Кравченко Игорь Игоревич
Кравченко Ивета Николаевна

Физика для всех: от механики до термодинамики

Электронный иллюстрированный справочник по физике

Оглавление

Часть I

Механика

Глава 1

Кинематика

1 Векторы

Вектор — это стрелка на чертеже для описания направления физической характеристики. На рис. 1 вектор имеет синий цвет.

Рис. 1. Вектор и масштаб

Красный элемент на рис. 1 есть *масштаб*, по которому определяется длина вектора в указанных единицах — то есть **величина** или **модуль вектора**. Видно, что величина данного вектора $v = 6$ м/с. Используются также и другие единицы измерения (буквы после числа) — например, «м», «м/с^2» и т. д.

Проекция вектора — это «тень» вектора на ось координат при освещении перпендикулярно на эту ось. На рис. 2 показаны проекции v_x и v_y.

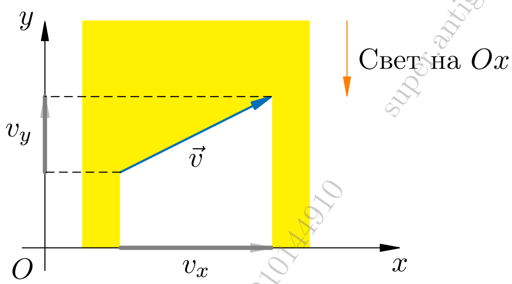

Рис. 2. Проекции вектора

В общем случае проекция вектора равна длине «тени» со знаком

- $+$, если «теневая» стрелка стоит по оси;
- $-$, если «теневая» стрелка стоит против оси.

На рис. 2 по обозначениям возле «теней» видно, что проекция не является вектором. Если приписать «крыши» над v_x и v_y и получше выделить их «теневые наконечники», то окажется, что вектор $\vec{v}$ разложен на **составляющие** векторы $\vec{v}_x$ и $\vec{v}_y$. Треугольник из этих векторов дает: $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$.

Сложить векторы — это значит найти вектор, который совмещает в себе как бы «действия» этих векторов. Два сонаправленных вектора «дают» вектор в ту же сторону (длины складываются). Также ясно, что два противоположно направленных вектора «дают» вектор в сторону большего вектора (длины вычитаются). На рис. 3 показано, как сложить два произвольных вектора.

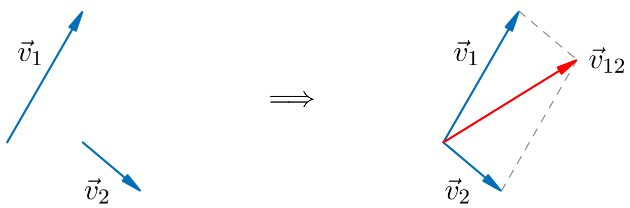

Рис. 3. Правило параллелограмма

2 Числа и приставки

При решении задач с вычислениями могут получаться «неудобные» числа двух типов. Иллюстрируют сказанное следующие примеры:

- 12000000;
- 0,0000034.

Оказывается, вид этих длинных чисел можно исправить, используя компактную запись — так называемую **стандартную запись**:

$$\text{«Длинное число»} = A \cdot 10^n,$$

где $1 < A < 10$; $n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$

Таким образом, числа из примеров выше можно записать так:

- $1{,}2 \cdot 10^7$;
- $3{,}4 \cdot 10^{-6}$.

Как видно, 10^7 «переносит» запятую вправо на 7 знаков, увеличивая число; 10^{-6} «переносит» запятую влево на 6 знаков, уменьшая число.

Далее, множители вида 10^n называют **десятичными приставками**. Такие приставки вместе с буквенными вариантами представлены в табл. 1.

Табл. 1. Десятичные приставки

Имя	Обозначение	Множитель	Имя	Обозначение	Множитель
гига	**Г**	$\mathbf{10^9}$	санти	**с**	$\mathbf{10^{-2}}$
мега	**М**	$\mathbf{10^6}$	милли	**м**	$\mathbf{10^{-3}}$
кило	**к**	$\mathbf{10^3}$	микро	**мк**	$\mathbf{10^{-6}}$
гекто	**г**	$\mathbf{10^2}$	нано	**н**	$\mathbf{10^{-9}}$
деци	**д**	$\mathbf{10^{-1}}$	пико	**п**	$\mathbf{10^{-12}}$

Часто требуется перевести численные значения из одних единиц измерения в другие. Главное — научиться делать простые «переводы» двух видов.

1. **Из «приставочных» единиц в «бесприставочные».**

   Например, нужно перевести 5 км в значение в метрах. Лишнее тут — буква «к»; ее можно расшифровать по табл. 1:

   $$5\ \text{км} = 5 \cdot 10^3\ \text{м}.$$

2. **Из «бесприставочных» единиц в «приставочные».**

   Например, нужно перевести 6 г в значение в килограммах. Сначала следует вписать нужную букву и оставить место перед единицами:

   $$6\ \text{г} = 6 \qquad \text{кг}.$$

   Теперь нужно дописать «противоположный» множитель из табл. 1. Вписывалась буква «к», которой соответствует 10^3. Тогда дописывается 10^{-3}:

   $$6\ \text{г} = 6 \cdot 10^{-3}\ \text{кг}.$$

Такой перевод, как «км $\to$ мм», делают по двум этим правилам поочередно.

3 Механическое движение

Механическое движение — это изменение положения одного тела относительно другого тела. На рис. 1 показан опыт с движением.

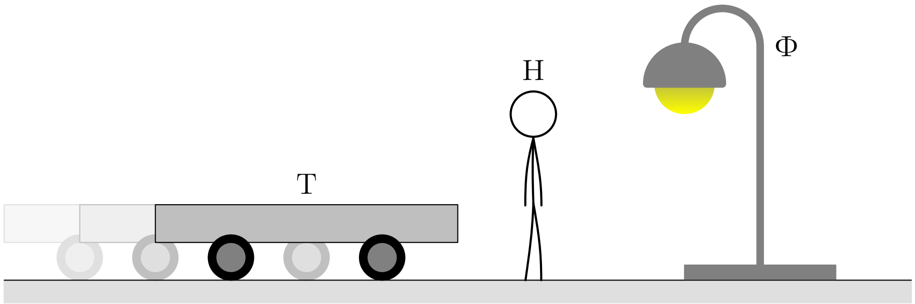

Рис. 1. К определению механического движения

Наблюдатель Н, прикрепленный к планете, сообщает, что движется тележка Т, но не фонарь Ф (его объяснение: тележка располагается все ближе и ближе). Затем наблюдатель прикрепляется к тележке, взяв с собой часы Ч и систему координат xOy (так сказать, «инструменты»); опыт повторяют (рис. 2).

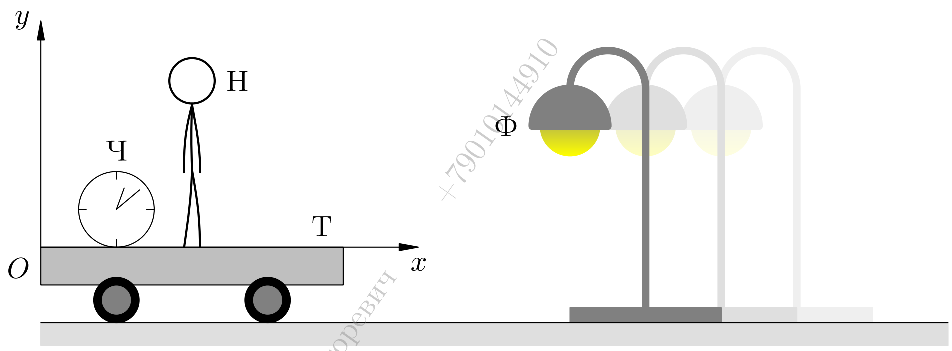

Рис. 2. Наблюдатель на тележке

Теперь наблюдатель, прикрепленный к тележке, сообщает, что движется фонарь, а не тележка (его объяснение: фонарь располагается все ближе и ближе).

Итак, всякое **движение относительно**: необходимо выбирать дополнительное тело, относительно которого проверяется, двигается ли какое-то тело, за которым следят.

Тело отсчета — это и есть то дополнительное тело, к которому прикрепляется наблюдатель, чтобы следить за «главным» телом в задаче. Например, на рис. 1 телом отсчета является планета, а на рис. 2 — тележка. Полезно *мысленно превращать себя в наблюдателя* и представлять, как двигается то или иное тело в данной ситуации.

Система отсчета — это набор «инструментов» к описанию движения тела:

- тело отсчета;
- система координат (припаянная к телу отсчета);
- часы.

На первых порах под системой отсчета можно понимать тело отсчета.

4 Основные понятия кинематики

Материальная точка — это тело, размеры которого можно не учитывать. Все остальные значимые физические свойства у таких тел присутствуют.

Так, описывая движение муравья, удаляющегося на расстояние в несколько метров от начальной точки, можно представлять себе просто движущуюся точку. Такой случай (вид сверху) показан на рис. 1.

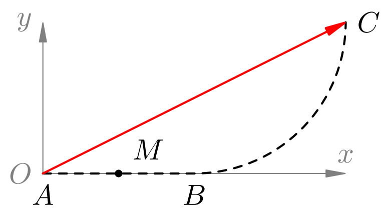

Рис. 1. Движение материальной точки

На рис. 1 муравей M (тело) двигался из точки A в точку C, пройдя точку B, вдоль штриховой линии — **траектории**.

Координаты (x, y [м]) тела показывают местонахождение тела. Например, точке A соответствуют $x_A = 0$ м и $y_A = 0$ м; точке B — $x_B > 0$ м и $y_B = 0$ м.

Путь (S [м]) — это длина траектории (следа), по которой двигалось тело. В предыдущем примере путь есть длина кривой ABC.

Перемещение ($\vec{r}$ [м])[1] — это вектор, соединяющий начальное и конечное положения тела. Красный вектор на рис. 1 есть перемещение муравья.

Время (t [с]) — это длительность процесса. Можно сказать, что время — это неотъемлемая форма мышления наблюдателя.

Теперь нужно сказать о двух важных характеристиках движения.

- **Скорость** $\left(\vec{v}\ \left[\frac{\text{м}}{\text{с}}\right]\right)$ — это характеристика движения, показывающая перемещение тела за одну секунду. Этот вектор всегда направлен по касательной к соответствующей траектории. Скорость $\vec{v}$ как бы указывает, *куда сдвинется тело через малый промежуток времени.*

- **Ускорение** $\left(\vec{a}\ \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2}\right]\right)$ — это характеристика движения, показывающая, на сколько изменяется скорость тела за одну секунду. Ускорение $\vec{a}$ как бы указывает, *куда стремится конец вектора* $\vec{v}$.

Тот же муравей снова двигается по той же самой траектории, причем на прямом участке разгоняется, а на закругленном — движется в одном темпе. На рис. 2 показаны векторы $\vec{v}$ и $\vec{a}$ в различных положениях тела M_1 и M_2.

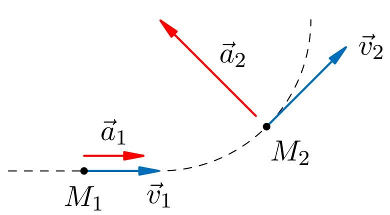

Рис. 2. Скорости и ускорения точки

[1] Строго говоря, $\Delta\vec{r}$.

5 Виды механического движения

В задачах чаще всего встречаются следующие виды механического движения *материальной точки.* (Положения тел на первых двух рисунках фиксируют ежесекундно[1].)

1. При **равномерном прямолинейном** движении тело за каждую секунду совершает одинаковое перемещение (рис. 1).

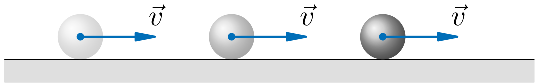

Рис. 1. $\vec{v} = \text{const} \Leftrightarrow \vec{a} = 0$

2. При **равнопеременном прямолинейном** движении за каждую секунду скорость тела изменяется одинаково (рис. 2).

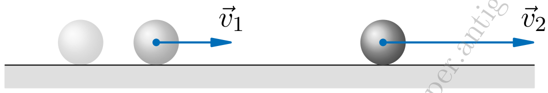

Рис. 2. $\vec{v} = \text{var}$ $(\vec{a} = \text{const})$

3. При **неравномерном** (произвольном) движении скорость и ускорение тела в общем случае меняются во времени (рис. 3; тело скатывается внутри трубы).

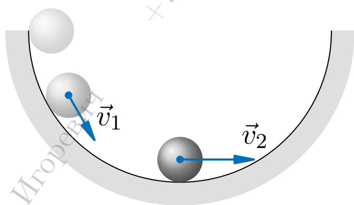

Рис. 3. $\vec{v} = \text{var}$ $(\vec{a} = \text{var})$

Для тела, размерами которого *нельзя* пренебречь, выделяют следующие возможные виды движения.

- При **поступательном** движении прямая, «впаянная» в тело, перемещается *параллельно* своему первоначальному направлению. Такой случай изображен на рис. 4, слева (скольжение параллелепипеда).

- При **непоступательном** движении «впаянная» в тело прямая движется *непараллельно* своему первоначальному направлению. Такая ситуация изображена на рис. 4, справа (качение шара).

Рис. 4. Поступательное и непоступательное движения

[1] Для наглядности на первых трех рисунках — шары (подразумевать материальные точки).

6 Формулы для прямолинейного движения

Для решения задач, где тело движется по прямой[1] (с ускорением и без), во многих случаях достаточно знания трех формул[2].

- **Перемещение**:
$$S_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}, \tag{1}$$
где v_{0x} — проекция начальной скорости.

- **Координата**:
$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}, \tag{2}$$
где x_0 — начальная координата.

- **Ускорение**:
$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{\Delta t}, \tag{3}$$
где v_x — проекция конечной скорости, Δt — промежуток времени.

Все «удобные» формулы кинематики прямолинейного движения получают из формул (1)–(3), выражая необходимую букву в подходящем уравнении. Если необходимо, формулы комбинируют, подставляя выражение для какой-то буквы из одного уравнения в другое.

Если есть умение брать производные в математике, то можно пользоваться «быстрыми» вариантами формул для нахождения скоростей и ускорений.

- Скорость:
$$v_x = x'. \tag{4}$$

- Ускорение:
$$a_x = v_x' = x''. \tag{5}$$

Штрих означает производная. В данном случае в физике производная берется по времени t (в математике обычно — по x). Таким образом, буквы под штрихами в формулах (4) и (5) следует заменять на выражения с буквами t и применять далее правила вычисления производных. Далее пример для ясности.

Пример. Пусть координата тела зависит от времени по такому закону:
$$x = 1 + 2t.$$

Тогда с помощью производных получается:
$$v_x = x' = (1+2t)' = (1)' + (2t)' = 0 + (2' \cdot t + 2 \cdot t') = (0 \cdot t + 2 \cdot 1) = 2 \text{ м/с},$$
$$a_x = v_x' = (2)' = 0 \text{ м/с}^2.$$

Такие вещи, как, например, $(1+2t)' = (1)' + (2t)'$ и $(1)' = 0$, есть применения на практике правил взятия производной (отрабатываются отдельно).

[1]Иногда также и по кривой (в том числе по параболе).
[2]Приводятся формулы в проекции на ось Ox. Для других осей аналогично.

7 Сложение и относительность скоростей

Движение тела, разумеется, можно рассматривать не только относительно планеты. На рис. 1 показан опыт с катящимся шаром по неподвижной тележке.

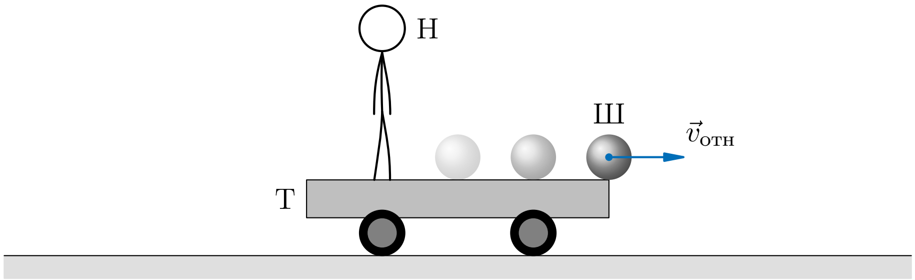

Рис. 1. Тележка покоится

Наблюдатель Н толкает шар Ш вправо и измеряет скорость шара $\vec{v}_{\text{отн}}$ относительно тележки Т. Такой толчок дал бы ту же скорость, даже если бы тележка катилась равномерно прямолинейно: ведь наблюдатель стоит на ней.

Ясно, что если шар толкают так же, а тележка движется, то расстояние пройденное шаром за то же время относительно планеты будет другим (рис. 2).

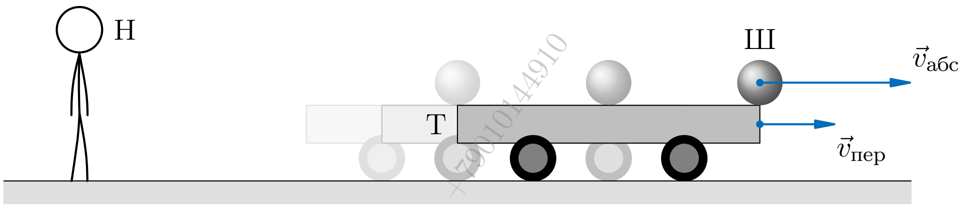

Рис. 2. Тележка движется

Шар снова толкают вправо и его скорость в системе отсчета тележки опять равна $\vec{v}_{\text{отн}}$ (на рис. 2 не показана). В этот раз тележка имеет скорость $\vec{v}_{\text{пер}}$ и как бы переносит тело. В системе отсчета планеты шар теперь двигается с некоторой скоростью $\vec{v}_{\text{абс}}$, называемой *абсолютной скоростью*. Связь трех ключевых скоростей, упомянутых ранее, дает **закон сложения скоростей**:

$$\vec{v}_{\text{абс}} = \vec{v}_{\text{отн}} + \vec{v}_{\text{пер}}, \tag{1}$$

где $\vec{v}_{\text{отн}}$ — *относительная скорость*, $\vec{v}_{\text{пер}}$ — *переносная скорость*.

Иногда решение задачи становится проще, если рассматривать движение одного тела, прикрепившись к другому. На рис. 3 красное тело догоняет синее.

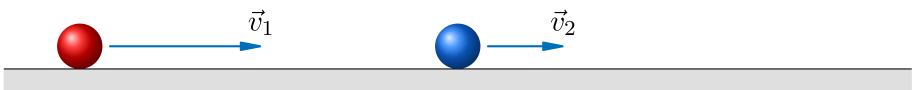

Рис. 3. Красный шар настигает синий шар

Если стоять на синем (правом) шаре, скользящем, например, без вращения, можно измерять скорость сближения — то есть **относительную скорость**:

$$\vec{v}_{12} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2, \tag{2}$$

где $\vec{v}_{12}$ — скорость первого тела относительно второго тела.

8 Средняя скорость

При неравномерном движении скорость[1] в общем случае может меняться. Это имеет место, например, при непредсказуемом движении муравья (рис. 1).

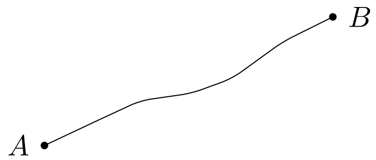

Рис. 1. Траектория муравья

Муравей двигался по кривой траектории из пункта A в пункт B со случайно изменяющейся скоростью во времени, пройдя путь $S_{\text{общ}}$ за время $\Delta t_{\text{общ}}$. Если неинтересно, как тело двигалось в малые промежутки времени, то быстроту движения можно оценить по **средней скорости**:

$$v_{\text{ср}} = \frac{S_{\text{общ}}}{\Delta t_{\text{общ}}}. \tag{1}$$

Когда что-то известно о «частях» траектории (например, сколько участков выделяют в движении), то формулу (1) можно записать так:

$$v_{\text{ср}} = \frac{S_1 + S_2 + \ldots}{t_1 + t_2 + \ldots},$$

где S_1, S_2 — пути; t_1, t_2 — промежутки времени соответствующих участков.

