



ПРЕДИСЛОВИЕ

Структура и содержание учебного пособия «Физика. Механика. Молекулярная физика и термодинамика» соответствуют учебной программе по физике для подготовительных факультетов высших учебных заведений инженерно-технических специальностей в рамках кредитно-модульной системы обучения.

Программный материал изложен с учётом особенностей системы обучения иностранных студентов, преемственности в обучении на подготовительных факультетах и первых курсах вузов.

В пособии приведен необходимый объём учебной информации, обеспечивающий овладение основами второго и третьего модулей дисциплины «Физика».

Учебное пособие состоит из девяти разделов: динамика, механическая работа и энергия, статика, механические колебания, механика жидкостей и газов, аэродинамика и гидродинамика, молекулярная физика, основы кинетической теории газов, основы термодинамики.

Овладение базовым материалом данных разделов курса физики позволит студентам понять и изучить основные физические явления и законы, фундаментальные понятия и теории классической и современной физики.

В процессе обучения у студентов должно сформироваться научное мировоззрение и современное физическое мышление.

Необходимая информация изложена в объёме, который обеспечивает овладение основами данных разделов курса физики. Весь материал разделён на подразделы, состоящие из текстов, вопросов и упражнений для самопроверки. Тексты максимально адаптированы в соответствии с программой по русскому языку на данном этапе обучения для усвоения учебного материала иностранными студентами. Выделены новые грамматические конструкции и лексика.

По каждой теме сделаны выводы и обобщения.

Упражнения содержат теоретические вопросы и различные прикладные задачи, решение которых позволит студентам научиться применять на практике полученные знания.

Ко всем задачам даны ответы. Все темы проиллюстрированы рисунками и графиками, что облегчает усвоение информации.

Особое внимание уделено объяснению физической сути явлений в доступной для иностранных студентов форме.

В результате изучения данных разделов дисциплины «Физика» студенты-иностранцы должны **знать**:

- основные физические явления, законы и теории классической и современной физики, а также области их практического применения в технике;

- основные методы физических исследований;
- физические величины Международной системы единиц (СИ);
- физическую терминологию.

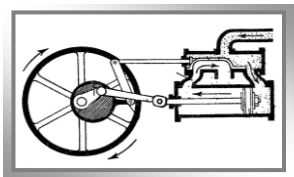
Студенты должны **уметь**:

- применять физические законы для решения практических задач;

- давать характеристики физических явлений;
- формулировать законы и определения физических величин;
- читать формулы и строить графики функций;
- определять характер движения тела по графикам и уравнениям;
- анализировать условие задачи и полученный в результате её решения ответ;

- отвечать на вопросы и составлять вопросы по ситуации;
- свободно владеть физической терминологией.





1. ДИНАМИКА

1.1. Применение законов динамики к равномерному движению по окружности

Равномерное движение тела по окружности — это движение тела с постоянной по модулю линейной скоростью ($v = \text{const}$) и с постоянным по модулю центростремительным ускорением ($a_{\text{ц}} = \text{const}$). Направление центростремительного ускорения перпендикулярно к направлению линейной скорости.

Причиной центростремительного ускорения, с которым тело движется по окружности, является сила. Обычно эта сила — результирующая нескольких сил, действующих на тело в направлении радиуса окружности. Она направлена к центру окружности и сообщает телу центростремительное ускорение.

Во всех случаях равномерного движения тела по окружности всегда можно обнаружить такую силу, которая действует со стороны другого тела. При вращении шарика на нити — это сила натяжения нити. При движении лежащей на диске монеты вместе с вращающимся диском — это сила трения. При движении планет вокруг Солнца — это сила всемирного тяготения. Если действие силы прекратится, то исчезнет и центростремительное ускорение.

Например, оборвётся нить, на которой вращался шарик. Тогда шарик будет продолжать двигаться по касательной к окружности, т. е. по направлению скорости, которой он обладает в момент исчезновения силы. Величину результирующей силы \vec{F}_p можно найти на основании второго закона Ньютона:

$$\vec{F}_p = m\vec{a}_{\text{ц}}, \quad \vec{F}_p \uparrow\uparrow \vec{a}_{\text{ц}}.$$

Так как $\vec{F}_p = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$, то уравнение движения тела по окружности имеет вид:

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m\vec{a}_{\text{ц}},$$

где $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i$ — векторная сумма всех сил, действующих на тело.

Так как модуль центростремительного ускорения тела равен $a_{ц} = \frac{v^2}{R}$, то модуль результирующей силы можно найти по формуле:

$$\sum F_x = \frac{mv^2}{R},$$

где $\sum F_x$ — сумма проекций всех сил, которые действуют на тело в направлении радиуса окружности.

