что сгорание топлива массой 50 г происходит мгновенно. Сопротивление воздуха не учитывать.
10. Стоящий на льду конькобежец массой 60 кг ловит мяч массой 0,5 кг, который летит горизонтально со скоростью 20 м/с. На какое расстояние откатится человек с мячом по горизонтальной поверхности льда, если коэффициент трения 0,05?

11. Снаряд массой 50 кг, летящий со скоростью 600 м/с попадает в платформу с песком массой 10 т и застряет в песке. Вектор скорости снаряда в момент падения образует 45° с горизонтом. Определить скорость платформы после попадания снаряда, если: 1) платформа неподвижна; 2) платформа движется навстречу снаряду со скоростью 10 м/с.

12. Подъемный кран приводится в действие двигателем мощностью 10 кВт. Сколько времени потребуется для доставки на высоту  $h=50$  м груза массой  $m=2$  т, если КПД двигателя 75%?

13. Импульс тела равен  $p=8$  кг·м/с, а кинетическая энергия  $E_k=16$  Дж. Найти массу и скорость тела.

14. Какую работу надо совершить, чтобы растянуть пружину жесткостью  $K=40$  кН/м на  $X=0,5$  см?

15. Найти потенциальную и кинетическую энергию тела массой  $m=3$  кг, падающего свободно с высоты  $h_1=5$  м, на расстоянии  $h_2=2$  м от поверхности Земли.

16. Камень брошен вертикально вверх со скоростью  $v_0=10$  м/с. На какой высоте кинетическая энергия камня будет равна его потенциальной энергии?

17. Тело массой  $m=1$  кг, брошенное горизонтально с высоты  $h=45$  м со скоростью  $V=20$  м/с, упало на Землю. Определите кинетическую энергию тела в момент падения. Сопротивлением движению пренебречь.

18. Шарик массой  $m_1=0,1$  кг вращается равномерно в горизонтальной плоскости по окружности радиусом  $R=0,5$  м с частотой вращения 3 об/с. Определите энергию шарика.

19. Тело массой 0,5 кг, падая из состояния покоя с высоты 10 м у поверхности Земли имело скорость 12 м/с. Какая была совершена работа по преодолению силы сопротивления воздуха?

20. Определите кинетическую и потенциальную энергию тела массой 200 г, брошенного вертикально вверх со скоростью 30 м/с, через 2 с после бросания. Сопротивлением воздуха пренебречь.

21. Пуля массой 10 г попадает в доску толщиной 10 см, имея скорость 400 м/с. Пробив доску, пуля вылетает со скоростью 200 м/с. Определите силу сопротивления, которую испытала пуля при пробивании доски.

22. Свинцовый шар массой 500 г, который движется со скоростью 10 см/с, сталкивается с неподвижным шаром из пластилина массой 200 г, после чего оба шара движутся вместе. Определите кинетическую энергию шаров после удара. Какая часть энергии стального шара перешла в немеханическую (внутреннюю) энергию?



23. Вагон массой 10 т, движущийся со скоростью 4 м/с нагоняет вагон массой 40 т, движущийся со скоростью 1 м/с. После срабатывания сцепки они стали двигаться как одно целое. Считая взаимодействие неупругим, определить, какая часть механической энергии перешла во внутреннюю. Ответ дать в процентах.

### 1.3 Элементы статики

**Статика** – это часть механики, в которой изучается равновесие твердых тел.

**Абсолютно твердым телом** (далее- **твердое тело**) считается тело, форма и размеры которого при наличии всевозможных внешних воздействий могут считаться неизменными.

#### 1.3.1 Равновесие твердых тел, которые не имеют оси вращения

**Условие равновесия** твердого тела, т.е. состояния покоя, следует из первого закона Ньютона: *результатирующая  $\vec{F}$  всех сил, действующих на тело, равна нулю*

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i = 0 \quad (1.35)$$

Как находить результирующую силу, смотри раздел 1.6. Точкой приложения результирующей силы  $\vec{F}$  является центр тяжести тела.