Можно сказать, что средняя скорость — это такая скорость, которую нужно поддерживать телу, чтобы тот же путь был пройден за то же время, что и при действительном движении.

Среднюю скорость, о которой говорилось выше, называют также *путевой*. Этим подчеркивается, что во внимание принимается именно *путь* — то есть длина какой-либо траектории. Теперь следует разобрать одну простую задачу.

Задача. Санки, двигаясь по горе, прошли в течение первой секунды движения 2 м, второй секунды — 6 м, третьей секунды — 10 м и четвертой секунды — 14 м. Найдите среднюю скорость за первые две секунды, за последние две секунды и за все время.

Решение. Движение «разбито» на 4 участка. Для первых двух можно найти:

$$v_{\text{ср}1,2} = \frac{S_1 + S_2}{t_1 + t_2} = \frac{2+6}{1+1} = 4 \text{ м/с}.$$

Для вторых двух и всех четырех аналогично:

$$v_{\text{ср}3,4} = \frac{S_3 + S_4}{t_3 + t_4} = \frac{10+14}{1+1} = 12 \text{ м/с},$$
$$v_{\text{ср}1\text{–}4} = \frac{S_1 + S_2 + S_3 + S_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} = \frac{2+6+10+14}{1+1+1+1} = 8 \text{ м/с}.$$

[1] И ускорение тоже.

9 Графики механического движения

Информация о движении часто дается в виде *графиков движения*. Все основные кинематические характеристики (перемещение, скорость и т. д.) обычно зависят от времени, что можно представить графически (то есть графиками).

Первый опыт. Две тележки красного и синего цвета с моторами устанавливают друг за другом на некотором расстоянии.

Моторы запускают, и тележки набирают скорости «мгновенно». На рис. 1 показаны графики пути, координаты и скорости тел в соответствующих цветах.

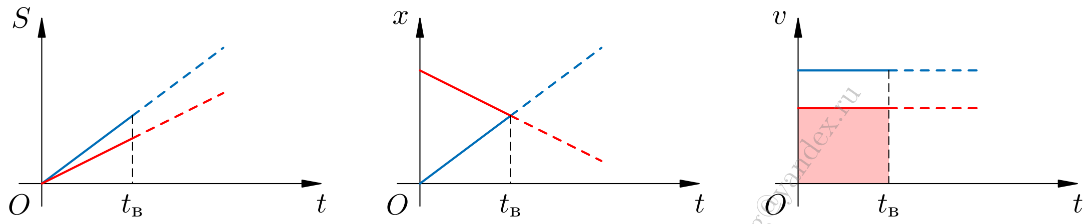

Рис. 1. Графики к первому опыту

Комментарии к рис. 1. Из графиков $S(t)$ можно видеть, что скорость синей тележки больше скорости красной — ведь синий график всегда выше. Время встречи $t_в$ определяется точкой пересечения графиков $x(t)$, из которых следует, что тела двигались навстречу друг другу. Постоянство скоростей и их различие ясно отражены на графиках $v(t)$ (о выделенной фигуре будет сказано ниже).

Второй опыт. Условия такие же, как и в первом опыте. Моторы запускают так, что *только одна* тележка набирает некоторую скорость практически мгновенно. На рис. 2 показаны графики проекции перемещения, координаты и проекции скорости тел в соответствующих цветах.

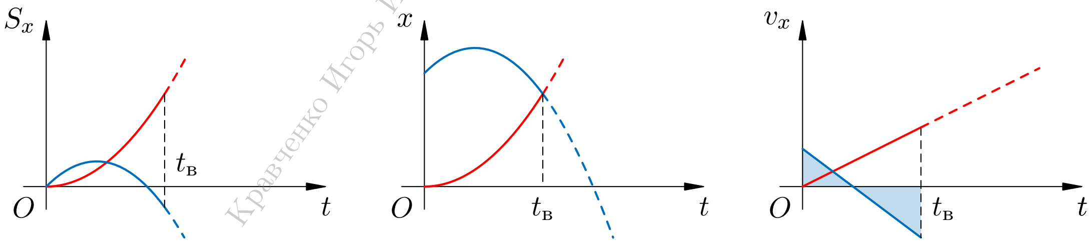

Рис. 2. Графики ко второму опыту

Комментарии к рис. 2. Из графиков $S_x(t)$ видно, что движения неравномерны; считая, что кривые являются параболами, можно заключить, что оба тела двигаются равноускоренно. Время встречи $t_в$ дается точкой пересечения графиков $x(t)$, точки пересечения которых с осью Ot показывают, когда тела находились в точке O системы координат на местности. Сравнивая наклоны графиков $v_x(t)$, можно заметить, что ускорение синей тележки больше, чем красной.

Площадь фигуры между графиком и осью Ot на диаграмме $v(t)$ или $v_x(t)$ (рис. 1, рис. 2; выделено) равна *пути*, пройденному телом за соответствующий промежуток времени.

10 Свободное падение

Свободным падением называют движение, происходящее под влиянием только планеты. Влияние планеты выражается, так сказать, в стремлении всех тел падать вниз. Происходит такое движение обычно вблизи земной поверхности — то есть поверхность считается плоской.

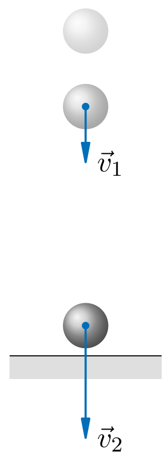

Рис. 1. Падение шара

Опыт с падением тяжелого шара на поверхность планеты показан на рис. 1 (положение тела фиксируют ежесекундно).

Из рис. 1 видно, что за каждую секунду движения скорость тела меняется на одну и ту же величину, то есть движение является равноускоренным. **Ускорение свободного падения** обозначается $\vec{g}$, оно напралено вертикально вниз (или к центру планеты).

В большинстве задач вблизи поверхности планеты ускорение $\vec{g}$ для любого тела полагают одинаковым независимо от, например, его размеров, массы и т. д.

Теперь можно рассмотреть полет тела, пущенного с начальной скоростью под некоторым углом к горизонту (рис. 2).

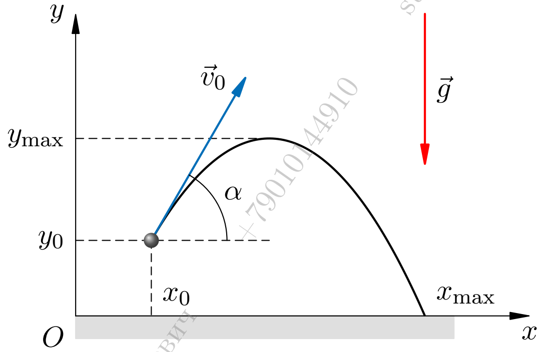

Рис. 2. Полет тела

В начальный момент времени тело находилось над поверхностью планеты в точке с координатами x_0 и y_0 и имело скорость $\vec{v}_0$, направленную под углом α к горизонту. Ускорение свободное падения $\vec{g}$ есть красный вектор на рис. 2. Можно показать, что траекторией тела в системе координат xOy является парабола (черная жирная линия на рис. 2). Конечной точкой падения будет точка пересечения траектории с планетной поверхностью — то есть с осью Ox. Полезно замечать характерные точки «следа» тела: так, точка наивысшего подъема характеризуется координатой $y_{\max}$; а точка наибольшего удаления по горизонтали — координатой $x_{\max}$.

Вот опорные уравнения для построения решений многих задач этой темы.

$$\begin{cases} x = x_0 + v_{0x}t + \dfrac{g_x t^2}{2}, \\ y = y_0 + v_{0y}t + \dfrac{g_y t^2}{2}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_x = v_{0x} + g_x t, \\ v_y = v_{0y} + g_y t. \end{cases}$$

11 Движение по окружности

Для начала следует рассмотреть движение по окружности или ее части — дуге, происходящее с *постоянной величиной скорости*.

Пусть имеется колесо от тележки (шину сняли), ось которого закрепили горизонтально. В некоторой точке на краю колеса оказался муравей (тело); колесо привели в равномерное вращение. На рис. 1 показан опыт с движением этого муравья (положения тела фиксируют ежесекундно).

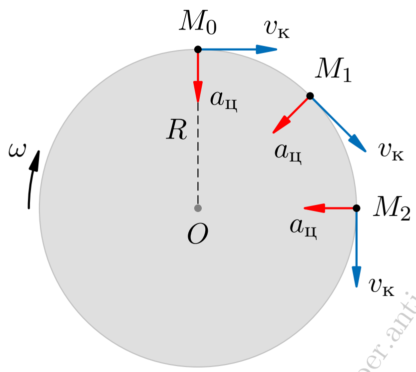

Рис. 1. Движение по окружности

Муравей (не перемещаясь относительно колеса) последовательно проходит точки M_0, M_1 и M_2, лежащие на окружности радиусом R. Тело имеет скорость $v_к$, называемую **касательной скоростью** (или *линейной скоростью*). В данном движении модуль этой скорости сохраняется.

Вращение обычно происходит *по или против часовой стрелки*. Такое движение, после которого точка оказывается в начальном положении, есть **оборот**.

Период (T [с]) — это время, за которое тело совершает 1 *оборот*. Можно видеть, что тело на рис. 1 вернется в точку M_0 через время $T = 8$ с. Вот связи периода со скоростью и числом оборотов N:

$$T = \frac{2\pi R}{v_к} = \frac{\Delta t}{N}. \tag{1}$$

Частота (ν [Гц]) — это характеристика вращения, показывающая сколько оборотов совершает точка за одну секунду:

$$\nu = \frac{1}{T}. \tag{2}$$

Угловая скорость $\left(\omega\ \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right]\right)$ — это характеристика вращения, показывающая на какой угол «поворачивается» точка за одну секунду. Скорость ω как бы указывает направление вращения точки в виде изогнутой стрелки (на рис. 1 изображена черным цветом). Формула угловой скорости:

$$\omega = \frac{\varphi}{\Delta t} = 2\pi\nu, \tag{3}$$

где φ — угол, на который «повернулась» точка.

Тело на рис. 1 имеет ускорение $a_ц$, называемое **центростремительным ускорением** (всегда направлено к центру окружности):

$$a_ц = \frac{v_к^2}{R}. \tag{4}$$

12 Основы механических передач

Механической передачей можно назвать приспособление для передачи движения от одного тела к другому.

Рис. 1. Блок

Удобнее всего передавать вращения. Поэтому общим элементом для многих механизмов является *блок* — твердый диск, способный вращаться вокруг оси, проходящей через его центр перпендикулярно его плоскости (рис. 1).

Вот основные виды механических передач.

1. **Ременная передача.** Можно считать, что движение передается от одного блока к другому посредством невесомой нерастяжимой *нити* (рис. 2).

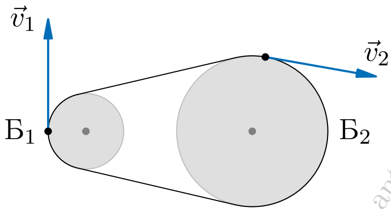

Рис. 2. Ременная передача

При отсутствии скольжения нити относительно блоков $Б_1$ и $Б_2$ соответствующие скорости их крайних точек v_1 и v_2 одинаковы: $v_1 = v_2$.

2. **Зубчатая передача.** Движение передается от одного блока к другому при помощи зацепления крайних точек (рис. 3).

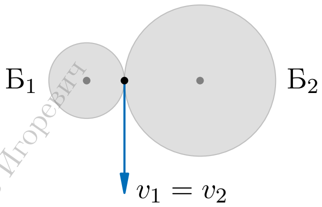

Рис. 3. Зубчатая передача

Отсутствие проскальзывания между блоками $Б_1$ и $Б_2$ для соответствующих скоростей их крайних точек дает: $v_1 = v_2$.

3. **Двойной блок.** Движение передается от одного блока к другому из-за того, что блоки жестко скреплены и насажены на общую ось (рис. 4).

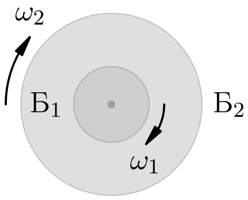

Рис. 4. Двойной блок

Блоки $Б_1$ и $Б_2$ образуют *твердое тело*, поэтому справедливо равенство их угловых скоростей ω_1 и ω_2 соответственно: $\omega_1 = \omega_2$.

Глава 2

Динамика

13 Система отсчета. Действие

Прежде всего стоит вспомнить, что *системой отсчета* (СО), попросту говоря, называется тело, к которому прикреплен *наблюдатель*. Так, на рис. 1 показаны наблюдатели, связанные с разными СО; рядом с ними происходит падение тяжелого шара (положение шара фиксируют ежесекундно).

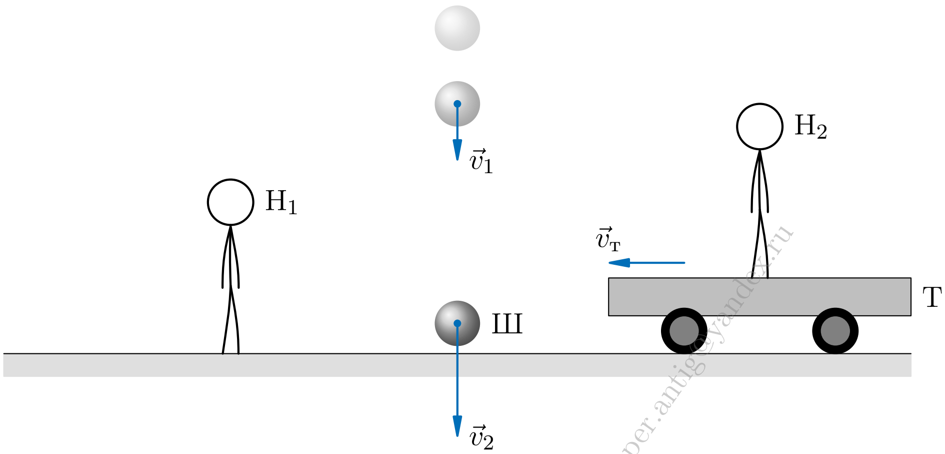

Рис. 1. Наблюдатели и падающий шар

Наблюдатель Н$_1$ стоит на поверхности планеты, а наблюдатель Н$_2$ стоит на тележке Т, движущейся с постоянной скоростью $\vec{v}_т$ относительно этой планеты. Тогда можно считать, что имеются две СО: СО «планета» и СО «тележка»[1].

Действие — это влияние одного тела, приводящее к *изменению скорости* другого тела. Можно согласиться, что шар Ш на рис. 1 главным образом подвергается влиянию планеты, поэтому его скорость и меняется.

Те же наблюдатели рассматривают уже приземлившийся шар (рис. 2).

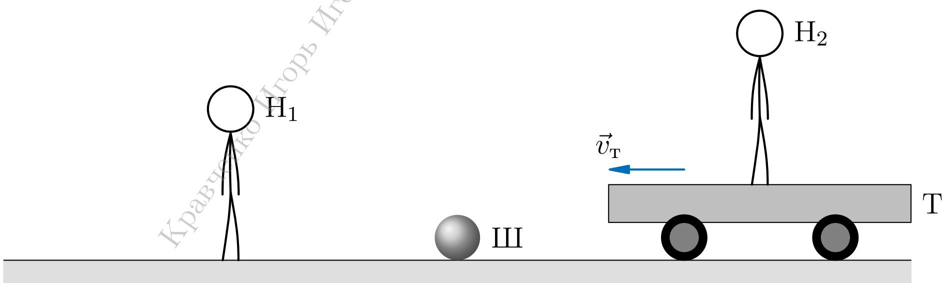

Рис. 2. Наблюдатели и неподвижный шар

На рис. 2 наблюдатель Н$_1$ фиксирует постоянную (равную нулю) скорость шара Ш, а наблюдатель Н$_2$ — постоянную ненулевую. Скорость шара неизменна, хотя и тут *воздействие планеты* на шар нельзя отрицать. Ясно, что имеется еще некоторое действие на шар со стороны *поверхности*.

Итак, тело может также одновременно испытывать влияния со стороны сразу нескольких других тел. Если же при наличии нескольких действий на тело оно *покоится* или движется *равномерно прямолинейно*, то в этом случае говорят, что эти **действия скомпенсированы**.

[1] Это «правильные» СО. Дальнейшие рассуждения справедливы для таких СО.

14 Первый закон Ньютона

Первый закон Ньютона. Существуют такие системы отсчета, относительно которых тело движется равномерно прямолинейно или покоится, если действия других тел скомпенсированы или отсутствуют.

На рис. 1 показаны наблюдатели и шар, лежащий на поверхности планеты.

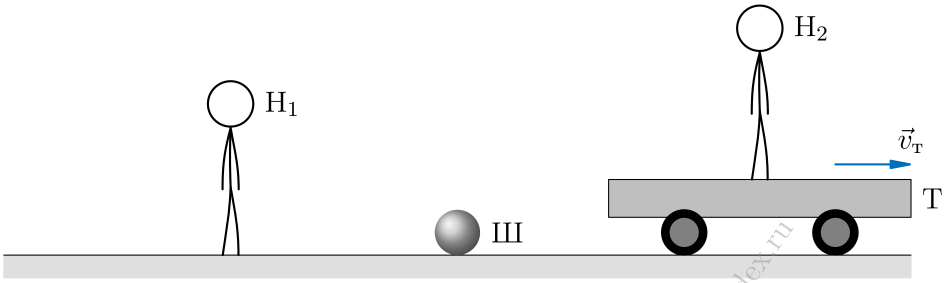

Рис. 1. Наблюдатели и неподвижный шар

Наблюдатель Н$_1$ на рис. 1 стоит на поверхности планеты; наблюдатель Н$_2$ — на тележке Т, движущейся с постоянной скоростью $\vec{v}_т$ относительно планеты.

Для наблюдателя Н$_1$ в системе отсчета (СО) «планета» на рис. 1 шар Ш покоится, а для наблюдателя Н$_2$ в СО «тележка» — движется равномерно прямолинейно. Ускорение шара в обеих СО равно нулю, и действия на шар скомпенсированы: планета притягивает вниз, поверхность отталкивает вверх. Таким образом, в обеих упомянутых СО первый закон Ньютона подтверждается; эти СО можно назвать «правильными»[1].

В физике выделяют два вида СО.

- В **инерциальной** СО первый закон Ньютона *подтверждается.*

  Пример. Планета и любая СО, двигающаяся без ускорения относительно инерциальной СО (ИСО), являются ИСО. Так, на рис. 1 наблюдатели располагаются в ИСО.

- В **неинерциальной** СО первый закон Ньютона *не подтверждается.*

  Пример. СО, двигающаяся с ускорением относительно ИСО. Например, если бы тележка на рис. 1 двигалась с ускорением $\vec{a} \neq 0$, то СО «тележка» считалась бы неинерциальной (НСО).

Инерция — это свойство тела сохранять скорость неизменной при скомпенсированных действиях или отсутствии действий со стороны других тел. Если бы в опыте на рис. 1 шар лежал на движущейся тележке, то при резком торможении тележки он бы в СО «планета» продолжил двигаться со скоростью $\vec{v}_т$, как говорят, *по инерции.*

Принцип относительности Галилея. Всякое движение при одних и тех же начальных условиях происходит одинаково в любой ИСО.