Положительное направление координатной оси выбирают по радиусу к центру окружности. Тогда проекции сил, направленных к центру окружности, имеют положительную величину, а проекции сил, направленных от центра, — отрицательную величину.

Обратите внимание!



1. Для равномерного движения тела по окружности на него должна действовать сила, равная произведению массы тела на квадрат скорости, делённому на радиус окружности.
2. Чем меньше радиус окружности, тем большая сила требуется при заданной линейной скорости движения тела.

Упражнение 1.1

1. Что является причиной равномерного движения тела по окружности?
2. Как направлено центростремительное ускорение?
3. Привести примеры сил, которые обуславливают движение разных тел по окружности.
4. На основании какого закона можно определить величину силы, сообщаемой телу центростремительное ускорение?

1.2. Движение тела по окружности в вертикальной плоскости

Равномерное движение по окружности — это самый простой вид криволинейного движения. Любую криволинейную траекторию можно представить как совокупность дуг окружностей разных радиусов. Рассмотрим несколько примеров движения тел, криволинейная траектория которых лежит в вертикальной плоскости.

Пример 1. Автомобиль движется по выпуклому (рис. 1.1) или вогнутому (рис. 1.2) мосту. Мост является дугой окружности радиусом R . Центр окружности выпуклого моста находится под мостом,

а в случае вогнутого моста — над мостом. На автомобиль действуют сила тяжести \vec{F}_T и сила реакции моста \vec{N} . Результирующая этих двух сил всегда направлена к центру окружности и сообщает автомобилю центростремительное ускорение $\vec{a}_ц$.

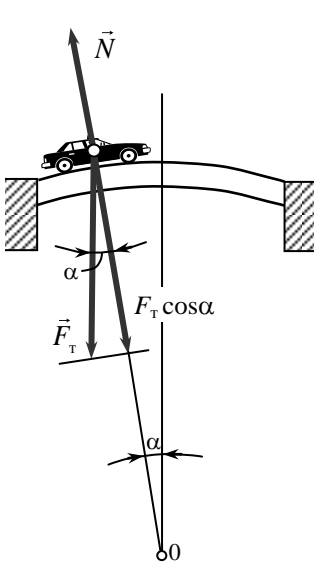


Рис. 1.1

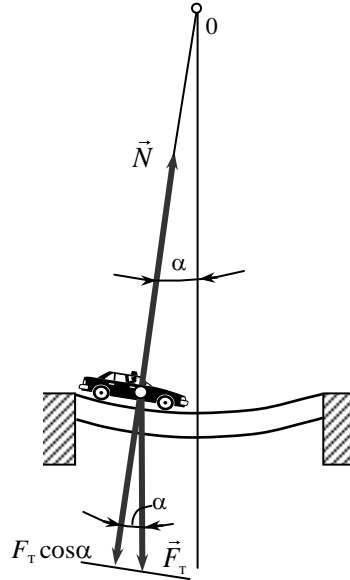


Рис. 1.2

По второму закону Ньютона

$$\vec{F}_T + \vec{N} = m\vec{a}_ц.$$

В проекции на ось OX это уравнение имеет вид:

$$mg \cos \alpha - N = \frac{mv^2}{R} \quad (\text{для выпуклого моста}),$$

$$N - mg \cos \alpha = \frac{mv^2}{R} \quad (\text{для вогнутого моста}),$$

откуда можно определить силу реакции моста:

$$N = mg \cos \alpha - \frac{mv^2}{R} \quad (\text{для выпуклого моста}),$$

$$N = mg \cos \alpha + \frac{mv^2}{R} \quad (\text{для вогнутого моста}).$$

Максимальная сила давления будет в нижней точке вогнутого моста:

$$N_{\max} = mg + \frac{mv^2}{R}.$$

Все эти силы приложены к автомобилю. К мосту, по третьему закону Ньютона, приложена сила давления автомобиля, равная по величине и противоположная по направлению силе \vec{N} . При движении по вогнутому мосту сила давления автомобиля на мост больше силы тяжести автомобиля. Такие мосты строить невыгодно. Поэтому обычно строят выпуклые мосты.

Пример 2. Шарик массой m на невесомой нити совершает равномерное движение по окружности в вертикальной плоскости со скоростью v (рис. 1.3). На шарик действуют сила тяжести \vec{F}_T и сила натяжения нити \vec{T} . Уравнение движения шарика имеет вид:

$$\vec{F}_T + \vec{T} = m\vec{a}_{\text{ц}}.$$

Выберем положительное направление оси координат к центру окружности. Тогда проекции сил, направленных к центру окружности, имеют положительную величину, а проекции сил, направленных от центра окружности, имеют отрицательную величину.