#### 1.3.2 Равновесие твердого тела, которое имеет закрепленную ось вращения

**Закрепленная** (неподвижная) ось вращения всегда проходит через центр  $O$  тяжести тела. Сила  $F$ , которая действует на твердое тело, создает момент силы  $M$  относительно оси вращения (формула впервые записана Архимедом):

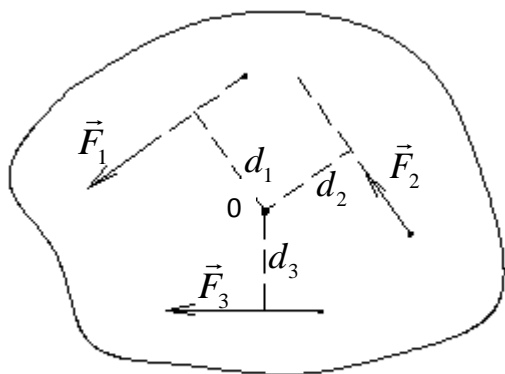


Рис. 1.12

$$M = F d, \quad (1.36)$$

где  $d$  – плечо силы (рис.25). **Плечо силы** – это длина отрезка перпендикуляра, опущенного из оси  $O$  вращения тела на линию действия силы.

**Момент силы  $M$**  это величина, которая равна произведению действующей силы  $F$  на плечо силы  $d$ . Единица измерения момента силы - *Ньютон умноженный на метр* (Н·м)

Моменту силы условно дают знак: момент силы считается *положительным*, если сила стремится вращать тело *по часовой стрелке*, и *отрицательным*, если сила вращает тело *против часовой стрелки*. Теперь возможно сформулировать **правило моментов**:

*Тело, которое имеет закрепленную ось вращения, находится в равновесии (покое), если алгебраическая сумма моментов сил равна нулю*

$$\sum_{j=1}^N M_j = 0, \quad (1.37)$$

Для тела на рисунке 25 правило моментов (26) будет иметь вид:

$$-M_1 - M_2 + M_3 = 0$$

или

$$-F_1 d_1 - F_2 d_2 + F_3 d_3 = 0.$$

Общее условие равновесия твердого тела включает уже рассмотренные равенства:

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = 0 \quad \text{и} \quad \sum_{j=1}^N M_j = 0.$$

### Вопросы для самоконтроля:

1. Что называется статикой?
2. Что называется абсолютно твердым телом? Бывают ли такие тела в природе или технике?
3. Когда тела находятся в равновесии, если они не имеют оси вращения?
4. Что называется плечом силы, моментом силы?
5. Сформулируйте правило моментов. Запишите общее условие равновесия твердого тела.

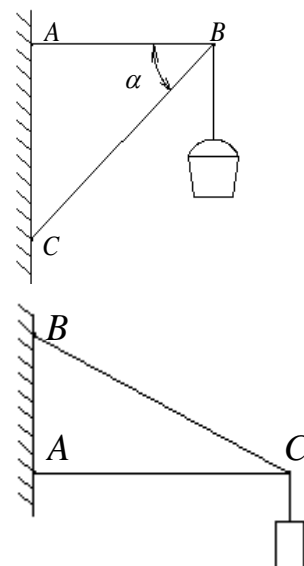
### Задачи:

1. Найти силы, действующие на стержни АВ и ВС, если  $\alpha = 60^\circ$ , а масса лампы с колпаком 3 кг.

2. К концу стержня АС длиной 2 м, укрепленного одним концом к стене, а с другого конца поддерживаемого тросом ВС длиной 2,5 м, подвешен груз массой 120 кг. Найти силы, действующие на трос и стержень.

3. Могут ли силы 10 Н и 14 Н, приложенные в одной точке, дать результирующую силу, равную 2, 4, 10, 24, 30 Н?

4. Маленький шарик массой 100 г подвешен на нити длиной 1 м. Шарик отклоняют от вертикали в положение, в котором на него действует момент силы тяжести относительно точки подвеса, равный 0,5 Н·м. На какой угол в градусах от вертикали отклонен шарик?



## СЛОВАРЬ

<i><b>РУССКИЙ</b></i>	<i><b>ENGLISH</b></i>	<i><b>FRANCAIS</b></i>
<b>А</b>		
адиабатический (адиабатный) процесс	adiabatic process	procès adiabatique (m)
абсолютная влажность воздуха	absolute humidity of air	humidité absolue de l'air (f)
абсолютная система	absolute system	système absolu (m)
абсолютный ноль	absolute zero	zéro absolu (m)
алгоритм	algorithm	algorithme (m)
алгоритм решения задач	algorithm of problem solution	algorithme de la résolution des problèmes (m)
атмосфера	atmosphere	atmosphère (f)
атом	atom	atome (m)
атомные кристаллы	atomic crystals	cristaux d'atom
<b>Б</b>		
броуновское движение	Brownian motion	movement de Broun (m)
<b>В</b>		
вектор перемещения	displacement vector	vecteur du déplacement (m)
величина	quantity	valeur (f)
вес тела	body weight	poids du corps (m)
внутренняя энергия	internal energy	énergie intérieure du corps (i)
второй закон Ньютона	the second Newton's law	deuxième loi de Newton
вычитание векторов	subtraction of vectors	soustraction des vecteurs (f)
<b>Г</b>		
газовая постоянная	gas constant	constante de gaz (f)
газообразная фаза	gas phase	phase gazeuse (f)
гигроскопичность тел	hygroscopicity of solids	hygroscopie des corps (f)
гидравлический пресс	hydraulic press	presse hydraulique (f)
гидроаэромеханика	fluid mechanics	hydroaéromécanique (f)
гидроаэростатика	statics of fluids	hydroaérostatique (f)
гидростатическое давление	hydrostatic pressure	pression hydrostatique (f)
горение топлива	combustion of fuel	combustion du carburant (f)
градус Цельсия	degree Celsius	degré de Celsius (m)
<b>Д</b>		