Иллюстрацией указанного принципа является следующий опыт. Если бы в ситуации, изображенной на рис. 1, наблюдатели рассматривали свободное падение шара из собственных рук, то при одинаковых «подбрасываниях» движения шара в их СО были бы неотличимы друг от друга.

[1]Такие СО называют *инерциальными.*

15 Инертность и масса

Инертность — это свойство тела оказывать сопротивление при попытках изменить его скорость. Например, среди сплошных шаров из одного материала, двигающихся с одинаковой скоростью, сложнее всего остановить самый крупный шар (рис. 1).

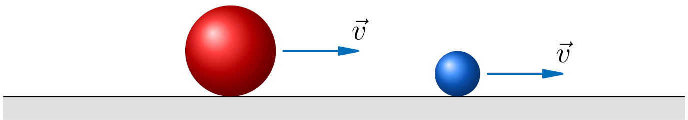

Рис. 1. Инертность красного шара больше инертности синего

Масса (m [кг]):

1) характеристика тела, показывающая количество вещества в теле;
2) характеристика тела, показывающая, как велика инертность тела.

Согласно обоим определениям массы можно заключить, что на рис. 1 масса красного шара больше, чем синего.

Плотность $\left(\rho\ \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right]\right)$ — это характеристика вещества однородного тела, показывающая массу в единице объема:

$$\rho = \frac{m}{V}. \tag{1}$$

Пусть два сплошных однородных шара, прикрепленные к легкому жесткому стержню, уравновешивают друг друга (рис. 2).

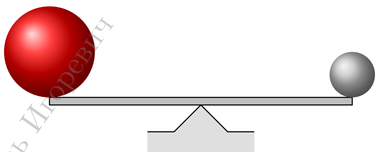

Рис. 2. Уравновешенные шары

Из рис. 2 ясно, что массы шаров одинаковы (они как бы на весах). Видно также, что объем красного шара больше, чем серого. Можно сказать, что одна и та же масса в сером шаре сосредоточна «плотнее», чем в красном — плотность серого шара больше, чем красного. (Плотности различных веществ приводятся в справочных таблицах.)

Теперь следует рассмотреть простую задачу.

Задача. Во сколько раз железный шарик тяжелее шарика такого же размера из алюминия?

Решение. Названия веществ указаны, тогда считаются известными следующие табличные величины[1]: $\rho_\text{ж} = 7800$ кг/м^3 и $\rho_\text{а} = 2700$ кг/м^3. Одинаковость размеров означает равенство объемов: $V_\text{ж} = V_\text{а}$. Тогда с учетом формулы (1)

$$\frac{m_\text{ж}}{m_\text{а}} = \frac{\rho_\text{ж} V_\text{ж}}{\rho_\text{а} V_\text{а}} = \frac{\rho_\text{ж}}{\rho_\text{а}} = \frac{7800}{2700} \approx 2{,}9.$$

[1]Данные в таблицах из разных источников могут отличаться.

16 Взаимодействие и сила

Взаимодействие — это взаимное действие двух тел друг на друга, приводящее к *изменению их скоростей* (рис. 1).

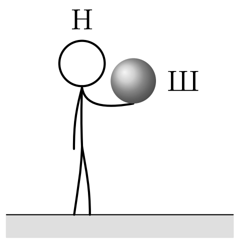

Рис. 1. Наблюдатель и шар

Из рис. 1 видно, что рука наблюдателя Н действует на шар Ш, иначе шар бы падал. С другой стороны, шар действует на руку, так как мышцы руки напряжены. Итак, в паре тел «рука-шар» происходит взаимодействие. (Однако изменения скоростей не наблюдаются из-за того, что каждое действие на данное тело компенсируется другим действием: действие руки на шар уравновешивается действием планеты, а действие шара на руку — действием мышц.)

Известны четыре типа взаимодействия в природе.

1. **Гравитационное**: массивные тела взаимно притягивают друг друга.

   Пример: планета и ее спутник.

2. **Электромагнитное**: влияния между зарядами и/или магнитами.

   Пример: два магнита.

3. **Сильное**: влияния, «удерживающие» части атомного ядра.

   Пример: протон и нейтрон.

4. **Слабое**: влияния между любыми[1] элементарными частицами.

   Пример: нейтрон и электрон.

Сила ($\vec{F}$ [Н]) — это характеристика действия, показывающая, как велико воздействие на тело.

На рис. 2 показан легкий шар в состоянии падения.

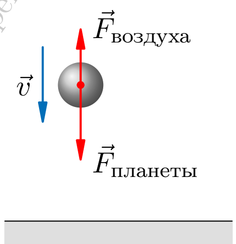

Рис. 2. Падение легкого шара

Силы, действующие на шар со стороны воздуха и планеты, обозначены красными векторами $\vec{F}_{\text{воздуха}}$ и $\vec{F}_{\text{планеты}}$ соответственно.

Принцип суперпозиции сил. Если на тело действуют силы $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \ldots$, то их можно заменить одной силой

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots \qquad (1)$$

Силу $\vec{R}$ называют **результирующей** силой или *равнодействующей* сил. Так, для шара на рис. 2 результирующая сила равна: $\vec{R}_{\text{ш}} = \vec{F}_{\text{воздуха}} + \vec{F}_{\text{планеты}}$. Из рис. 2 также можно видеть, что $F_{\text{воздуха}} < F_{\text{планеты}}$, значит — эта «суммарная» сила $\vec{R}_{\text{ш}}$ направлена вниз.

[1] Кроме фотонов.

17 Второй и третий законы Ньютона

Если результирующая сила, действующая на тело, *не равна нулю*, то в ИСО[1] тело движется с ускорением. На рис. 1 показан опыт с толканием тележки.

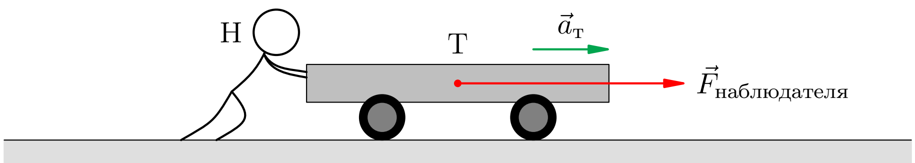

Рис. 1. Наблюдатель толкает тележку

Наблюдатель Н действует на тележку Т вправо силой $\vec{F}_{наблюдателя}$. Кроме того тележка притягивается к планете вниз силой $\vec{F}_{планеты}$ и отталкивается от поверхности вверх силой $\vec{F}_{поверхности}$; при этом $\vec{F}_{планеты} + \vec{F}_{поверхности} = 0$.

В этом случае[2] на тележку действует результирующая сила, равная $\vec{R}_т = \vec{F}_{планеты} + \vec{F}_{поверхности} + \vec{F}_{наблюдателя} = \vec{F}_{наблюдателя} \neq 0$, и тележка приобретает ускорение $\vec{a}_т$. Также наблюдатель заметил, что чем больше результирующая сила $\vec{R}_т$ — тем больше ускорение $\vec{a}_т$, причем $\vec{R}_т$ и $\vec{a}_т$ сонаправлены.

Связь *результирующей силы* с ускорением дает второй закон Ньютона.

Второй закон Ньютона. Результирующая сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на его ускорение:

$$\vec{R} = m\vec{a}. \tag{1}$$

С другой стороны, наблюдатель ощущает действие на себя со стороны тележки, которая как бы «мешает» ему двигаться вправо (рис. 2).

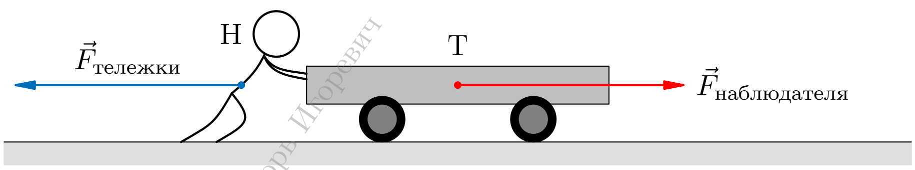

Рис. 2. Взаимодействие наблюдателя и тележки

Действительно, и тележка в рассматриваемом опыте действует на наблюдателя (сила $\vec{F}_{тележки}$) — ведь если резко «убрать» тележку, то наблюдатель устремится туда, куда происходит толкание, то есть вправо. (Вообще любые силы носят *взаимный* характер: если тело А действует на тело Б, то и тело Б действует на тело А.)

Третий закон Ньютона. Два тела действуют друг на друга с силами, равными по модулю и противоположными по направлению (при этом обе силы лежат на одной прямой):

$$\vec{F}_{1\to 2} = -\vec{F}_{2\to 1}, \tag{2}$$

где $\vec{F}_{1\to 2}$ — сила, действующая на второе тело со стороны первого; $\vec{F}_{2\to 1}$ — сила, действующая на первое тело со стороны второго.

Так, согласно третьему закону Ньютона: $F_{наблюдателя} = F_{тележки}$ (рис. 2).

[1] Инерциальная система отсчета.
[2] Под колесами гладкая поверхность.

super.antig@yandex.ru Кравченко Игорь Игоревич +7 901 014 49 10

18 Силы тяготения и реакции

Закон всемирного тяготения. Два тела массами m_1 и m_2, расположенные на расстоянии r, притягиваются друг к другу с **силой тяготения**

$$F_т = G\frac{m_1 m_2}{r^2}, \tag{1}$$

где G — *гравитационная постоянная* (см. справочные таблицы).

На рис. 1 условно изображены планета и космический корабль.

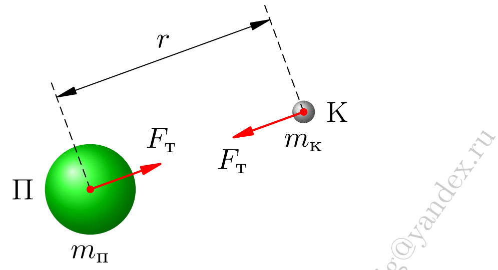

Рис. 1. Притяжение планеты и космического корабля

Планета П массой $m_п$ и корабль К массой $m_к$ расположены на некотором расстоянии r друг от друга[1]. Как и любые два тела, обладающих массой, планета и корабль *взаимодействуют* друг с другом так, что планета притягивает корабль с силой $F_т$, а корабль — планету с такой же силой $F_т$.

При свободном падении у поверхности планеты все тела движутся с одинаковым ускорением g. Тогда по второму закону Ньютона сила, действующая на тело массы m со стороны планеты и называемая **силой тяжести**, равна:

$$F_т = mg. \tag{2}$$

Вообще, сила тяжести и сила тяготения — это взаимозаменяемые термины, обозначающие одну и ту же силу *гравитационного взаимодействия*. Так, силу тяжести, действующую на тело, можно называть и силой тяготения: численное значение этой силы гравитационного притяжения от этого не поменяется[2].

Пусть теперь массивный шар покоится на поверхности планеты — то есть, как говорят, на опоре (рис. 2).

Вес ($\vec{P}$ [Н]) — это сила, действующая на опору или подвес со стороны тела (синий вектор на рис. 2). *Вес приложен к опоре (подвесу)*, а не к телу.

Сила реакции ($\vec{N}$ [Н]) — это сила, приложенная к телу со стороны опоры или подвеса (красный вектор на рис. 2).

В рассматриваемой паре тел (шар и опора) силы P и N связаны третьим законом Ньютона:

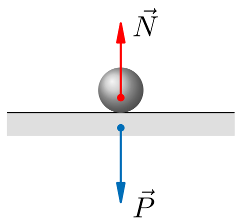

Рис. 2. Шар на опоре

$$P = N. \tag{3}$$

Следует отметить, что сила реакции и вес служат проявлением *электромагнитного взаимодействия* тел.

[1] Для однородных шарообразных тел расстояние r есть расстояние между их центрами.

[2] Приравняв правые части формул (1) и (2), можно получить формулу для ускорения свободного падения: $g = G\frac{m_{планеты}}{r^2}$.

19 Спутник

Спутник — это тело, двигающееся вокруг другого тела под действием силы тяготения.

Можно сказать, что спутником, например, Солнца является любая планета Солнечной системы, в том числе Земля. Земля, в свою очередь, также имеет собственный *естественный спутник* — Луну.

На рис. 1 условно показано круговое движение спутника вокруг планеты.

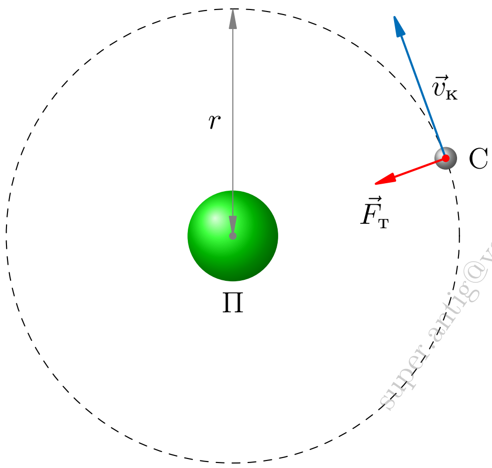

Рис. 1. Вращение спутника вокруг планеты

Спутник С, обладающий касательной скоростью $\vec{v}_{\text{к}}$, под действием силы тяготения $\vec{F}_{\text{т}}$, направленной к центру планеты П, вращается вокруг планеты, как говорят, по круговой орбите — то есть по окружности (штриховая линия)[1]. Центр этой окружности совпадает с центром планеты, расстояние r между центрами тел (радиус орбиты) не меняется. Центростремительное ускорение спутника по сути является ускорением свободного падения в месте нахождения спутника и создается силой тяготения планеты ($a_{\text{ц}} = g$).

Искусственный спутник — это спутник, созданный человеком. Для того, чтобы такой спутник смог двигаться по круговой орбите вокруг планеты *вблизи ее поверхности* (то есть высота над поверхностью $h = 0$), он должен обладать так называемой **первой космической скоростью**

$$v_{1\text{к}} = \sqrt{G\frac{m_{\text{планеты}}}{R_{\text{планеты}}}}, \tag{1}$$

где $m_{\text{планеты}}$ и $R_{\text{планеты}}$ — масса и радиус планеты соответственно.

Если скорость запущенного спутника меньше первой космической скорости, то он упадет на планету. При скорости, большей первой космической, спутник опишет эллиптическую траекторию.

Минимальная скорость, требуемая запущенному телу для удаления от планеты на бесконечность, называется **второй космической скоростью** и вычисляется по формуле:

$$v_{2\text{к}} = \sqrt{2}v_{1\text{к}}. \tag{2}$$

Так, для Земли первая космическая скорость приблизительно равна 8 км/с.

[1] В действительности траекториями движения спутников (орбитами) являются *эллипсы*.

20 Сила упругости

Деформация — это изменение формы или размеров тела. На рис. 1 изображены деформированные резиновый шар и пластилиновый брусок.

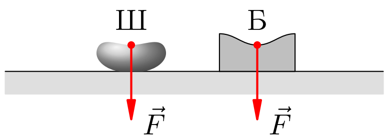

Рис. 1. Деформированные тела

Резиновый шар Ш и пластилиновый брусок Б испытывают деформации под действием некоторой внешней силы $\vec{F}$, приложенной к телам сверху.

Теперь внешние силы, деформирующие тела, сняли (рис. 2).

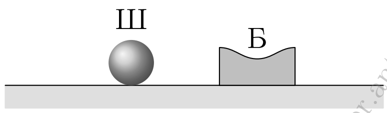

Рис. 2. Тела после снятия деформирующих сил

Как видно из рис. 2, деформации тел можно разделить на два вида.

- **Упругая** деформация исчезает после снятия деформирующего действия.
- **Неупругая** деформация сохраняется (возможно, частично) после снятия деформирующей нагрузки.

Таким образом, в рассмотренном примере в шаре возникали упругие деформации, а в бруске — неупругие.

Сила упругости ($\vec{F}_{упр}$ [Н]) — это сила, с которой упруго деформированное тело действует на соприкасающееся с ним тело, вызывающее деформацию.

Пусть на пружину положили массивный шар (рис. 3). Под действием веса шара пружина деформируется (верхняя часть пружины смещается вниз), и возникает направленная вверх сила $\vec{F}_{упр}$, удерживающая шар (остальные силы не показаны).

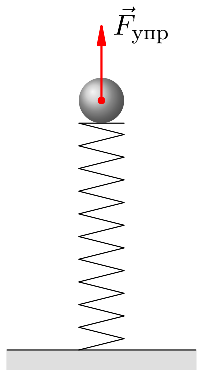

Рис. 3. Шар на пружине

Сила упругости:

- направлена в сторону, *противоположную смещению частиц* тела в процессе деформации;
- действует также *между соседними слоями* деформированного тела и приложена к каждому слою.

Закон Гука. Сила упругости прямо пропорциональна величине деформации. Так, пружина, сжатая или растянутая на величину x, действует с силой

$$F_{упр} = kx, \tag{1}$$

где k — жёсткость пружины.

Стоит отметить, что сила реакции и вес представляют собой силы упругости, которые служат проявлением *электромагнитного взаимодействия* тел.

21 Сила трения

Трение — это взаимодействие соприкасающихся тел, препятствующее их относительному движению.

Возникновение трения можно объяснить следующим образом. Соприкасающиеся поверхности тел являются шероховатыми, они усеяны микроскопическими, незаметными глазу бугорками[1] разных форм и размеров. Эти бугорки зацепляются друг за друга и мешают телам двигаться друг относительно друга.

Пусть тело покоится на шероховатой *наклонной плоскости* (рис. 1).

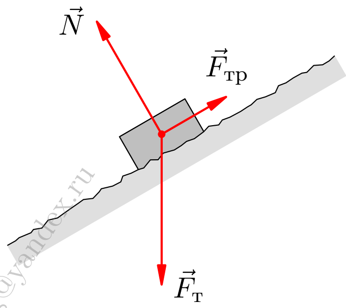

Рис. 1. Тело на наклонной плоскости

Во-первых, тело притягивается вниз к планете силой тяжести $\vec{F}_{т}$; во-вторых, на тело со стороны опоры действует сила $\vec{N}$, перпендикулярная плоскости (независимо от того, шероховатая поверхность или гладкая). Из рис. 1 видно, что в данном случае сумма сил $\vec{F}_{т} + \vec{N}$ не может быть равна нулю; и под воздействием только этих сил тело получило бы возможность соскальзывать вниз по наклонной плоскости. Однако шероховатость опоры обусловливает еще одну силу — **силу трения** $\vec{F}_{тр}$, направленную против возможного движения тела (тело «пытается» начать скользить, но трение удерживает его на месте). Сила трения всегда направлена вдоль поверхностей соприкасающихся тел и служит проявлением *электромагнитного взаимодействия* тел.

Трение между телами, происходящее без жидкой или газообразной прослойки между ними, называется **сухим трением**. Принято выделять три основных вида сил такого трения[2].

1. **Сила трения покоя** препятствует возникновению относительного движения тел:
$$F_{тр.\,п} \leqslant \mu N, \tag{1}$$
где μ — *коэффициент трения*, характеризующий шероховатость тел.

   Пример: тело покоится на шероховатой наклонной плоскости.

2. **Сила трения скольжения** препятствует проскальзыванию поверхностей тел:
$$F_{тр.\,с} = \mu N. \tag{2}$$

   Пример: тело скользит по шероховатой поверхности.

3. **Сила трения качения** препятствует перекатыванию одного тела по другому.

   Пример: тело катится по нетвердой опоре.

Можно условно считать, что между телом, движущимся в жидкости или газе, и средой, окружающей тело, также происходит трение, которое называют *сопротивлением среды*. Соответственно, против скорости тела направлена и *сила сопротивления среды*, действующая на это тело.