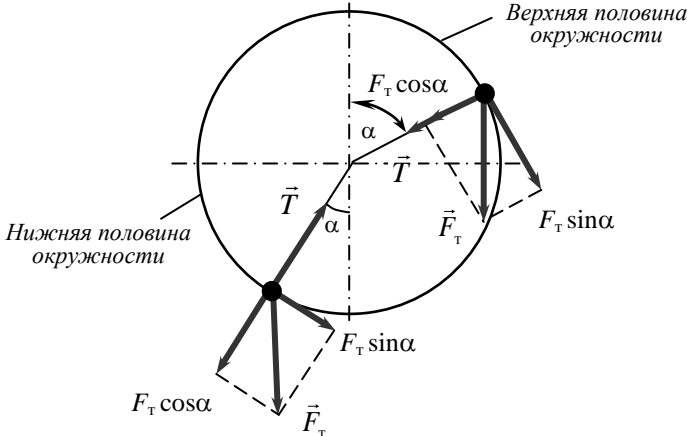


Рис. 1.3

Запишем уравнение движения шарика в алгебраической форме:

$$T + mg \cos \alpha = \frac{mv^2}{R} \text{ — верхняя половина окружности;}$$

$T - mg \cos \alpha = \frac{mv^2}{R}$ — нижняя половина окружности.

Отсюда можно определить силу натяжения нити:

$T = \frac{mv^2}{R} - mg \cos \alpha$ — верхняя половина окружности;

$T = \frac{mv^2}{R} + mg \cos \alpha$ — нижняя половина окружности.

Максимальная сила натяжения нити будет в момент прохождения шариком нижней точки окружности:

$$T_{\max} = \frac{mv^2}{R} + mg.$$

Минимальная сила натяжения нити будет в момент прохождения телом верхней точки окружности:

$$T_{\min} = \frac{mv^2}{R} - mg.$$

Задача 1. Автомобиль движется по выпуклому мосту радиусом 40 м. С какой скоростью должен двигаться автомобиль, чтобы в верхней точке сила давления на мост была равна нулю?

Д а н о:
 $R = 40$ м
 $P = 0$
 $v = ?$

Р е ш е н и е

Пусть автомобиль движется по мосту с постоянной по модулю скоростью. По второму закону Ньютона уравнение движения автомобиля имеет вид:

$$\vec{F}_T + \vec{N} = m\vec{a}_c,$$

где \vec{F}_T — сила тяжести автомобиля; \vec{N} — сила реакции моста.

По третьему закону Ньютона сила реакции моста равна по модулю силе давления автомобиля на мост и противоположна по направлению $\vec{N} = -\vec{P}$. Направим координатную ось к центру кривизны моста и запишем уравнение движения автомобиля (для момента, когда автомобиль находится в верхней точке моста) в алгебраической форме:

$$F_T - N = \frac{mv^2}{R}, \quad \text{или} \quad F_T - P = \frac{mv^2}{R}.$$

Но по условию задачи $P = 0$, поэтому уравнение движения имеет вид: $F_T = \frac{mv^2}{R}$.

В полученное уравнение подставим значение $F_T = mg$ и определим скорость автомобиля:

$$mg = \frac{mv^2}{R}, \text{ откуда } v = \sqrt{gR} = \sqrt{10 \cdot 40} = 20 \text{ м/с.}$$

О т в е т. Скорость, при которой автомобиль не будет оказывать давления на мост, $v = 20$ м/с.

Задача 2. Самолёт движется по окружности в вертикальной плоскости. Радиус окружности 250 м. В нижней точке траектории сила давления лётчика на сиденье равна 7100 Н. Масса лётчика 80 кг. Определить скорость самолёта.

Д а н о:
 $P = 7100 \text{ Н}$
 $m = 80 \text{ кг}$
 $R = 250 \text{ м}$

$v = ?$

Р е ш е н и е
 Лётчик вместе с самолётом движется по окружности. На лётчика действуют: сила тяжести \vec{F}_T и сила реакции сиденья \vec{N} . Направим ось OX к центру окружности. Запишем для лётчика второй закон Ньютона в векторной форме:

$$\vec{F}_T + \vec{N} = m\vec{a}_c.$$

В нижней точке траектории проекция уравнения движения на ось OX имеет вид: $N - F_T = ma_c$, где $F_T = mg$; $a_c = \frac{v^2}{R}$.

$$\text{Тогда } N - mg = \frac{mv^2}{R}, \quad v = \sqrt{\frac{(N - mg)R}{m}}.$$

По третьему закону Ньютона сила реакции сиденья по модулю равна силе давления лётчика на сиденье $N = P$.