давление	pressure	pression (f)
дальность полёта	distance of flight	distance de vol (f)
деформация	deformation	déformation(f)
динамика	dynamics	dynamique (f)
диффузия	diffusion	diffusion (f)
<b>Е</b>		
единица измерения угловой частоты	unit of angular frequency	unité de mesure de la fréquence angulaire (f)
<b>Ж</b>		
жидкая фаза	liquid phase	phase liquide (f)
<b>З</b>		
закон Лапласа	Laplace law	loi de Laplace (f)
закон Всемирного тяготения	law of gravitation	loi de la gravitation universelle
закон Архимеда	Archimedes principle	loi d'Archimede (f)
закон Бойля-Мариотта	Boyle-Mariotte law	loi de Boyle et Mariotte (f)
закон Гей-Люссака	Gay-Lussac law	loi de Gay-Lussak (f)
закон Гука	Hooke law	loi de Hook (f)
закон Дальтона	Dalton law	loi de Dalton (f)
закон Паскаля	Pascal law	loi de Pascal (f)
закон сохранения импульса	momentum conservation law	loi de la conservation de l'impulsion (f)
закон сохранения механической энергии	conservation law of mechanical energy	loi de la conservation de l'énergie mécanique (f)
закон Шарля	Charles law	loi de Charles (m)
закреплённая ось вращения	fixed axis of rotation	axe fixe de la rotation(m)
замкнутая система	closed system	système fermé (m)
<b>И</b>		
идеальный газ	ideal gas	gaz idéal (m)
избыточное (дополнительное) давление	overpressure (excess pressure)	pression excédante (surpression)(f)
изобарный процесс	isobaric process	procès isobarique (m)
изопроецесс	isoprocess	isoprocès (m)
изотермический процесс	isothermal process	procès isothermique (m)
изохорный процесс	isochoric process	procès isochorique (m)
импульс тела	body momentum	impulsion du corps (l)

инертность	inertness	inertie (f)
инерциальная система отсчёта	inertial reference system	ystème de referance a inertie (m)
ионные кристаллы	ionic crystals	cristaux ioniques
испарение	evaporation	vaporization (f)
<b>К</b>		
капилляр	capillary	capillaire (m)
капиллярное явление	capillary phenomenon	phénomène de capillaire (m)
кинематика	kinematics	cinématique (f)
кинетическая энергия	kinetic energy	énergie cinétique (f)
кипение	boiling	bouillonnement (m)
классическая механика	classical mechanics	mécanique classique (f)
конвекция	convection	convection (f)
конденсация	condensation	condensation (f)
концентрация	concentration	concentration (l)
координатная ось	coordinate axis	axe de coordonnées (f)
коэффициент жесткости	coefficient of stiffness	coefficient de la rigidité (m)
коэффициент поверхностного натяжения (поверхностное натяжение)	surface tension coefficient	coefficient de la tension de surface (la tension de surface)(m)
коэффициент полезного действия	efficiency	rendement (m)
коэффициент трения (коэффициент сопротивления)	coefficient of friction (drag coefficient)	coefficient de frotlement (du glissement) (m)
краевой угол	angle of contact	angle régional (m)
криволинейное движение	curvilinear motion	mouvement curviligne (m)
кристалл	crystal	cristal (m)
кристаллизация	crystallization	cristallisation (f)
кристаллическая решётка	lattice	grille cristalline (f)
<b>М</b>		
макросистема	macrosystem	macrosystème (m)
материальная точка	material point	point materiel (m)
материя	matter	matière (f)
мгновенная скорость	instantaneous velocity	vitesse instantanée (f)
мгновенное ускорение	instantaneous acceleration	accélération instantanée (f)