[1]Для наглядности на рисунке далее бугорки сильно преувеличены.

[2]Эти силы, будучи приложенными к телу со стороны шероховатой поверхности, направлены против движения (или возможного движения) тела относительно этой поверхности.

22 Давление

В ряде случаев существенно то, что силы, действующие на тела, распределены по некоторой части поверхности этих тел. На рис. 1 изображены два одинаковых бруска, покоящихся на горизонтальной поверхности.

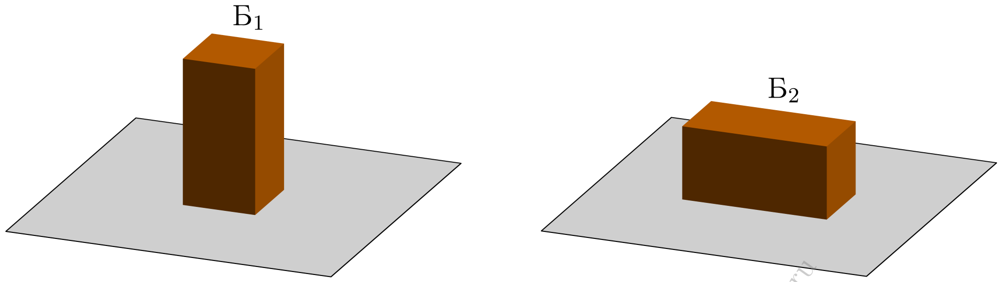

Рис. 1. Бруски на поверхности

Бруски Б$_1$ и Б$_2$ соприкасаются с опорой поверхностями площадями S_1 и S_2 соответственно ($S_2 > S_1$). При этом, так как массы брусков одинаковы, возникают одинаковые приложенные к опоре силы (вес), обозначаемые $\vec{F}$ для общего случая (рис. 2).

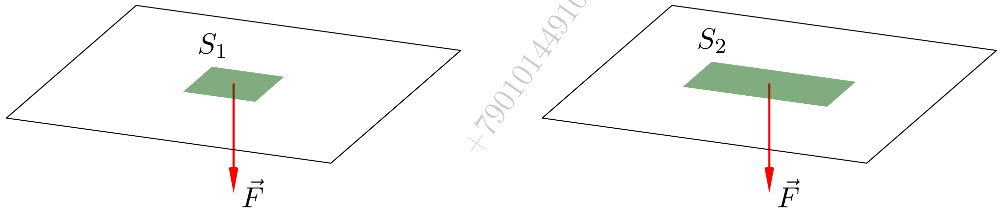

Рис. 2. Силы и соответствующие площади

Если поверхности опор достаточно мягкие, то на практике тела оставляют довольно заметные вмятины под собой. При тонких измерения «погружения» в опору брусков на рис. 1 оказывается, что глубина, на которую «вошел» брусок Б$_1$, больше соответствующей глубины для бруска Б$_2$ (несмотря на то, что силы, приложенные к опоре со стороны каждого из брусков, одинаковы, что проиллюстрировано на рис. 2!).

Давление ($P_д$ [Па])[1] — это характеристика «продавливающего» действия силы:

$$P_д = \frac{F_\perp}{S}, \tag{1}$$

где $F_\perp$ — перпендикулярная составляющая силы, действующей на поверхность площади S.

Также можно сказать, что давление — это *поверхностная плотность силы*, то есть эта величина показывает, какая сила приходится на единицу площади.

Возвращаясь теперь к рис. 2, можно видеть, что согласно формуле (1) давления P_1 и P_2, создаваемые брусками Б$_1$ и Б$_2$ соответственно, связаны следующим соотношением: $P_1 > P_2$.

[1]Подпись «д» необязательна и введена для того, чтобы не путать с весом, обозначаемым $\vec{P}$.

Глава 3

Статика

23 Момент силы

Твердое тело — это тело, размеры и форма которого не изменяются при любых воздействиях на тело. (Далее предполагается, что речь идет о твердых телах, размерами которых пренебречь нельзя.)

Вращение — это движение тела, при котором все точки этого тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной неподвижной прямой, называемой *осью вращения*. Так, если толкают дверь, то происходит ее вращение.

Пусть имеются два одинаковых массивных колеса от тележки (шины сняли), оси которых закреплены горизонтально и неподвижны; колеса приводят во вращение одинаковые силы, приложенные в разных точках этих колес (рис. 1).

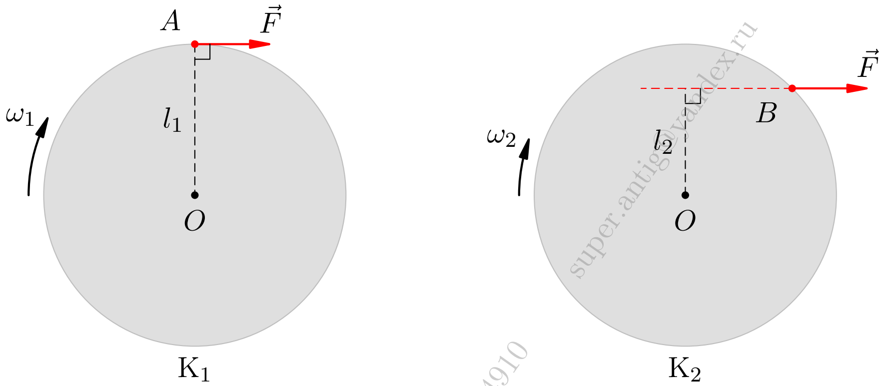

Рис. 1. Колеса приводятся во вращение

Если длительность действия сил $\vec{F}$ в точках A и B достаточно мала, то колеса $К_1$ и $К_2$ поворачиваются на незначительный угол вокруг осей вращения, проходящих через точку O. В таком случае оказывается, что угловые скорости, приобретаемые этими колесами и обозначаемые соответственно ω_1 и ω_2, различны: $\omega_1 > \omega_2$. То есть колесо $К_1$ раскручивается быстрее, чем колесо $К_2$ (хотя величины сил и расстояния от осей вращения до точек приложения силы в обоих случаях одинаковы, как видно из рис. 1!).

Следующие понятия помогают лучше разобраться с вводимой далее величиной, характеризующей раскручивающее действие силы.

- *Линия действия* силы — это прямая линия, проходящая через точку приложения силы и направленная вдоль этой силы. Часть такой линии изображена красной штриховой линией на рис. 1 (справа).
- *Плечо силы* — это длина общего перпендикуляра, проведенного от оси вращения к линии действия силы. Плечи сил, раскручивающих колеса, изображены черными штриховыми линиями и обозначены l_1 и l_2 на рис. 1.

Момент силы (M [Н·м]) — это характеристика раскручивающего действия силы:

$$M = Fl, \tag{1}$$

где l — плечо силы.

Так, с учетом формулы (1) моменты M_1 и M_2 сил, приложенных к колесам $К_1$ и $К_2$ соответственно, связаны следующим соотношением: $M_1 > M_2$.

24 Равновесие твердого тела

Равновесие — это состояние тела[1], при котором каждая его точка остается неподвижной в некоторой инерциальной системе отсчета. На рис. 1 изображена в равновесии горизонтальная длинная легкая доска, к которой приложены силы со стороны бруска, шара и опоры.

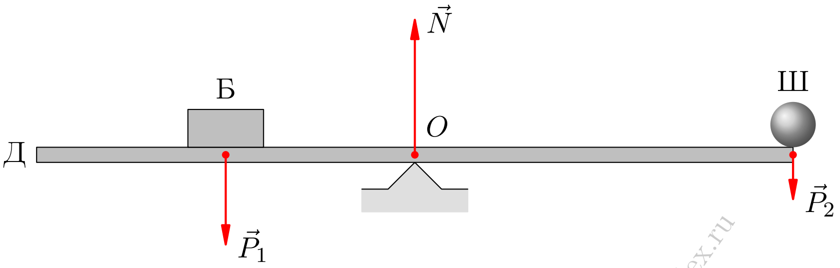

Рис. 1. Равновесие доски

Доска Д гладкая и не закреплена ни в какой точке, но установлена так, что не совершает ни поступательное, ни вращательное движение. Покоящиеся на доске брусок Б и шар Ш действуют на доску силами $\vec{P}_1$ и $\vec{P}_2$ соответственно (масса бруска больше массы шара). Со стороны опоры в точке O к доске приложена сила $\vec{N}$ (перпендикулярная одной из соприкасающихся поверхностей).

Вот **условия равновесия тела** под действием приложеных к нему сил.

1. Сумма всех составляющих («частей») сил, взятых со знаком плюс или минус, вдоль любой оси равна нулю[2]:

$$\pm F_1 \pm F_2 \pm \ldots = 0. \tag{1}$$

Знак «+» приписывают составляющей, если она сонаправлена с выбранной осью; знак «−» приписывают составляющей в противном случае.

2. Сумма всех моментов сил, взятых со знаком плюс или минус, относительно выбранной оси вращения равна нулю:

$$\pm M_1 \pm M_2 \pm \ldots = 0. \tag{2}$$

Знак «+» приписывают моменту, если его сила стремится повернуть тело, например, по часовой стрелке; в противном случае моменту приписывают знак «−». (Можно выбирать свое положительное направление вращения.)

Для удобства соотношение (1) можно называть *уравнением сил*, а соотношение (2) — *уравнением моментов*.

Условия равновесия в примере с доской на рис. 1 работают следующим образом. Так как горизонтальных сил нет, уравнение сил записывается только для вертикального направления (ось направлена, например, вверх): $N - P_1 - P_2 = 0$. Уравнение моментов относительно оси, проходящей, например, через точку O, выглядит так: $M_{P2} - M_{P1} = 0$ (момент силы N равен нулю).

[1] Далее все тела считаются твердыми — то есть недеформирующимися.

[2] Предполагается, что силы раскладывают по взаимно перпендикулярным направлениям.

25 Центр масс

В отличие от материальной точки, одно лишь равенство нулю векторной суммы всех сил, приложенных к твердому телу, не является единственным необходимым условием равновесия тела. Этот факт иллюстрируется примером, в котором длинный жесткий стержень лежит на горизонтальной гладкой поверхности и находится под действием нескольких сил (рис. 1, вид сверху).

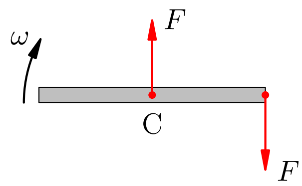

Рис. 1. Стержень не остается в покое

К стержню C приложены две равные по величине противоположно направленные силы F, лежащие в плоскости рисунка, причем линии действия сил не совпадают (*пара сил*). Силы тяжести и реакции опоры компенсируют друг друга (на рисунке не показаны).

Опыт показывает, что под действием указанных сил стержень на рис. 1 покоиться не будет — он начнет вращаться, хотя равнодействующая всех сил равна нулю. За достаточно малый промежуток времени, повернувшись на незначительный угол, тело приобретает угловую скорость ω. Однако одна точка остается неподвижной в данном случае (как будто только для этой точки результирующая сила равна нулю); именно вокруг нее и происходит вращение. Эта точка называется центром масс.

Центр масс — это точка, характеризующая распределение масс в теле. (Ведь твердое тело можно рассматривать как систему материальных точек, расстояния между которыми не меняются со временем.)

Пусть тело состоит из материальных точек массами $m_1, m_2, \ldots$, имеющих координаты $x_1, x_2, \ldots$ (по другим осям аналогично). Координаты центра масс тогда определяются по формулам:

$$x_{\text{цм}} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \ldots}{m_1 + m_2 + \ldots}, \tag{1}$$

аналогично для координат $y_{\text{цм}}$ и $z_{\text{цм}}$.

У тела простой формы центр масс совпадает с центром симметрии. Так, считая стержень на рис. 1 тонким и однородным, можно утверждать, что центр масс стержня находится в его середине (тело на рис. 1 вращается как раз вокруг этой точки).

Теорема о движении центра масс. Центр масс тела движется так же, как двигалась бы точка с массой, равной массе тела, под действием внешних сил, приложенных к телу[1].

В однородном поле тяжести ($\vec{g} = \text{const}$) центр масс тела совпадает с его **центром тяжести** — то есть точкой, к которой приложена результирующая сил тяжести, действующих на каждый элемент тела.

[1]Внешние силы — это силы, действующие на части тела со стороны других объектов, с которыми взаимодействует это тело.

26 Закон Паскаля

Твердые тела передают производимое на них давление только в направлении действия силы. Жидкости и газы (их называют средами) ведут себя иначе; в них справедлив закон Паскаля.

Закон Паскаля. Давление, оказываемое на жидкость или газ, передается в любую точку этой среды без изменения по всем направлениям.

Хорошей иллюстрацией этого закона служит опыт с прибором, называемым шаром Паскаля (рис. 1, слева).

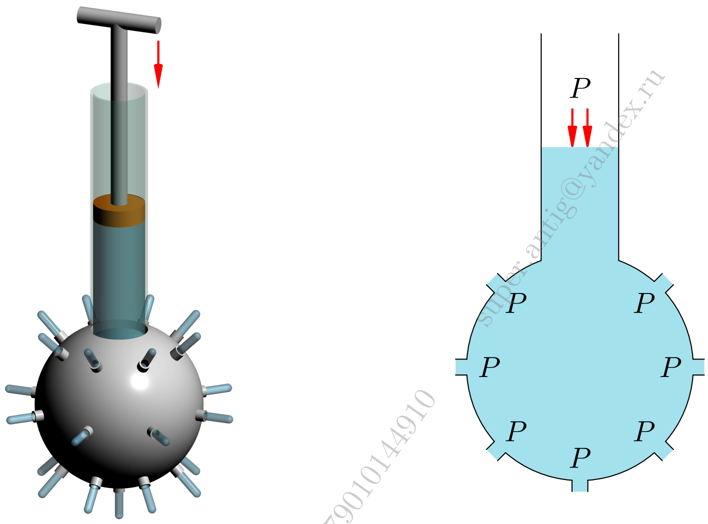

Рис. 1. Шар Паскаля

Этот прибор состоит из полого шара с отверстиями, сообщенного с цилиндрическим сосудом, в котором может перемещаться поршень с рукояткой. Если в условиях невесомости[1] наполнить прибор водой и надавить на поршень, то жидкость будет выходить из всех отверстий одинаковыми струями.

На рис. 1 (справа) показано распределение давлений в жидкости у отверстий шара Паскаля при надавливании на жидкость сверху: внешнее давление P как бы «добавляется» в каждой точке среды. Так, давление атмосферы — огромного слоя воздуха — передается во все точки на любую глубину, например, открытого водоема (*нормальное атмосферное давление* приближенно равно 10^5 Па).

Задача. В закрытом сосуде в воде плавает пузырек так, как показано справа на рис. 2. Пузырек заполнен водой и воздухом. Будет ли увеличиваться масса воды в пузырьке, если увеличить давление воздуха $P_в$ в сосуде? Почему?

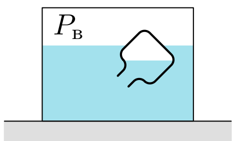

Рис. 2. К задаче

Решение. Масса воды в пузырьке может меняться за счет изменения объема воздуха в нем. Давление $P_в$ приходится сверху на сухую поверхность пузырька. Это же давление передается во все точки жидкости по закону Паскаля. Таким образом, воздух в пузырьке «обжат» со всех сторон давлением $P_в$, увеличение которого приведет к сжатию этого воздуха и увеличению количества воды в пузырьке.

[1]Закон Паскаля, однако, выполняется в любых условиях.

27 Гидравлический пресс

Гидравлический пресс — это устройство, состоящее из двух сосудов, закрытых поршнями и соединенных трубкой. В сосудах между поршнями находится жидкость (рис. 1).

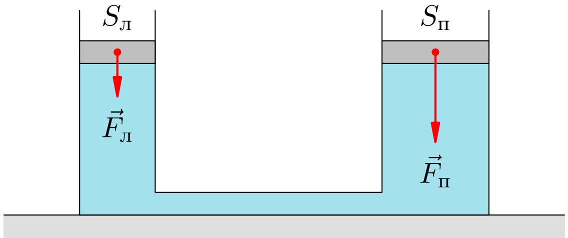

Рис. 1. Гидравлический пресс

Пусть гидравлический пресс установлен на горизонтальной опоре, а высоты столбов жидкости в сосудах одинаковы. Если, например, к левому поршню площадью $S_л$ приложена некоторая сила $\vec{F}_л$, направленная вниз, то под ним в жидкости возникнет давление $P_л$. Это давление будет передано согласно закону Паскаля в любую точку жидкости, в том числе — под правый поршень (давление $P_п$). Для равновесия всей системы необходимо, чтобы и на правый поршень площадью $S_п$ действовала некоторая сила $\vec{F}_п$, направленная так же вниз. Вот связь давлений в гидравлическом прессе:

$$P_л = P_п, \tag{1}$$

где $P_л$ и $P_п$ — давления под левым и правым поршнем соответственно.

Так, в примере на рис. 1, если считать площади поршней неодинаковыми ($S_п > S_л$), с учетом определения давления и формулы (1) силы $F_л$ и $F_п$ связаны следующим соотношением: $F_п > F_л$.

Формулу (1) используют при решении многих стандартных задач этой темы.

Задача. Два сообщающихся сосуда с различными поперечными сечениями (рис. 2) наполнены водой. Площадь поперечного сечения у узкого сосуда в 100 раз меньше, чем у широкого. На поршень A поставили гирю весом 10 Н. Какой груз надо положить на поршень B, чтобы оба груза находились в равновесии? (Весом поршней и трением пренебречь.)

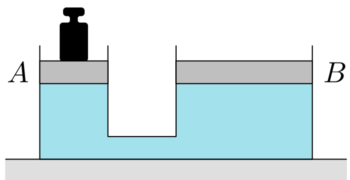

Рис. 2. К задаче

Решение. Удобно (на первых порах — обязательно) начать с «уравнения гидравлического пресса» (1): в данном случае $P_A = P_B$. Далее можно опираться на это уравнение: с учетом определения давления $\dfrac{F_A}{S_A} = \dfrac{F_B}{S_B}$. Ясно, что в последнем равенстве известна сила $F_A = 10$ Н, известно и соотношение площадей $\dfrac{S_B}{S_A} = 100$ (поршень A узкий). Значит из этого уравнения можно выражать и вычислять силу F_B, требуемую для покоя жидкости: $F_B = \dfrac{S_B}{S_A} \cdot F_A = 100 \cdot 10 = 1000$ Н. Теперь осталось вычислить массу на поршне B (интуитивно понимая, что сила обусловлена тяжестью груза): $m_B = \dfrac{F_B}{g} = \dfrac{1000}{10} = 100$ кг.

28 Давление в жидкости

Действие силы тяжести на жидкость приводит к тому, что внутри этой среды создается так называемое *гидростатическое давление*[1]. Это давление действует на любое тело или его часть, находящиеся внутри данной среды.

Пусть имеется ряд сосудов разной формы, в которые налита жидкость. Сосуды прикреплены к одинаковым возвышенностям горизонтальной опоры (рис. 1).

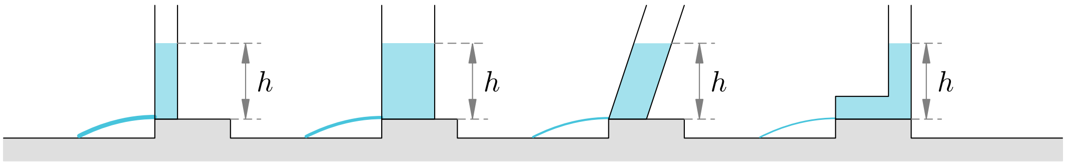

Рис. 1. Сосуды с жидкостью

Каждый сосуд на рис. 1 заполнен разным количеством жидкости плотностью $\rho_с$ (плотность среды) до высоты h. В вертикальной стенке у дна в этих сосудах проделаны достаточно малые отверстия разного диаметра. Жидкости вытекают из сосудов тонкими струями.