Международная система единиц (СИ)	SI system	système international des unités (m)
мениск	meniscus	ménisque (m)
мера деформации	measure of deformation	mesure de la déformation (f)
мера инертности	measure of inertness	mesure de l'inertie (0
металлические кристаллы	metal crystals	cristaux métalliques
механика	mechanics	mécanique(f)
механическое движение	mechanical movement	mouvement mécanique (m)
молекула	molecule	molécule (f)
молекулярная масса	molecular mass	masse moléculaire (f)
молекулярная физика	molecular physics	physique moléculaire (f)
молекулярные кристаллы	molecular crystals	cristaux moléculaires
момент силы	moment of force	moment d'une force (m)
мощность	power	puissance (f)
<b>Н</b>		
насыщающий (насыщенный) пар	saturating (saturated) vapor	vapeur chargée (f)
неинерциальная система отсчёта	non-inertial reference system	système ininertial de referance(m)
неупругое столкновение	inelastic collision	collision non élastique (f)
нормальное (центростремительное) ускорение	normal (centripetal) acceleration	accélération normale (centripète) (f)
нормальное атмосферное давление	standard atmospheric pressure	pression normale atmosphérique (f)
Ньютон	Newton	Newton (m)
<b>О</b>		
однородная физическая величина	homogeneous physical quantity	valeur homogène physique (f)
основное уравнение МКТ	basic equation of molecular-kinetic theory (МКТ)	équation principale de TMC (théorie molekuljarno-cinétique)(f)
основные единицы	fundamental units	unités de base (f)
относительная влажность воздуха	relative air humidity	humidité relative de l'air (f)
относительно	relatively	relativement
<b>П</b>		

пар	vapor, steam	vapeur (f)
парообразование	vaporization, steam generation	vaporisation (f)
парциальное давление	partial pressure	pression partielle (f)
первый закон Ньютона	the first Newton's law	première loi de Newton (f)
переменное движение	variable motion	mouvement variable (m)
перемещение	displacement	déplacement (m)
периметр смачивания	perimeter of wetting	périmètre de l'humectation (m)
плавление твёрдых тел	melting of solids	fonte des corps solides (f)
пластическая деформация	plastic deformation	déformation plastique (f)
плечо силы	arm of force	bras de levier (f)
плотность вещества	matter density	densité de la substance (f)
полезная работа	useful (effective) work	travail utile (m)
полная механическая энергия	total mechanical energy	énergie totale mécanique (f)
полное давление	total pressure	pression totale (f)
потенциальная энергия	potential energy	énergie potentielle (f)
правило моментов	rule of moments	règle des moments (f)
правило параллелограмма	parallelogram rule	règle du parallélogramme (f)
правило треугольника	triangle rule	règle du triangle (f)
производная величина	derived quantity	dérivée (f)
произвольная масса	arbitrary mass	masse arbitraire (f)
прямолинейное движение	straight-line motion	mouvement rectiligne (m)
прямолинейное переменное движение	straight-line variable motion	mouvement rectiligne variable ( m )
путь	path	distance (f)
<b>Р</b>		
работа	work	travail (m)
равнозамедленное движение	uniformly retarded motion	mouvement uniformement relenti (m)
равномерное движение по окружности	uniform motion in a circle	mouvement uniforme suivant un cercle (m)
равномерное и прямолинейное движение по горизонтали	uniform and straight-line horizontal motion	mouvement uniforme et rectiligne suivant l'horizontale (m)
равномерное прямолинейное движение	constant motion	mouvement uniforme rectiligne (m)



равнопеременное движение	uniformly variable motion	mouvement uniformement varié (m)
равнопеременное движение по вертикали	uniformly variable vertical motion	mouvement uniformement varié suivant la verticale (m)
равноускоренное движение	uniformly accelerated motion	mouvement uniformément accéléré (m)
радиус-вектор	radius-vector	rayon-vecteur (m)
различие краевых углов	difference of angle of contact	distinction des angles régionaux (f)
размерность силы	dimension of force	dimension de la force (f)
размерность физической величины	dimension of physical quantity	dimension de la grandeur physique (f)
разность двух векторов	difference of two vectors	différence de deux vecteurs(f)
результатирующая скорость	combined (resultant) velocity	vitesse résultante (f)
результатирующий вектор	resultant (vector)	vecteur résultant (m)
С		
свободное падение	free fall	chute libre (f)
сила	force	force (f)
сила Архимеда	buoyancy force	force d'Archimède (f)
сила натяжения	tension	force de la tension (f)
сила нормального давления	force of normal pressure	force de la pression normale (f)
сила реакции	reaction (force)	force de la réaction (f)
сила тяги	driving force	force de la traction (f)
сила тяготения (гравитационная сила)	gravitational force	force de la gravitation (la force gravitationnelle) (f)
сила тяжести	gravity	force du pesanteur (f)
сила упругости	elastic force	force de l'élasticité (f)
система единиц	system of units	système des unités (m)
система отсчета	frame of reference	système de reference(m)
скалярная величина	scalar value	scalair( m)
сложение векторов	composition of vectors	addition des vecteurs (f)
смачивание	wetting	humectation (f)
состояние покоя	(state of) rest	état de repos (m)
среднее ускорение	average acceleration	accélération moyenne(m)
средняя скорость	average velocity	vitesse moyenne (f)
статика	statics	statique (f)