Оказывается, что в ситуации, показанной на рис. 1, дальности полета всех струй равны между собой. В данном случае этот факт косвенно указывает на то, что давления в жидкости у отверстий во всех сосудах одинаковы. Опыт показывает, что гидростатическое давление прямо пропорционально плотности среды $\rho_с$, ускорению свободного падения g и глубине h.

Давление в жидкости, находящейся в покое, рассчитывают по формуле:

$$P_ж = \rho_с g h + P_{атм}, \tag{1}$$

где $\rho_с g h$ — гидростатическое давление, $P_{атм}$ — атмосферное давление.

К примеру, если заткнуть отверстия в сосудах на рис. 1, то давления в любых точках жидкости в сосудах можно вычислять по формуле (1).

Сообщающиеся сосуды — это сосуды, соединенные между собой в нижней части трубкой.

Пусть в открытые сообщающиеся сосуды, изображенные на рис. 2, налиты вода и бензин, обозначенные светло-голубым и бледно-желтым цветом соответственно.

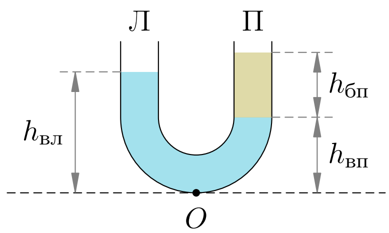

Рис. 2. Сообщающиеся сосуды

Можно сказать, что вода и бензин плотностей $\rho_в$ и $\rho_б$ устанавливаются в виде двух изогнутых столбов Л и П, примыкающих друг к другу в точке O, относительно которой можно записать связь давлений в сообщающихся сосудах:

$$P_л = P_п, \tag{2}$$

где $P_л$ и $P_п$ — давления со стороны левого Л и правого П столба.

Так, в примере на рис. 2 «формула сообщающихся сосудов» (2) дает: $\rho_в g h_{вл} + P_{атм} = \rho_в g h_{вп} + \rho_б g h_{бп} + P_{атм}$; где $h_{вл}$ и $h_{вп}$ — «высоты» воды в левом и правом столбе, $h_{бп}$ — «высота» бензина в правом столбе (как видно, давление $P_{атм}$ можно исключать из этого равенства, если сообщающиеся сосуды открытые).

[1] Аналогично в газах создается аэростатическое давление.

29 Закон Архимеда

Некоторые тела, помещенные в жидкость[1], не тонут. В таких случаях сила тяжести уравновешивается какой-то другой силой, действующей на тело со стороны жидкости. Эта сила называется *выталкивающей* или *архимедовой* силой и действует на любое тело, погруженное в жидкость или газ целиком или частично.

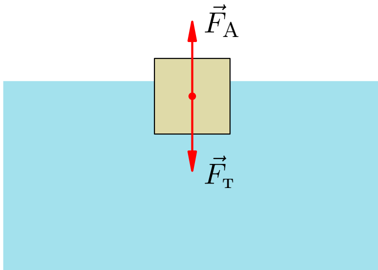

Рис. 1. Куб на плаву

На рис. 1 изображен деревянный куб, покоящийся на поверхности воды; сила тяжести равна так называемой силе Архимеда: $F_{\text{т}} = F_{\text{А}}$.

Закон Архимеда. На погружённое (возможно, частично) в жидкость или газ тело действует выталкивающая сила, равная весу среды, объём которой вытеснило тело:

$$F_{\text{А}} = P_{\text{выт. с}}, \tag{1}$$

где $P_{\text{выт. с}}$ — вес вытесненной среды. (Силы связаны третьим законом Ньютона.)

Можно заметить, что вес вытесненной среды в рассматриваемых условиях есть $P_{\text{выт. с}} = \rho_{\text{с}} g V_{\text{выт}}$; где $\rho_{\text{с}}$ — плотность среды, $V_{\text{выт}}$ — вытесненный объем. Тогда сила Архимеда равна:

$$F_{\text{А}} = \rho_{\text{с}} g V_{\text{выт}}. \tag{2}$$

Плавание — это состояние тела, при котором оно не тонет в жидкости (или газе), будучи погруженным в нее. На рис. 2 показаны три погруженных в воду шара одинакового размера, сделанных из разных материалов.

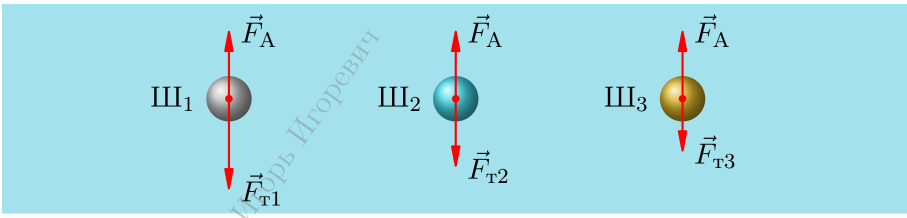

Рис. 2. Шары в воде

На примере с шарами Ш$_1$, Ш$_2$ и Ш$_3$ плотностей ρ_1, ρ_2 и ρ_3 соответственно, которые вначале покоятся в жидкости плотности $\rho_{\text{с}}$, можно проиллюстрировать три возможных движения тела после погружения в некоторую среду.

1. Шар Ш$_1$ сделан из бетона: $F_{\text{т1}} > F_{\text{А}}$ или $\rho_1 > \rho_{\text{с}}$. Этот шар тонет.

2. В шаре Ш$_2$ вода, обурнутая легкой тонкой пленкой: $F_{\text{т2}} = F_{\text{А}}$ или $\rho_2 = \rho_{\text{с}}$. Этот шар остается в покое.

3. Шар Ш$_3$ деревянный: $F_{\text{т3}} < F_{\text{А}}$ или $\rho_3 < \rho_{\text{с}}$. Этот шар всплывает. Он придет в равновесие у поверхности жидкости, частично погрузившись в нее.

Условие плавания тела можно записать в виде неравенства: $\rho \leqslant \rho_{\text{с}}$, где ρ — плотность тела.

[1]Далее считается, что среда (жидкость или газ) покоится у поверхности планеты.

Глава 4

Законы сохранения

30 Импульс

Импульс $\left(\vec{p}\ \left[\frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}}\right]\right)$ — это величина, характеризующая «толкающую» способность движущегося тела:

$$\vec{p} = m\vec{v}. \tag{1}$$

Рассматривая сразу несколько тел, можно говорить об импульсе *системы тел*:

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \ldots, \tag{2}$$

где $\vec{p}_1, \vec{p}_2, \ldots$ — импульсы первого, второго и так далее тел.

Пусть два крепких упругих шара быстро сталкиваются и разлетаются над поверхностью планеты так, как показано на рис. 1.

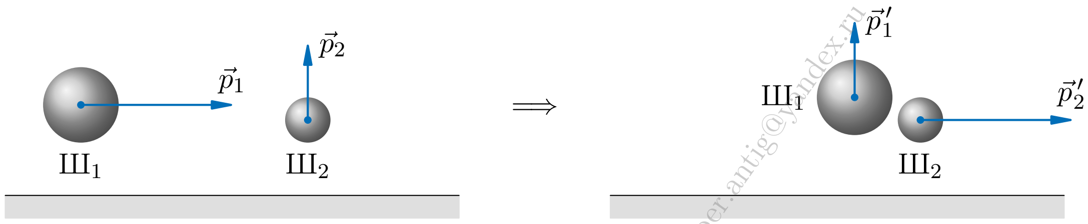

Рис. 1. Столкновение шаров

Система тел состоит из шаров Ш$_1$ и Ш$_2$. До столкновения (рис. 1, слева) импульс системы равен $\vec{p}_1 + \vec{p}_2$, после соударения (рис. 1, справа) импульс системы равен $\vec{p}\,'_1 + \vec{p}\,'_2$. В этом опыте выполняется следующий закон.

Закон сохранения импульса. Импульс системы тел остается постоянным при любых воздействиях на эту систему в двух случаях:

1) результирующая сил, действующих на систему, равна нулю;
2) импульс системы тел не меняется значительно за время воздействия[1].

$$\vec{p}_{\text{до}} = \vec{p}_{\text{после}}, \tag{3}$$

где $\vec{p}_{\text{до}}$ и $\vec{p}_{\text{после}}$ — импульсы системы тел до и после взаимодействия тел.

Удар шаров на рис. 1 быстрый, поэтому для них закон сохранения импульса с учетом формулы (2) дает уравнения с составляющими импульса по горизонтали и по вертикали соответственно: $p_1 = p'_2$, $p_2 = p'_1$.

В случаях 1 и 2, удовлетворяющих закону сохранения импульса, систему тел можно называть *замкнутой*.

Если система тел *не замкнута*, то использовать указанный закон можно только для составляющих импульсов той оси, вдоль которой выполняются условия 1 и 2. (Предполагается, что силы и импульсы раскладывают по одним и тем же взаимно перпендикулярным направлениям.)

Изменение импульса можно вычислить по следующей формуле:

$$\Delta\vec{p} = \vec{R}\cdot\Delta t, \tag{4}$$

где $\vec{R}$ — результирующая сила, приложенная к телу или системе ($\vec{R} = \text{const}$).

[1] Это следует обычно из условия задачи. Время взаимодействия полагают достаточно малым, так чтобы *внешние силы* не успели изменить импульс системы. Однако некоторые силы (чаще всего это *силы реакции*) способны изменить импульс системы за сколь угодно малый промежуток времени: тогда пользоваться этой общей формулировкой закона нельзя.

31 Работа. Простые механизмы

Работа (A [Дж]) — это характеристика «разгоняющего» действия силы:

$$A = Fr\cos\alpha, \tag{1}$$

где r — перемещение точки приложения силы (строго говоря, Δr), α — угол между векторами силы и перемещения. (Если направление силы в процессе движения меняется, но угол α на малых перемещениях остается постоянным, то работа равна: $A = FS\cos\alpha$, где S — путь точки приложения силы.)

Мощность (N [Вт]) — это быстрота совершения работы:

$$N = \frac{A}{t}. \tag{2}$$

Простым механизмом называют механическое устройство для преобразования силы. На рис. 1 представлены примеры таких механизмов.

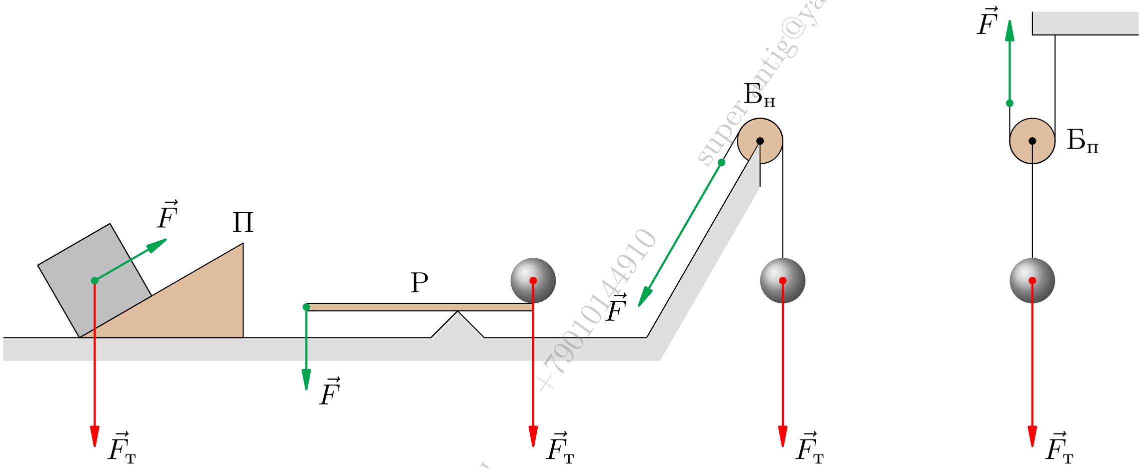

Рис. 1. Простые механизмы

Простые механизмы (обозначены светло-коричневым цветом) используются для совершения *полезного процесса* (в данном случае подъема массивных куба и шаров). Зеленый вектор $\vec{F}$ — сила, приложенная к механизму[1] (*затраченная сила*); красный вектор $\vec{F}_т$ — сила тяжести, действующая на груз.

1. Гладкая закрепленная **наклонная плоскость** П позволяет получить выигрыш в силе: $F < F_т$. Меняется также направление необходимого усилия.

2. Невесомый **рычаг** Р — это твердое тело, способное вращаться вокруг неподвижной точки в одной плоскости. Он также позволяет получить выигрыш в силе: $F < F_т$. Направление необходимого усилия меняется.

3. Гладкий **неподвижный блок** Б$_н$ — колесо с желобом — с пропущенной по желобу нитью выигрыша в силе не дает ($F = F_т$), но этот блок позволяет изменить направление прикладываемого усилия.

4. Невесомый **подвижный блок** Б$_п$ — колесо с желобом, способное перемещаться в своей плоскости, — с помощью двух нитей в наиболее выгодном положении (рис. 1, справа) дает выигрыш в силе ($F < F_т$).

[1] В случае *наклонной плоскости* силу прикладывают к телу, установленному на нее.

32 КПД механизма

Механизмы применяют для совершения так называемого *полезного действия* — то есть процесса, ведущего к желаемому результату. Так, полезными действиями считают подъем строительной плиты или разгон автомобиля.

Реальные, например, простые механизмы имеют вес, а их соприкасающиеся части не являются гладкими. Из-за этого приходится затрачивать определенные усилия на подъем самих механизмов и преодоления трения в них. Об эффективности механизма принято говорить в терминах работы.

Пусть необходимо поднять груз (тело) на заданную высоту. Предлагается использовать для этого *шероховатую* наклонную плоскость (рис. 1, слева).

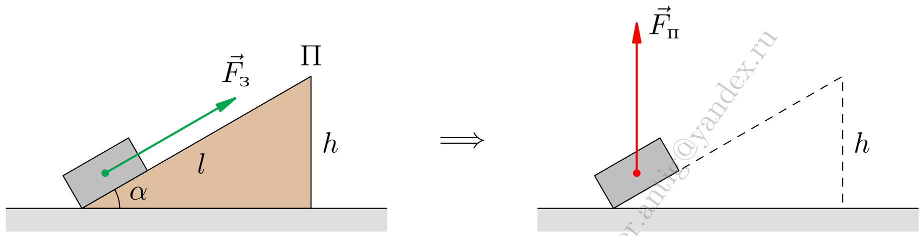

Рис. 1. Подъем груза с помощью наклонной плоскости и без нее

Для анализа механизма проводят два опыта: совершают полезное действие посредством механизма и без него[1]. Так, в рассматриваемом примере сначала тело равномерно передвигают вдоль наклонной плоскости с углом α на расстояние l, и груз оказывается таким образом на высоте h (рис. 1, слева). Затем тело равномерно поднимают на высоту h без механизма (рис. 1, справа).

Удобно выделить две расчетные силы (зеленый и красный вектор на рис. 1). Сила $F_з$ — это *затраченная сила*, то есть та сила, которую необходимо приложить к механизму (к телу на механизме) для совершения полезного действия. Сила $F_п$ — это *полезная сила*, то есть та сила, которую необходимо приложить к телу без использования механизма для совершения полезного действия.

Соответственно можно различать работы указанных сил.

- **Затраченная работа** $A_з$ есть работа затраченной силы при совершении полезного действия.
- **Полезная работа** $A_п$ есть работа полезной силы при совершении полезного действия.

Коэффициент полезного действия (КПД) (η) — это характеристика эффективности устройства:

$$\eta = \frac{A_п}{A_з}. \tag{1}$$

Так, в примере на рис. 1 тело под действием силы $F_з$ перемещается на расстояние l, а под действием силы $F_п$ — на расстояние h. Тогда с учетом формулы работы для рассматриваемого случая КПД плоскости равен: $\eta = \dfrac{F_п h}{F_з l}$; где с учетом уравнений сил: $F_з = mg\sin\alpha + \mu mg\cos\alpha$, $F_п = mg$.

КПД любого реального устройства всегда меньше 1.

[1] Процессы проводят мысленно. Важно также исключить, так сказать, «лишнее действие»: например, на разгон строительной плиты при подъеме идет бесполезная трата силы и т. п.

33 Энергия

Энергия (E [Дж]) — это величина, характеризующая способность тела совершить работу.

Например, движущееся тело А способно привести в движение некоторое покоящееся тело Б: при столкновении сила, действующая со стороны тела А на тело Б, совершает работу по разгону тела Б. Тогда говорят, что тело А до столкновения обладает **кинетической энергией** — то есть энергией движения:

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}. \tag{1}$$

Теперь пусть имеются, к примеру, неподвижные шар на горке и сжатая пружина, изображенные на рис. 1.

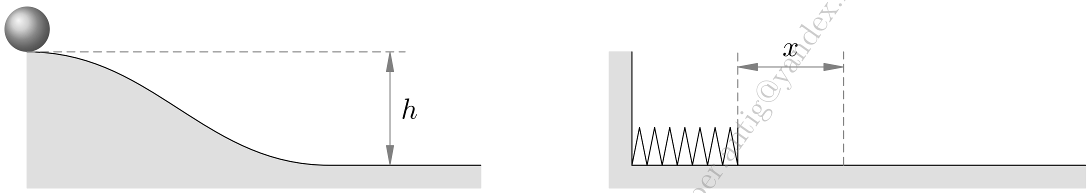

Рис. 1. Шар на горке и сжатая пружина

Шар на рис. 1 (слева), находящийся на гладкой горке, после небольшого отклонения может набрать скорость, соскользнув с возвышенности высоты h, и совершить работу по разгону другого тела. Тогда говорят, что шар массы m на высоте h обладает **потенциальной энергией** тяжести — то есть энергией, обусловленной притяжением тела и планеты[1]:

$$E_{\text{п}} = mgh. \tag{2}$$

Сжатая на величину x легкая пружина на рис. 1 (справа), разжимаясь, также может совершить работу по разгону другого тела. Тогда считают, что пружина жесткости k с деформацией x обладает **потенциальной энергией** упругости — то есть энергией, обусловленной упругим взаимодействием частей пружины:

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}. \tag{3}$$

Работа силы тяжести, как и силы упругости, не зависит от формы траектории, по которой перемещается точка приложения силы — это так называемые *потенциальные силы*.

Теорема о кинетической энергии. Работа, совершенная результирующей силой, действующей на тело, равна изменению кинетической энергии тела:

$$A_R = \Delta E_{\text{к}}.$$

Теорема о потенциальной энергии. Работа потенциальной силы равна изменению соответствующей потенциальной энергии со знаком минус:

$$A_{\text{п}} = -\Delta E_{\text{п}}.$$

[1]Формула справедлива в том случае, когда тело находится вблизи поверхности планеты (то есть высота h много меньше радиуса планеты).

34 Сохранение и изменение энергии

Полная механическая энергия (E [Дж]) — это сумма кинетической и потенциальной энергии тела[1]:

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}}. \tag{1}$$

Закон сохранения полной механической энергии. Если на тело (в системе тел) не действуют силы трения и внешние силы, то полная механическая энергия тела (системы) сохраняется[2]:

$$E_1 = E_2 = \ldots, \tag{2}$$

где E_1 и E_2 — полные механические энергии в первом и втором состояниях.

Пусть, например, вначале шар покоится на горке, и сжатая пружина с приставленным к ней бруском неподвижна (рис. 1).