сублимация	sublimation	sublimation (f)
Т		
твёрдое тело	solid	corps solide (m)
тело отсчёта	reference body	corps de referance (m)
температура плавления	temperature of melting	température de la fonte (f)
температура(точка) кипения	boiling temperature	température du bouillonnement (m)
тепловой двигатель	heat-engine	machine thermique (f)
теплоёмкость	heat capacity	capacité thermique (f)
теплообмен (теплопередача)	heat exchange (heat transmission)	échange thermique (m) (transmission de la chaleur) (f)
теплопроводность	heat conductivity	conductibilité de la chaleur (f)
термодинамика	thermodynamics	thermodynamique (f)
термодинамическая температура	thermodynamic temperature	température thermodynamique (f)
термодинамический процесс	thermodynamic process	procès thermodynamique (m)
точка росы	dew point	point de rosée (m)
траектория	trajectory	trajectoire (f)
третий закон Ньютона	third Newton law	troisième loi de Newton (f)
У		
угловая скорость	angular velocity	vitesse angulaire (f)
угловая частота	angular frequency	fréquence angulaire (f)
удельная теплоёмкость вещества	specific heat of substance	capacité thermique (spécifique) i la substance (f)
удельная теплота кристаллизации	specific heat of crystallization	chaleur spécifique de la cristallisation (f)
удельная теплота парообразования	specific heat of evaporation	chaleur spécifique de la vaporisation (f)
удельная теплота плавления	specific heat of melting	chaleur spécifique de la fonte (f)
удельная теплота сгорания	specific heat of combustion	chaleur spécifique de la combustion (f)
упругая деформация	elastic deformation	déformation élastique (f)
упругое столкновение	elastic collision	collision élastique (f)
уравнение Менделеева-Клапейрона (уравнение состояния идеального газа)	Mendeleev-Clapeyron equation (equation of ideal gas state)	équation de Mendeleev-Klapeyrc (équation de l'état du gaz idéal)
ускорение свободного падения	acceleration of gravity; free fall acceleration	accélération de la chute libre (f)

условие плавания тела	condition of body floating	condition de la navigation du cor (f)
условие равновесия	condition of equilibrium	condition d'équilibre (f)
Ф		
фаза	phase	phase (f)
фазовый переход	phase transition	passage de phase(m)
физика	physics	physique (f)
физическая величина	physical quantity	grandeur physique (f)
физическое тело	physical body	corps physique (m)
Ч		
число Авогадро	Avogadro constant	nombre d'Avogadro (m)
Э		
энергия	energy	énergie (f)
Я		
явление	phenomenon	phénomène (m)

## Оглавление

1.1. Кинематика поступательного и вращательного движения .....	1
1.1.1. Предмет механики.....	1
1.1.2. Механическое движение. Модели в механике .....	1
1.1.3. Определение положения точки в пространстве. Траектория. Путь. Перемещение .....	3
1.1.4. Скорость.....	5
1.1.5. Ускорение. Нормальное и тангенциальное ускорение.....	6
1.1.6. Скорость и путь при поступательном движении .....	8
1.1.7. Кинематические характеристики вращательного движения. Угловая скорость и угловое ускорение .....	13
1.1.8. Связь между линейной и угловой скоростью, линейным и угловым ускорением.....	14
1.2. Динамика поступательного движения .....	16
1.2.1. Силы в механике .....	16
1.2.2. Масса и импульс тела.....	18
1.2.3. Законы Ньютона.....	18
1.2.4. Закон сохранения импульса .....	20
1.2.5. Работа в механике. Мощность.....	22
1.2.6. Механическая энергия .....	23
1.2.7. Кинетическая энергия .....	24
1.2.8. Консервативные силы .....	25
1.2.9. Потенциальная энергия .....	26
1.2.10. Закон сохранения механической энергии.....	27
1.2.11. Соударение двух тел.....	28
1.3 Элементы статики .....	32
1.3.1. Равновесие твердых тел, которые не имеют оси вращения.....	32
1.3.2. Равновесие твердого тела, которое имеет закрепленную ось вращения.....	32
СЛОВАРЬ .....	35