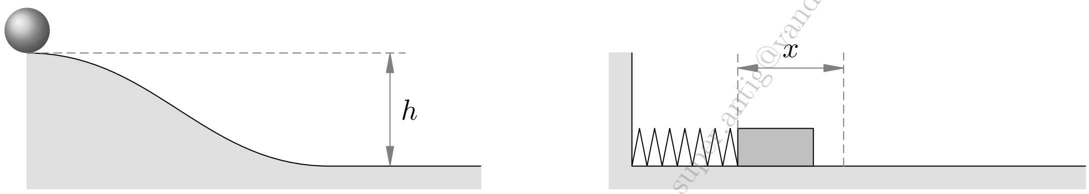

Рис. 1. Начальные положения шара и сжатой пружины с бруском

Покоящийся шар (рис. 1, слева) массы $m_{\text{ш}}$ на высоте h обладает в начальном положении полной механической энергией $E_{\text{ш}1} = m_{\text{ш}}gh$. Неподвижная система тел «пружина-брусок» (рис. 1, справа) с деформацией x легкой пружины жесткости k обладает вначале полной механической энергией $E_{\text{пб}1} = \dfrac{kx^2}{2}$.

Пусть рассматриваемые тела изменили свое положение. Соскользнув без трения с горки на горизонтальную поверхность, шар приобрел скорость $v_{\text{ш}}$, и его полная механическая энергия стала равна $E_{\text{ш}2} = \dfrac{m_{\text{ш}}v_{\text{ш}}^2}{2}$. Пружина возвращаясь в недеформированное состояние, привела в движение соприкасающийся с ней на гладкой поверхности брусок массы $m_{\text{б}}$, который приобрел скорость $v_{\text{б}}$; тогда полная механическая энергия этой системы равна $E_{\text{пб}2} = \dfrac{m_{\text{б}}v_{\text{б}}^2}{2}$.

Так, для рассмотренного процесса с шаром соотношение (2) дает: $E_{\text{ш}1} = E_{\text{ш}2}$ или $m_{\text{ш}}gh = \dfrac{m_{\text{ш}}v_{\text{ш}}^2}{2}$ (аналогично для системы «пружина-брусок»).

Если же на тело (в системе тел) действуют силы трения и/или внешние силы, то справедлив следующий закон.

Закон изменения полной механической энергии. Работа *непотенциальных сил*[3], действующих на тело (в системе тел), равна изменению полной механической энергии тела (системы):

$$A_{\text{н.с}} = \Delta E. \tag{3}$$

[1]Для системы тел — сумма кинетических и потенциальных энергий тел системы.

[2]Вообще говоря, этот закон справедлив в случае равенства нулю суммы работ сил трения и внешних сил: $A_{\text{тр}} + A_{\text{внеш}} = 0$.

[3]Под непотенциальными силами здесь можно понимать силы трения и внешние силы, тогда работа непотенциальных сил равна $A_{\text{н.с}} = A_{\text{тр}} + A_{\text{внеш}}$.

Глава 5

Механические колебания и волны

35 Механические колебания

Механические колебания — это движение тела, повторяющееся во времени около положения равновесия (далее для краткости — *колебания*).

Одно полное колебание — это такое движение, после которого тело первый раз *оказывается в начальном положении, имея в нем те же скорость и ускорение* (рассматриваются *незатухающие* колебания). *Период* (T [с]) есть время одного полного колебания[1].

На рис. 1 показаны несколько положений колеблющегося на пружине шара и график его движения (положение тела фиксируют ежесекундно).

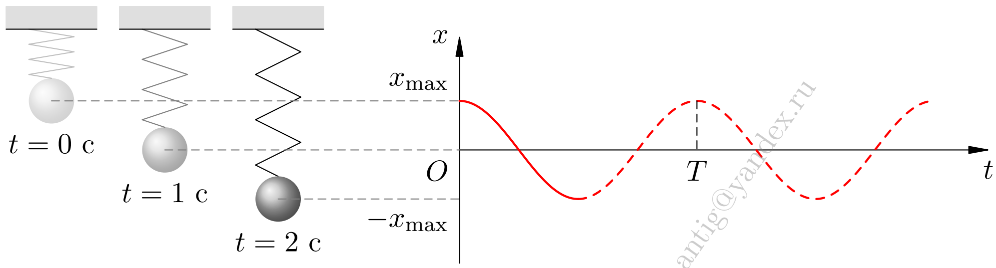

Рис. 1. Колебания шара

Система тел (рис. 1, слева) находится вблизи планеты, трения нет. Покоящийся массивный шар, смещенный вверх от положения равновесия на величину x_{max}, при $t = 0$ с начинает разгон вниз из координаты x_{max}. К моменту времени $t = 1$ с разгон окончен, и шар оказывается в положении равновесия $x = 0$; с этого момента начинается торможение двигающегося вниз шара. В момент $t = 2$ с шар останавливается в координате $-x_{max}$; далее характер движения шара подобен уже рассмотренному процессу, но перемещается шар теперь вверх.

На диаграмме $x(t)$ (рис. 1, справа) сплошной линией показан график изменения координаты тела в рассмотренном промежутке времени; штриховая линия описывает зависимость $x(t)$ при бóльших значениях t. На этом графике отмечен момент времени T, при котором тело возвращается в начальное положение: *за время T (период) тело проходит путь в четыре x_{max} (четыре амплитуды).*

При точных построениях (и малых деформациях пружины) форма графика на рис. 1 (справа) указывает, что шар совершает гармонические колебания.

Гармонические колебания — это колебания, при которых координата тела меняется во времени по закону *косинуса* (или *синуса*):

$$x = x_{max}\cos(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где x_{max} — *амплитуда колебаний*, то есть наибольшее отклонение от положения равновесия (наибольшее значение координаты); $(\omega t + \varphi)$ — *фаза* колебания; ω — *циклическая частота* (или *круговая частота*); φ — *начальная фаза*[2].

К проекциям скорости и ускорения тела при колебаниях можно перейти через производные по времени (пример для проекций на ось Ox):

$$v_x = x', \quad a_x = v_x'. \quad (2)$$

[1] Связи величин в колебаниях аналогичны связям одноименных величин, описывающих движение по окружности: например, $\nu = \dfrac{1}{T}$ или $\omega = 2\pi\nu$.

[2] Циклическая частота есть скорость изменения фазы. Фаза и циклическая частота измеряются в рад и рад/с соответственно (рад или радиан — единица измерения угла: $180^\circ = \pi$ рад).

36 Маятники

Маятник — это тело, способное колебаться около неподвижной точки. На рис. 1 изображены шарик и брусок, выведенные из положения равновесия.

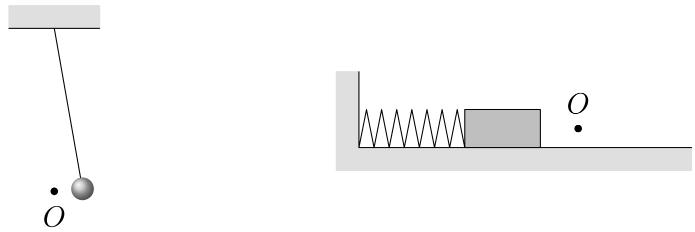

Рис. 1. Маятники

Математическим маятником (или *нитяным маятником*) называют подвешенное на легкой нерастяжимой нити небольшое тело (рис. 1, слева). В изображенной ситуации этот маятник может совершать колебания около точки O — то есть около положения его равновесия. При малых колебаниях, когда отклонения маятника от положения равновесия малы по сравнению с длиной нити, период колебаний математического маятника равен:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \tag{1}$$

где l — длина нити, g — ускорение свободного падения.

Пружинным маятником называют закрепленное на пружине тело (рис. 1, справа). В проиллюстрированной ситуации этот маятник также способен колебаться около положения равновесия (точка O). Если величина деформации пружины много меньше ее размеров, то колебания малы; тогда период колебаний пружинного маятника равен:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \tag{2}$$

где m — масса тела, k — жесткость пружины.

Колебания шара на нити и бруска на пружине, рассмотренные выше, предполагались *свободными*; это значит, что в этих системах тел (*колебательных системах*) отсутствовали периодические внешние воздействия и внутренние источники энергии, поддерживающие колебания. Частота[1] свободных колебаний системы называется *собственной частотой* и обозначается $\nu_\text{с}$. Следует отметить, что наличие трения в реальных колебательных системах приводит к тому, что свободные колебания постепенно *затухают* — колебания прекращаются.

Колебания называют *вынужденными*, если они происходят под воздействием внешней силы, периодически изменяющейся во времени (эту силу называют *вынуждающей силой*). При этом частота установившихся вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы, обозначаемой ν.

Резонанс — это явление *возрастания амплитуды вынужденных колебаний*, когда частота вынуждающей силы равна (возможно, приблизительно) собственной частоте системы:

$$\nu = \nu_\text{с}. \tag{3}$$

[1] *Частота* (ν [Гц]) есть число полных колебаний тела за одну секунду: $\nu = 1/T$.

37 Механическая волна

Механическая волна — это распространение колебаний частиц в упругой среде (твёрдой, жидкой или газообразной). Выделяют два вида волн.

1. **Поперечная**: частицы среды колеблются *перпендикулярно* направлению распространения волны (распространяется только в *твердых средах*). Такая волна показана на рис. 1; направление колебаний слоев (вертикальных рядов частиц) перпендикулярно *скорости волны* $\vec{v}$.

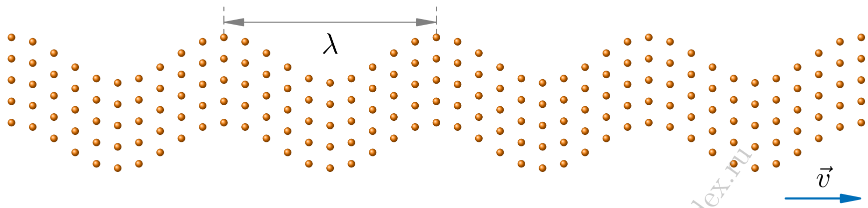

Рис. 1. Поперечная волна

2. **Продольная**: частицы среды колеблются *параллельно* направлению распространения волны. Такая волна показана на рис. 2; направление колебаний слоев (вертикальных рядов частиц) параллельно скорости волны $\vec{v}$.

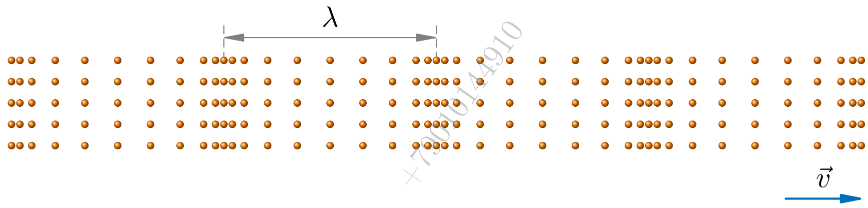

Рис. 2. Продольная волна

Длина волны (λ [м]) — это расстояние, на которое распространяется волна за период колебаний:

$$\lambda = vT. \tag{1}$$

Длина волны λ в поперечной волне равна расстоянию между *соседними* горбами или впадинами (рис. 1). В продольной волне λ есть расстояние также между *соседними* сжатиями или разрежениями (рис. 2).

Звук — это механическая волна в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц. Ниже этого диапазона лежит область *инфразвука*, выше — область *ультразвука*.

Вот основные характеристики звука.

- **Громкость** звука определяется *амплитудой* колебаний. Так, при колебаниях струн (рис. 3) громкость струны Б больше, чем громкость струны А (что видно по «размаху»).
- **Высота** звука определяется *частотой* колебаний. Например, в опыте на рис. 3 при различии только в длинах струн звук струны Б кажется выше, чем звук струны А.

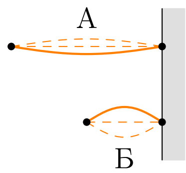

Рис. 3. Струны

Скорость звука в твердых телах больше, чем в жидкостях, а в жидкостях — больше, чем в газах. Следует отметить, что *частота* звука при переходе из одной среды в другую не меняется и определяется частотой источника звука. Сказанное относится к любым механическим волнам.

Часть II

Молекулярная физика. Термодинамика

Глава 6

Молекулярная физика

38 Основные понятия молекулярной физики

Молекула — это наименьшая частица вещества. Например, капля воды состоит соответственно из определенных молекул — то есть частиц, сохраняющих химические свойства воды. Иначе, одна молекула воды — это наименьшее количество воды, которое можно взять. С помощью *химических реакций* молекулу разлагают на еще меньшие частицы, называемые атомами. Так, молекула воды H_2O состоит из трех атомов (рис. 1; атомы изображены в виде шаров).

Атом — это наименьшая *химически неделимая* частица вещества. Так, молекулу можно разделить на атомы, из которых посредством *химических превращений* можно «собрать» вещество. Но если делить сам атом, то получившиеся части не годятся для построения какого-либо вещества с точки зрения *химии*.

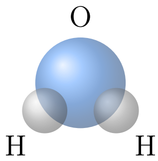

Рис. 1. Молекула H_2O

Разновидностей атомов (то есть *химических элементов*) сравнительно немного — все они сведены в таблицу Менделеева. Например, молекула воды H_2O состоит из двух атомов водорода H и одного атома кислорода O (рис. 1).

Молекулярно-кинетическая теория (МКТ) строения вещества основывается на трех утверждениях.

1. Вещество состоит из частиц — молекул[1]. Они расположены на расстояниях друг от друга.

2. Молекулы постоянно беспорядочно движутся (*тепловое движение*).

3. Молекулы взаимодействуют друг с другом, так что они притягиваются или отталкиваются.

На рис. 2 изображены модели трех тел, «собранных» из молекул.

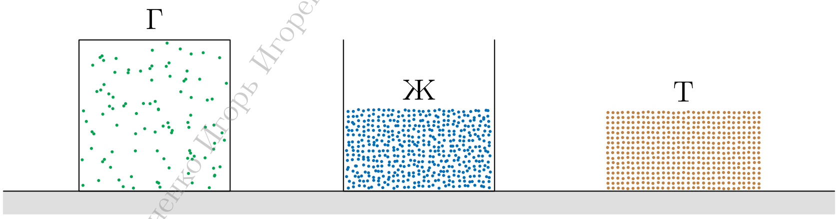

Рис. 2. Модели трех тел

Вещества тел Г, Ж и Т находятся в разных *агрегатных состояниях*. Речь идет о следующих трех состояниях вещества.

1. **Газообразное** тело Г не имеет собственные объем и форму.

2. **Жидкое** тело Ж сохраняет объем, но не форму.

3. **Твердое** тело Т характеризуется собственными объемом и формой.

Твердые тела подразделяют на *кристаллические* и *аморфные*. В кристаллических телах частицы вещества упорядочены в пространстве (тело Т на рис. 2). В аморфных телах частицы не располагаются в определенном порядке (внутренняя структура аналогична структуре тела Ж на рис. 2).

[1]Или из атомов, что далее подразумевается.

39 Диффузия. Броуновское движение

Диффузия — это взаимное проникновение контактирующих веществ друг в друга. На рис. 1 (слева) изображена красная капля, помещенная на поверхность воды (тела представлены как набор молекул).

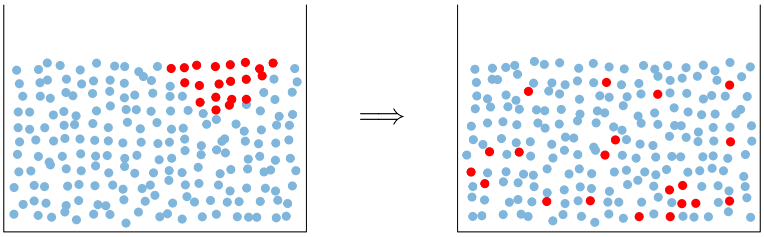

Рис. 1. Диффузия в жидкости

Вначале жидкая растворимая капля располагается в верхней правой части воды (рис. 1, слева). Вследствие непрерывного хаотического движения (теплового движения) молекулы жидкостей в стакане перемешиваются друг с другом и равномерно распределяются по всему объему смеси (рис. 1, справа). При диффузии вещество стремится распространяться во все стороны, поэтому в рассмотренном опыте начальное положение капли в воде не имеет значения.

Диффузия наблюдается в телах с любым агрегатным состоянием вещества: в жидкостях она происходит медленнее, чем в газах, но быстрее, чем в твердых телах.

Броуновским движением называют непрерывное беспорядочное движение *крупинок*, взвешенных в жидкости или газе[1]. На рис. 2 изображена траектория такого движения в воде некотрой крупинки, наблюдаемой в микроскоп.

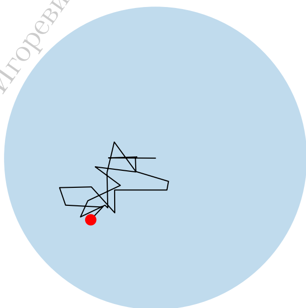

Рис. 2. Броуновское движение

Красная крупинка (броуновская частица) на рис. 2 в начале наблюдения находилась в центре голубой области. С течением времени броуновская частица описывает сложную зигзагообразную траекторию. Такое движение вызвано толчками окружающих молекул жидкости (или газа), которые в силу хаотичности движения молекул приводят к непредсказуемым результирующим воздействиям на крупинку.

Диффузия и броуновское движение являются опытными подтверждениями непрекращающегося беспорядочного движения молекул (атомов) вещества.

[1] Под крупинкой здесь понимают тело очень малого размера (около 10^{-6} м). Это так называемая *броуновская частица*. Для сравнения: средний диаметр молекулы порядка 10^{-10} м.

40 Основные формулы молекулярной физики

В молекулярной физике рассматриваются *макроскопические* тела — то есть тела, состоящие из огромного числа частиц[1]: например, даже в одном грамме воды содержится порядка 10^{22} молекул. Для удобства описания таких тел с учетом их внутреннего строения вводят следующие величины.

- **Число Авогадро** $\left(N_{\text{А}}\ \left[\dfrac{1}{\text{моль}}\right]\right)$ — это число частиц, содержащееся в такой порции вещества, которой удобно пользоваться на практике (эта порция носит название «моль»). Моль любого вещества содержит одно и то же число частиц, которое в настоящее время принимают приближенно равным $N_{\text{А}} \approx 6 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$.

- **Количество вещества** (ν [моль]) — это количество порций по $N_{\text{А}}$ частиц, образующих данное тело.

- **Молярная масса** $\left(M\ \left[\dfrac{\text{кг}}{\text{моль}}\right]\right)$ — это масса порции из $N_{\text{А}}$ частиц данного вещества (или, как говорят, масса одного моля этого вещества). Молярные массы химических элементов можно узнать из таблицы Менделеева: следует взять атомную массу (число возле номера элемента) из ячейки данного элемента и умножить на 10^{-3} — получится значение в кг/моль. Например, в ячейке железа у его порядкового номера стоит число 56 (округленно); это значит, что молярная масса железа (одноатомное вещество) равна $56 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

  Для определения молярной массы вещества, молекулы которого состоят из нескольких атомов, нужно суммировать молярные массы. Например, молярная масса воды H_2O равна $1 \cdot 10^{-3} \cdot 2 + 16 \cdot 10^{-3} = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Число частиц в теле с учетом определения количества вещества можно вычислять по формуле:

$$N = \nu N_{\text{А}}. \tag{1}$$

Масса вещества с учетом определения молярной массы рассчитывается так:

$$m = \nu M, \tag{2}$$

или, обозначая массу частицы через m_0:

$$m = N m_0. \tag{3}$$

Плотность, как известно из механики, находится по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V}. \tag{4}$$

Концентрация $\left(n\ \left[\dfrac{1}{\text{м}^3}\right]\right)$ — это характеристика тела, показывающая число частиц в единице объема:

$$n = \frac{N}{V}. \tag{5}$$

[1]Обычно речь идет о молекулах или атомах, что предполагается далее.

41 Формулы для идеального газа

Состояние любого макроскопического тела[1] можно описать так называемыми *макроскопическими параметрами* (*макропараметрами*) — величинами, относящимся ко всему телу, а не к его частицам. Важнейшими макропараметрами являются давление, объем и температура.

Температура (T [K]) — это мера подвижности частиц тела (обусловленной их тепловым движением). Более точно, температура есть мера *средней кинетической энергии* частиц тела.

Для практических задач удобно говорить об **абсолютной температуре** в *кельвинах* (K), ноль которой соответствует прекращению теплового движения частиц вещества. Вот связь абсолютной температуры T и температуры t в *градусах Цельсия* (°C):

$$T = t + 273. \tag{1}$$

Идеальный газ — это *физическая модель*[2], использующаяся для описания разреженных газов, когда расстояния между их частицами намного больше размеров самих частиц. Данная модель предполагает следующие допущения: 1) частицы газа считаются материальными точками, 2) частицы не взаимодействуют друг с другом на расстоянии, 3) столкновения частиц считают абсолютно упругими. (Везде далее газ считается идеальным.)

Из законов механики выводится формула для давления газа — так называемое **основное уравнение МКТ**:

$$P = \frac{1}{3} m_0 n v^2, \tag{2}$$

где m_0 — масса одной частицы, n — концентрация газа, v — *средняя квадратичная скорость* частицы.

Также можно говорить о **средней кинетической энергии**, приходящейся на одну частицу, так как частицы газа движутся:

$$E_{\text{к}0} = \frac{m_0 v^2}{2}. \tag{3}$$

Связь **средней квадратичной скорости** и температуры дается формулой:

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}, \tag{4}$$

где k — *постоянная Больцмана* (значение указано в справочных таблицах).

Давление газа связано с температурой так (подстановка (4) в (2)):

$$P = nkT. \tag{5}$$

Уравнение Менделеева—Клапейрона дает связь трех важнейших величин, характеризующих состояние газа, — давления, объема и температуры:

$$PV = \nu RT, \tag{6}$$

где $R = kN_{\text{A}}$ — *универсальная газовая постоянная* (см. справочные таблицы).

Уравнение Менделеева—Клапейрона называют *уравнением состояния газа*.

[1] Тело, состоящее из огромного числа частиц.

[2] Физическая модель — это упрощенный аналог физической системы (процесса), сохраняющий ее главные черты.

42 Закон Да́льтона

В природе и в технике очень часто имеют дело со *смесью* нескольких газов[1]. Например, воздух — это смесь азота, кислорода, аргона, углекислого газа и других газов.

Пусть имеется смесь двух газов в сосуде (рис. 1).

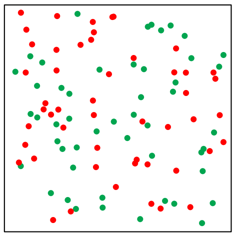

Рис. 1. Два газа в сосуде

Газы на рис. 1 имеют одинаковую температуру. Молекулы газов для наглядности окрашены — можно говорить как бы о зеленом и красном газах. Их смесь оказывает на стенки давление, обозначаемое $P_{\text{зк}}$. В любой смеси газов каждый из газов ведет себя независимо от других газов, то есть зеленый и красный газы в предложенном примере можно рассматривать по отдельности в данном сосуде (рис. 2).

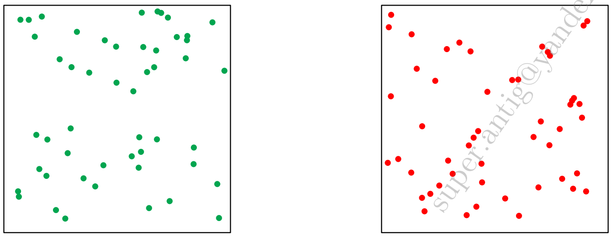

Рис. 2. Газы по отдельности

На рис. 2 (слева) из сосуда удалены все газы кроме зеленого; оставшийся газ производит давление, обозначаемое $P_{\text{з. см}}$ (подпись «см» напоминает, что у данного газа такое же состояние, какое он имеет в смеси). Аналогично, на рис. 2 (справа) в сосуде оставили только красный газ, производящий давление $P_{\text{к. см}}$.

Парциальное давление — это давление, которое производил бы выбранный газ, входящий в состав смеси, если удалить остальные газы из сосуда. Таким образом, в рассматриваемой ситуации с зеленым и красным газами их давления $P_{\text{з. см}}$ и $P_{\text{к. см}}$ — это парциальные давления.

Закон Да́льтона. Давление смеси газов есть сумма их парциальных давлений:

$$P_{\text{см}} = P_{1\,\text{см}} + P_{2\,\text{см}} + \ldots, \tag{1}$$

где $P_{1\,\text{см}}, P_{2\,\text{см}}, \ldots$ — парциальные давления первого, второго и так далее газов.

Так, для ситуации, проиллюстрированной рисунками 1 и 2, уравнение (1) дает: $P_{\text{зк}} = P_{\text{з. см}} + P_{\text{к. см}}$.

Теперь можно разобрать стандартную задачу на смеси газов.

Задача. Соединенные краном сосуды с газами под давлением 100 и 600 кПа имеют объемы 2 л и 3 л соответственно. Какое установится давление, если кран открыть? Температура постоянна.

Решение. Парциальные давления дает уравнение Менделеева—Клапейрона: $P_{1\,\text{см}} = \dfrac{\nu_1 RT}{V_{\text{см}}} = \dfrac{P_1V_1}{V_{\text{см}}} = 40$ кПа и $P_{2\,\text{см}} = \dfrac{\nu_2 RT}{V_{\text{см}}} = \dfrac{P_2V_2}{V_{\text{см}}} = 360$ кПа. Давление смеси по закону Да́льтона равно: $P_{\text{см}} = P_{1\,\text{см}} + P_{2\,\text{см}} = 400$ кПа.

[1]Везде далее газы считаются идеальными.

43 Изопроцессы

Процесс — это переход газа[1] из одного состояния в другое. Состояние газа определяется его количеством вещества (ν), давлением (P), объёмом (V) и температурой (T); эти параметры связаны друг с другом уравнением Менделеева—Клапейрона. В дальнейшем подразумевается, что процессы проводят с одним и тем же газом (то есть $\nu = \text{const}$).

Изопроцесс — это процесс, в котором значение одного из макропараметров (P, V или T) остается неизменным. На рис. 1 изображены три сосуда с одинаковыми газами, у которых поддерживаются постоянными разные параметры.

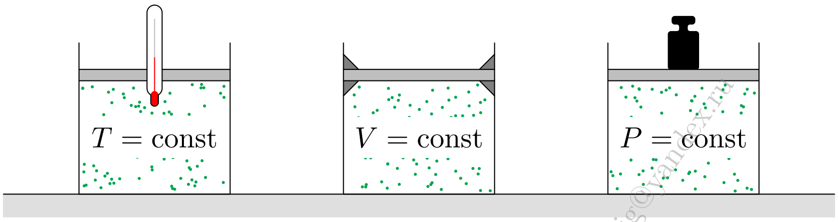

Рис. 1. Газы с разными фиксированными параметрами

Трем случаям, проиллюстрированным на рисунке, соответствуют три вида изопроцессов.

1. **Изотермический** процесс (рис. 1, слева) идет при постоянной температуре газа: $T = \text{const}$. График[2] такого процесса называется *изотермой*. На рис. 2 (слева) изображены две изотермы газа с разными температурами на PV-диаграмме: *чем выше температура, тем дальше от начала O системы лежит соответствующая изотерма.*

2. **Изохорный** процесс (рис. 1, посередине) идет при постоянном объеме газа: $V = \text{const}$. График такого процесса — *изохора*. На рис. 2 (посередине) изображены две изохоры газа с разными объемами на PT-диаграмме: *чем больше объем, тем ближе к оси T лежит соответствующая изохора.*

3. **Изобарный** процесс (рис. 1, справа) идет при постоянном давлении газа: $P = \text{const}$. График такого процесса есть *изобара*. На рис. 2 (справа) изображены две изобары газа с разными давлениями на VT-диаграмме: *чем больше давление, тем ближе к оси T лежит соответствующая изобара.*

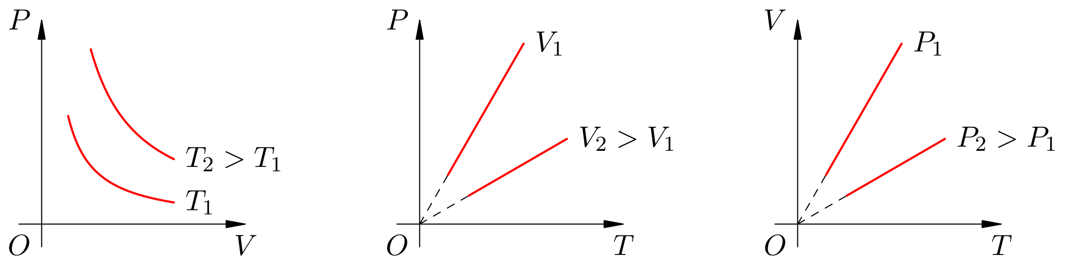

Рис. 2. Графики изопроцессов

[1] Более точно, макроскопического тела.

[2] Графики зависимости одного параметра от другого в изопроцессах получены с использованием уравнения Менделеева—Клапейрона.

44 Пар

Все жидкости[1] имеют способность улетучиваться. Например, количество воды в открытом стакане с течением времени, как известно, уменьшается. Частицы жидкости не исчезают бесследно — они образуют невидимый пар.

Пар — это газ, образованный частицами жидкости, покинувшими ее. В примере с открытым стаканом с водой вылететь из жидкости с ее *свободной поверхности* могут некоторые частицы, имеющие достаточную скорость, чтобы преодолеть силы притяжения к соседним частицам (жидкость испаряется).

Испарение — это процесс превращения жидкости в пар, происходящий со свободной поверхности жидкости. *Испарение любой жидкости происходит постоянно при любой температуре.*

Частица пара через некоторое время может вернуться обратно в жидкость — пар конденсируется. **Конденсация** — это процесс превращения пара в жидкость. Конденсация пара есть процесс, обратный испарению жидкости.

Пусть имеются два закрытых сосуда с водой и ее паром (рис. 1).

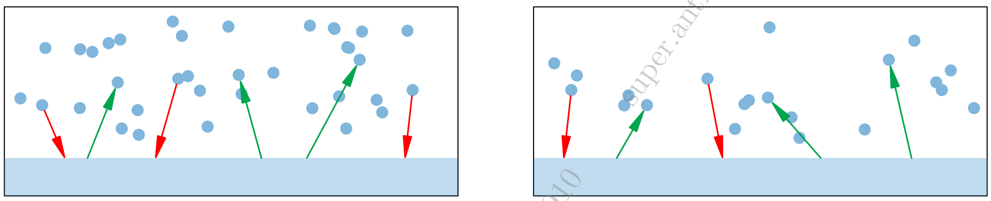

Рис. 1. Пары над жидкостью в сосудах

Зеленые стрелки показывают процессы покидания частицей жидкости; красные стрелки показывают обратные процессы. Соответственно примерам, проиллюстрированным рисунком, можно выделить два вида паров.

1. **Насыщенный** пар (рис. 1, слева) находится в *динамическом равновесии* со своей жидкостью: число частиц вылетающих из жидкости *равно* числу возвращающихся в нее за то же время. Пар *не может* вместить в себя больше частиц (как бы максимально «наполнен» ими).

   Например, насыщенным будет пар над жидкостью, которая долгое время находится в закрытом сосуде.

2. В системе из **ненасыщенного** пара (рис. 1, справа) и его жидкости испарение преобладает над конденсацией: число частиц вылетающих из жидкости *превышает* числу возвращающихся в нее за то же время. Такой пар *может* вместить в себя еще больше частиц.

   К примеру, ненасыщенным можно считать пар над жидкостью, которую только что налили в сухой сосуд и закрыли.

Давление ($P_{\text{н. п}}$) и плотность ($\rho_{\text{н. п}}$) насыщенного пара, например, воды — это максимальные давление и плотность, которые может иметь водяной пар при данной температуре. Эти параметры однозначно определяются *только* температурой; они сведены в справочные таблицы для насыщенных паров. Учитывая сказанное, состояние пара можно приближенно описывать уравнением Менделеева—Клапейрона.

[1] А также твердые тела.

45 Влажность воздуха

Воздух, в котором присутствует водяной пар, называют *влажным*. На рис. 1 изображены два закрытых сосуда с одинаковым количеством воды.

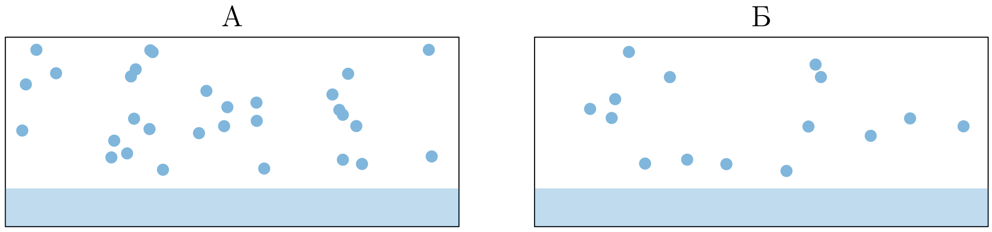

Рис. 1. Пары воды в сосудах

В сосуде А вода находится уже долгое время — в следствие испарения пар воды над ней успел стать насыщенным. Сосуд Б закрыли только что, налив перед этим воду, так что пар над ней можно считать еще ненасыщенным. Температуры и объемы паров в сосудах полагаются одинаковыми; разумеется, над жидкостью есть также и воздух (на рисунке не показан).

На примере двух сосудов с влажным воздухом (рис. 1) можно показать, как с помощью обычно двух величин характеризуют содержание водяного пара в воздухе, то есть его *влажность*.

1. **Абсолютная влажность** $\left(\rho_{\text{п}} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right]\right)$ — это *плотность* водяного пара в воздухе:
$$\rho_{\text{п}} = \frac{m_{\text{п}}}{V_{\text{п}}}, \tag{1}$$
где $m_{\text{п}}$ и $V_{\text{п}}$ — масса и объем пара.

   Так, учитывая, что в ситуации на рис. 1 в сосуде А частиц пара больше, чем в сосуде Б, формула (1) дает: $\rho_{\text{пА}} > \rho_{\text{пБ}}$.

2. **Относительная влажность** (φ) — это характеристика воздуха, показывающая, на сколько близок пар в нем к *насыщению*:
$$\varphi = \frac{P_{\text{п}}(T)}{P_{\text{н. п}}(T)} = \frac{\rho_{\text{п}}(T)}{\rho_{\text{н. п}}(T)}, \tag{2}$$
где $P_{\text{п}}$ и $P_{\text{н. п}}$ — давления, а $\rho_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{н. п}}$ — плотности данного пара и насыщенного пара при температуре T (символ температуры T в скобках напоминает о согласовании значений величин по температуре и о правильном выборе значения из таблицы для насыщенного водяного пара).

   С учетом определения относительные влажности в сосудах А и Б (рис. 1) связаны так: $\varphi_{\text{А}} > \varphi_{\text{Б}}$ (причем $\varphi_{\text{А}} = 1$, так как пар в сосуде А насыщен).

Относительная влажность воздуха не может быть больше единицы: $\varphi \leqslant 1$. Также стоит отметить, что под давлением пара в воздухе (*парциальным давлением пара*) понимают такое давление, которое он создавал бы, если бы все остальные газы отсутствовали (воздух — это смесь нескольких газов!).

Не следует считать, например, туман паром. Видимые «облака» над кипящей водой и прочие схожие объекты представляют собой множество мельчайших капель жидкости, в которые сконденсировался пар в воздухе при охлаждении ниже определенной температуры — *точки росы* ($\varphi = 1$).

Глава 7

Термодинамика

46 Внутренняя энергия

Любое тело состоит из частиц, которые постоянно беспорядочно движутся и взаимодействуют друг с другом. Сказанное иллюстрируется рисунком 1.

Рис. 1. Движение и взаимодействие частиц вещества

С одной стороны, вследствие теплового движения каждая частица тела обладает некоторой кинетической энергией (рис. 1, слева). С другой стороны, между частицами действуют *молекулярные силы*[1] (рис. 1, справа; для наглядности взаимодействия некоторые частицы соединены воображаемыми пружинами), так что любая пара частиц обладает потенциальной энергией.

Внутренняя энергия (U [Дж]) — это сумма кинетических энергий теплового движения всех частиц тела плюс сумма потенциальных энергий взаимодействия всех частиц друг с другом:

$$U = E_{\text{к. всех частиц}} + E_{\text{п. всех частиц}}. \tag{1}$$

В случае идеального газа взаимодействием между частицами вещества пренебрегают. Тогда внутренняя энергия зависит только от числа частиц и средней кинетической энергии одной частицы, пропорциональной температуре; можно показать, что **внутренняя энергия идеального газа** находится по формуле:

$$U = \frac{i}{2}\nu RT, \tag{2}$$

где i — число степеней свободы частицы ($i = 3$ для одноатомной частицы, $i = 5$ для двухатомной частицы, $i = 6$ для частицы с числом атомов больше двух).

Изменить внутреннюю энергию тела можно лишь двумя способами:

- механическая работа;
- теплопередача.

Проще говоря, нагреть тело получится только двумя принципиально разными способами: тереть его о что-нибудь (рис. 2, слева) или поставить на более горячее другое тело (рис. 2, справа).

Рис. 2. К способам изменения внутренней энергии

В общем случае изменение внутренней энергии может произойти как за счет совершения работы, так и за счет теплопередачи.

[1] Эти силы сводятся к силам *электрических взаимодействий* между особыми *заряженными частицами*, находящимися в атомах или молекулах тела.

47 Теплопередача

Теплопередача — это процесс перехода внутренней энергии от более горячего тела к более холодному без совершения работы. Этот процесс также называют *теплообменом*. Например, если в холодный стакан налить горячую воду, то стакан нагреется — произошла теплопередача от воды к стакану.

Различают три вида теплопередачи.

1. **Теплопроводность** — это теплообмен между контактирующими телами (или частями тела). На рис. 1 изображен металлический стержень, помещенный одним концом в огонь.

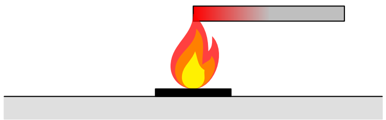

Рис. 1. Теплопроводность

«Соприкасающиеся» с огнем частицы стержня (молекулы или атомы) начинают интенсивнее колебаться и сильнее «толкают» соседние частицы. Тепловое движение соседних частиц также увеличивается, и они в свою очередь «раскачивают» уже своих соседей по другую сторону. Так тепло постепенно распространяется от участка к участку.

2. **Конвекция** — это теплообмен в жидкостях или газах за счет потоков вещества. На рис. 2 изображен сосуд с водой над огнем.

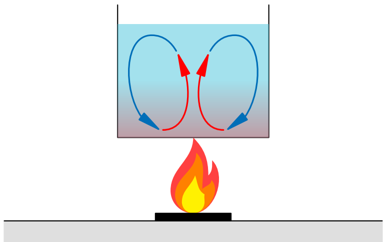

Рис. 2. Конвекция

Жидкость вблизи дна сосуда нагревается и расширяется, так что ее плотность становится меньше по сравнению с холодной жидкостью сверху. Эта менее плотная теплая жидкость под действием силы Архимеда поднимается вверх (красные стрелки на рис. 2); напротив, более холодная жидкость «тонет», то есть опускается вниз (синие стрелки на рис. 2). Таким образом вещество в сосуде перемешивается, и вся жидкость с течением времени прогревается.

3. **Излучение** — это теплообмен посредством электромагнитных волн. На рис. 3 — огонь.

Рис. 3. Излучение

Атомы любого тела при ненулевой температуре (в кельвинах) вследствие теплового движения испускают так называемые *электромагнитные волны*[1], то есть излучают энергию. *Видимый свет* — это частный случай излучения (свечение огня на рис. 3 является примером видимого излучения). Тела излучают энергию во все стороны; однако, не всякое излучение можно видеть — ведь большинство предметов при нормальных условиях не светятся, хотя эти предметы несомненно излучают (пример — горячая печь). Именно излучение «доставляет» энергию от Солнца к планетам — излучение может распространяться как в веществе, так и в *вакууме*.

[1]Электромагнитная волна — это распространение колебаний *электрического* и *магнитного полей* — особых форм материи, окружающей движущиеся *заряженные частицы*. Именно такие частицы, входящие в состав атома и совершающие вместе с ними хаотическое движение, и излучают электромагнитные волны, уносящие с собой часть внутренней энергии тела.

48 Количество теплоты

Количество теплоты (Q [Дж]) — это энергия, полученная телом (или отданная им) при теплопередаче. Для этой величины можно встретить также другие названия: *количество тепла*, *теплота* или *тепло*.

Если тело массы m получило (отдало) тепло Q, и при этом его температура увеличилась (уменьшилась), а агрегатное состояние не менялось, то соответствующую **теплоту нагревания/охлаждения** можно находить по формуле:

$$Q = cm\Delta T, \tag{1}$$

где c — *удельная теплоемкость* вещества (находят в справочных таблицах), ΔT — изменение температуры[1]. (Величина $C = cm$ есть *теплоемкость* тела.)

Пусть два тела с разными температурами привели в контакт (рис. 1, слева).

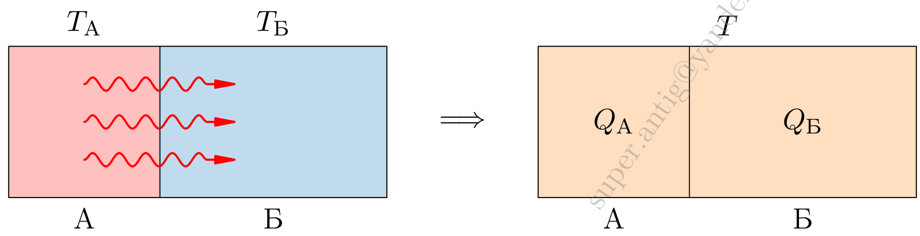

Рис. 1. Теплообмен между двумя телами

Сразу после соприкасания теплопроводящих тел А и Б с соответствующими температурами $T_А$ и $T_Б$ ($T_А > T_Б$) начинается теплопередача от тела А к телу Б без изменения их агрегатных состояний (красные стрелки на рис. 1, слева). После установления теплового равновесия (рис. 1, справа) бруски имеют одинаковую температуру T — теплообмен с этого момента не происходит. В процессе теплопередачи температура тела А понизилась, то есть тело отдало тепло, обозначаемое $Q_А$; наоборот, температура тела Б повысилась — оно получило тепло, обозначаемое $Q_Б$. Для данной системы тел можно записать следующее уравнение.

Уравнение теплового баланса. В системе тел только при теплообмене между ними сумма количеств теплоты, принятых (или отданных) телами, равна нулю:

$$\pm Q_1 \pm Q_2 \pm \ldots = 0, \tag{2}$$

где $Q_1, Q_2, \ldots$ — теплоты, принятые/отданные первым, вторым и т. д. телом.

Знаки в формуле (2) выбирают по следующим правилам:

- теплоте нагревания/охлаждения всегда приписывают знак «+»;
- знак «+» приписывают теплу, если оно получено телом;
- знак «−» приписывают теплу, если оно отдано телом.

Так, в рассмотренном примере с двумя телами (рис. 1) формула (2) дает: $Q_А + Q_Б = 0$; где с учетом формулы (1) $Q_А = c_А m_А (T - T_А)$, $Q_Б = c_Б m_Б (T - T_Б)$.

[1] Знак Δ означает, что нужно взять разность конечного и начального значений той величины, которая стоит после этого знака: например, изменение температуры есть $\Delta T = T_к - T_н$. Это значение символ Δ сохраняет практически во всех ситуациях при решении задач.

49 Изменения агрегатных состояний вещества

Если внутреннюю энергию тела меняют, то может происходить *изменение агрегатного состояния* его вещества. Интерес представляют следующие процессы изменения агрегатных состояний.

- **Плавление** — это превращение твердого тела в жидкость. В случае кристаллического тела этот процесс происходит при определенной *температуре плавления*, зависящей от вещества тела. Наоборот, аморфные тела не имеют определенной температуры плавления!

  Отвердевание (*кристаллизация*) — это превращение жидкости в твердое тело. Температура, при которой тело отвердевает, равна температуре плавления: при данной температуре в зависимости от внешних условий может происходить плавление или отвердевание. Кристаллические тела отвердевают при постоянной температуре, аморфные — нет.

  Теплота плавления/отвердевания для полного превращения твердого тела массы m в жидкость (или наоборот) при температуре плавления находится по формуле:

  $$Q = \lambda m, \tag{1}$$

  где λ — *удельная теплота плавления* вещества (см. справочные таблицы).

- **Парообразование** — это превращение жидкости в газообразное состояние (в пар). Перевести жидкость в пар можно двумя способами.

  а) *Испарение* — это парообразование, происходящее *со свободной поверхности* жидкости *при любой температуре*.

  б) *Кипение* — это парообразование, происходящее *по всему объему* жидкости. Жидкость кипит при *температуре кипения*, когда *давление насыщенного пара в пузырьках* $P_{\text{н.п}}$ *в жидкости равно давлению жидкости* $P_{\text{ж}}$ *на эти пузырьки*: $P_{\text{н.п}} = P_{\text{ж}}$.

  Конденсация — это превращение пара в жидкость.

  Теплота парообразования/конденсации для полного превращения жидкости массы m в пар (или наоборот) при температуре кипения находится по формуле:

  $$Q = Lm, \tag{2}$$

  где L — *удельная теплота парообразования* вещества (см. таблицы).

Сгорание — это химическая реакция, сопровождающаяся выделением тепла. Примером такого процесса является горение *топлива* (например, дров). **Теплота сгорания** топлива массы m равна:

$$Q = qm, \tag{3}$$

где q — *удельная теплота сгорания* вещества (см. справочные таблицы).

Для передачи тепла телу используют различные нагревательные устройства. Они характеризуются **тепловой мощностью** P и **КПД устройства** η:

$$P = \frac{Q}{t}, \quad \eta = \frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{з}}}, \tag{4}$$

где $Q_{\text{п}}$ и $Q_{\text{з}}$ — полезное и затраченное количество теплоты устройства.

50 Графики тепловых процессов

Как известно, любое тело, получая (отдавая) тепло, может изменить свою температуру. Также при теплопередаче может меняться агрегатное состояние вещества тела. Описывать состояние тела в таких процессах удобно графиками.

Пусть твердое тело поместили в специальную камеру, где ему ежесекундно передают (или забирают) одно и то же количество теплоты. На рис. 1 представлена графически качественная зависимость температуры тела от времени.

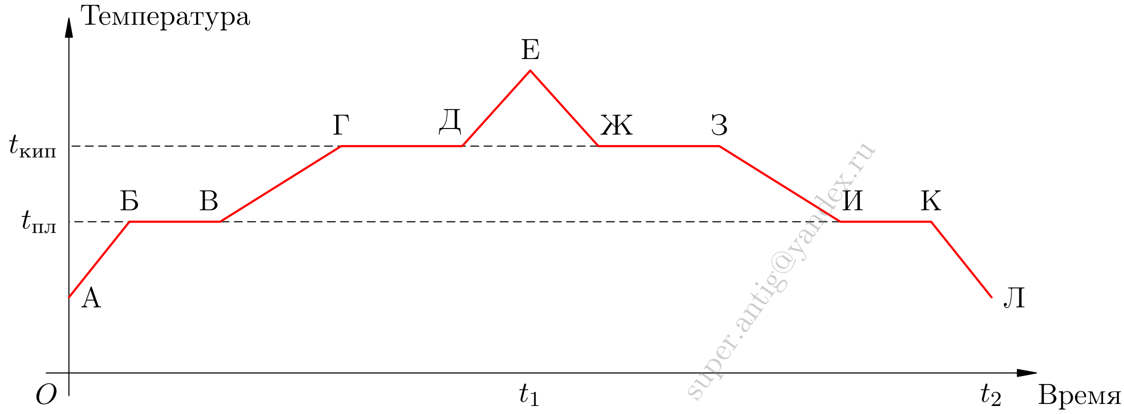

Рис. 1. Зависимость (качественная) температуры тела от времени

На промежутке времени от 0 до t_1 тепло *подводится* к телу, на промежутке от t_1 до t_2 — *отводится*. Можно сказать, что на рис. 1 представлен набор графиков — каждый прямолинейный участок описывает отдельный процесс, характеризующийся своей направленностью и агрегатным состоянием вещества (или видом его изменения).

Участок АБ соответствует *нагреванию* твердого тела — его температура увеличивается. При достижении температуры плавления $t_{пл}$ рост температуры прекращается, и на участке БВ происходит *плавление* тела при постоянной температуре: твердое состояние постепенно сменяется жидким (чем ближе к точке В, тем меньше остается твердого вещества). Далее на участке ВГ получившаяся жидкость (*расплав*) нагревается до температуры кипения $t_{кип}$. В точке Г начинается *кипение*: на участке ГД жидкое тело превращается в пар, и в точке Д тело уже полностью является газообразным. При дальнейшем подведении тепла на участке ДЕ происходит нагревание образовавшегося пара до некоторой температуры.

В точке Е подвод тепла сменяется отводом, и наблюдается *остывание* пара (участок ЕЖ) до температуры $t_{кип}$. С этого момента температура тела перестает меняться — на участке ЖЗ идет *конденсация* пара, который полностью превращается в жидкость в точке З. Следующий участок ЗИ соответствует дальнейшему остыванию этой жидкости. При температуре $t_{пл}$ начинается переход тела из жидкого состояния в твердое — *отвердевание* (участок ИК). В точке К уже все тело является твердым; оно и остывает далее на участке КЛ.

При постоянной мощности теплопередачи наклон графика точной зависимости температуры тела от времени характеризует *теплоемкость* тела — чем *круче* идет (вверх или вниз) график температуры, тем *меньше* теплоемкость тела (оно как бы легко меняет свою температуру).

51 Работа газа

Пусть сосуд с газом, находящимся под неподвижным гладким массивным поршнем, поставили на огонь (рис. 1, слева).

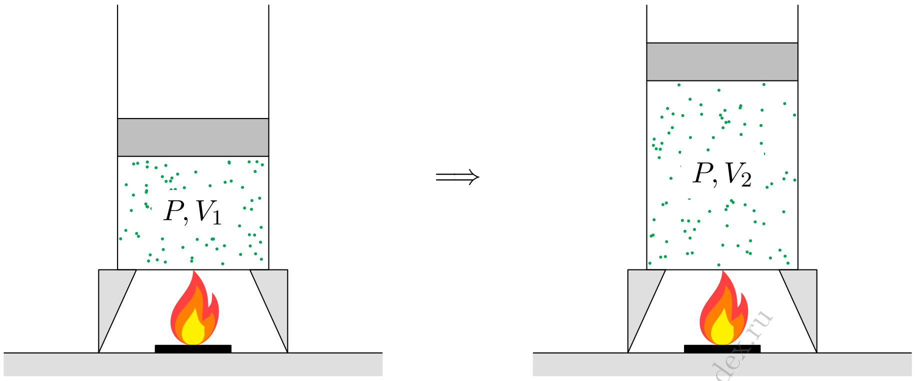

Рис. 1. Расширение газа

Газ начального объема V_1 медленно получает тепло от огня, так что давление P газа не меняется — оно равно давлению почти покоящегося поршня на газ (рис. 1, слева). При постоянном давлении температура газа медленно повышается, то есть его молекулы начинают двигаться быстрее — они сильнее толкают поршень, и он постепенно поднимается (рис. 1, справа). За время наблюдения газ расширяется до объема V_2, совершая работу.

Работа газа (A [Дж]) — это работа сил давления газа. При *постоянном давлении* газа ее находят по формуле:

$$A = P\Delta V, \tag{1}$$

где P — давление, а ΔV — изменение объема газа.

При расширении газ совершает положительную работу ($A > 0$), при сжатии — отрицательную ($A < 0$). Так, в рассмотренном примере (рис. 1) газ совершает положительную работу $A = P(V_2 - V_1)$.

Описанный выше процесс с газом можно изобразить на PV-диаграмме (рис. 2).

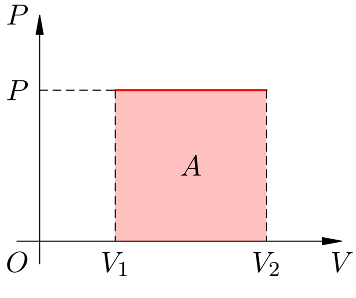

Рис. 2. Работа газа как площадь

Как видно, *работа газа* равна *площади фигуры* (взятой с соответствующим знаком) между графиком и осью V на PV-диаграмме для соответствующего изменения объема.

Работа внешних сил A' над газом связана с работой газа A так:

$$A' = -A. \tag{2}$$

52 Законы термодинамики

Если сосуд со сравнительно холодным газом под поршнем поставить на огонь, то начнется теплопередача от огня к газу (рис. 1, слева).

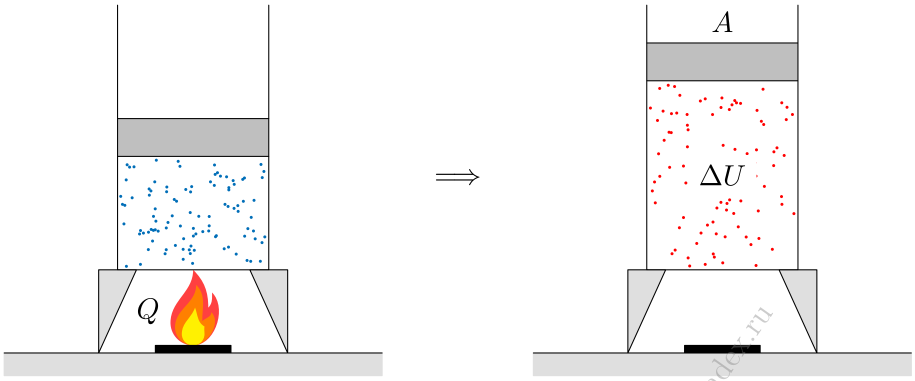

Рис. 1. Газ «на огне»

Огонь передает газу тепло Q (рис. 1, слева), вследствие чего внутренняя энергия газа увеличивается на величину ΔU, и газ совершает работу A по медленному поднятию гладкого массивного поршня (рис. 1, справа). В данном случае справедлив следующий закон.

Первый закон термодинамики. Количество теплоты, переданное телу, идет на изменение его внутренней энергии и на совершение телом работы:

$$Q = \Delta U + A. \tag{1}$$

Особый интерес представляет **адиабатный процесс** — процесс без теплообмена с окружающими телами ($Q = 0$). Если сосуд теплоизолирован, то газ в нем совершает адиабатный процесс. Также адиабатным считается всякий быстропротекающий процесс. График такого процесса называется *адиабатой*. В адиабатном процессе давление убывает с увеличением объема быстрее, чем в изотермическом процессе (рис. 2).

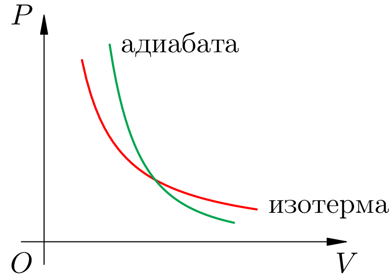

Рис. 2. Адиабата убывает быстрее изотермы

Второй закон термодинамики. Невозможен процесс, единственным итогом которого является теплопередача от менее нагретого тела к более нагретому.

Этот закон отмечает опытный факт: *тепло само собой переходит всегда от горячих тел к холодным.* Передать энергию от холодного тела к горячему можно только за счет работы внешнего источника (это происходит в холодильных машинах).

53 Тепловые машины

Тепловая машина — это устройство, преобразующее теплоту в работу (или наоборот). Тепловые машины бывают двух видов.

1. *Тепловой двигатель* преобразует теплоту, полученную от внешнего источника, в работу.

2. *Холодильная машина* передает тепло от более горячего тела к более холодному за счет работы внешнего источника.

Для начала более подробно следует рассмотреть принцип действия теплового двигателя, схема которого изображена на рис. 1.

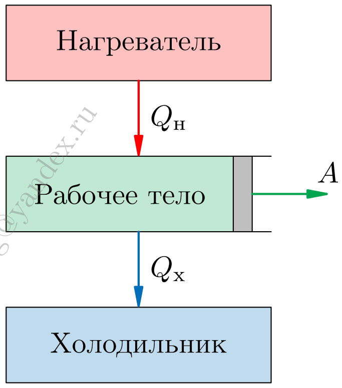

Рис. 1. Тепловой двигатель

Нагреватель — это сгорающее топливо. Часть энергии, выделившейся при сгорании, передается *рабочему телу* — газу — в виде теплоты $Q_н$ (*теплота нагревателя*). В результате газ нагревается и расширяется, двигая поршень и совершая полезную работу A (*работа газа*). При возвращении двигателя в исходное состояние часть энергии передается другому телу с меньшей температурой — *холодильнику*[1] — в виде тепла $Q_х$ (*теплота холодильника*). Таким образом, часть теплоты нагревателя идет на полезную работу, часть — отдается холодильнику:

$$Q_н = A + Q_х. \tag{1}$$

Эффективность превращения энергии сгорающего топлива в работу характеризует **коэффициент полезного действия (КПД)** теплового двигателя:

$$\eta = \frac{A}{Q_н}. \tag{2}$$

КПД реального теплового двигателя всегда меньше 1. Паровые турбины и двигатели внутреннего сгорания имеют КПД около 0,4.

Максимально возможный КПД любого теплового двигателя можно найти по *формуле Карно*:

$$\eta_{\max} = \frac{T_н - T_х}{T_н}, \tag{3}$$

где $T_н$ — температура нагревателя, $T_х$ — температура холодильника.

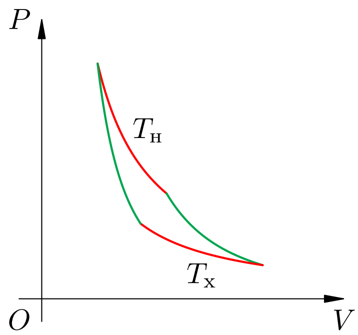

Рис. 2. Цикл Карно

Для вывода этой формулы Карно придумал *идеальную тепловую машину*, рабочим телом которой является идеальный газ.

Эта машина работает по *циклу Карно* — циклу, состоящему из двух изотерм (с температурами $T_н$ и $T_х$) и двух адиабат (рис. 2). Рассчитать КПД двигателя, работающего по циклу Карно, можно как по формуле (2), так и по формуле (3).

[1] Холодильником чаще всего является атмосфера.