Найдём числовое значение скорости самолёта:

$$v = \sqrt{\frac{(7100 - 80 \cdot 9,8) \cdot 250}{80}} = 140 \text{ м/с.}$$

О т в е т. Скорость самолёта в нижней точке траектории $v = 140$ м/с.

Слова и словосочетания

центростремительное ускорение	мост
верхняя точка	выпуклый
нижняя точка	вогнутый
центр окружности	лётчик
радиус кривизны	совокупность
вертикальная плоскость	разрыв нити

Обратите внимание!

ре-



1. При движении по горизонтальному мосту сила реакции моста равна силе тяжести тела.
2. При движении тела по выпуклому или вогнутому мосту сила реакции моста не равна силе тяжести тела.
3. В нижней точке вогнутого моста сила давления тела на мост максимальная. Поэтому экономически выгодно строить выпуклые мосты.
4. Движение тела на нити в вертикальной плоскости является переменным движением.

Сила натяжения нити в верхней точке траектории минимальная, а в нижней точке траектории — максимальная. В момент прохождения телом нижней точки окружности может произойти разрыв нити.

Упражнение 1.2

1. Автомобиль массой 2,5 т движется с постоянной скоростью 54 км/ч по мосту.

Определить, с какой силой автомобиль давит на мост, когда проходит через его середину, если:

- а) мост горизонтальный;
- б) мост выпуклый с радиусом кривизны 50 м;
- в) мост вогнутый с радиусом кривизны 90 м.

2. С какой скоростью должен двигаться мотоциклист по выпуклому мосту радиусом 50 м, чтобы в верхней точке сила давления на мост была равна нулю?

3. Первый искусственный спутник Земли был запущен 4 октября 1957 года. Его максимальное удаление от Земли 947 км.

Какую скорость должен был иметь спутник на этой высоте, чтобы удержаться на орбите? Радиус Земли 6378 км.

4. Тело подняли при помощи ракеты на высоту 500 км над Землёй. Какую скорость нужно сообщить этому телу в направлении, перпендикулярном к земному радиусу, чтобы оно двигалось вокруг Земли по круговой орбите? Какой период обращения тела вокруг Земли? Сопротивление атмосферы не учитывать.

5. Автомобиль с грузом массой 5 т движется по выпуклому мосту со скоростью 21,6 км/ч. С какой силой он давит на середину моста, если радиус кривизны моста 50 м?

6. Самолёт движется по окружности в вертикальной плоскости. Радиус окружности 200 м. Скорость самолёта 360 км/ч.

Определить силу давления лётчика на сиденье в верхней и нижней точках траектории. Масса лётчика 70 кг.

1.3. Движение тела по окружности в горизонтальной плоскости

Рассмотрим несколько примеров движения тел по окружности в горизонтальной плоскости.

Пример 1. Велосипедист движется по траектории, являющейся дугой окружности. На велосипедиста действует несколько сил, равнодействующая которых сообщает телу центростремительное ускорение. Рассмотрим эти силы.

При прямолинейном движении на велосипедиста действуют сила тяжести \vec{F}_T и сила реакции опоры \vec{N} (рис. 1.4, а). Силы направлены вертикально и уравновешивают друг друга.

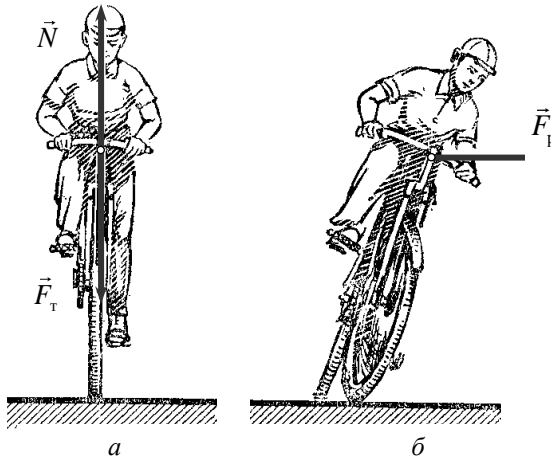


Рис. 1.4

На поворотах на велосипедиста должна действовать равнодействующая сила. Для этого телу надо придать наклон внутрь круга (рис. 1.4, б). В этом случае на велосипедиста действуют сила тяжести \vec{F}_T , сила нормального давления опоры \vec{N} и сила трения $\vec{F}_{тр}$ (рис. 1.5). Сила трения направлена по радиусу закругления в сторону центра и препятствует соскальзыванию тела в противоположном направлении. Сила трения и сила нормального давления опоры в сумме дают силу реакции опоры \vec{N}' , направленную наклонно: $\vec{F}_{тр} + \vec{N} = \vec{N}'$. Равнодействующая \vec{F}_P силы тяжести \vec{F}_T и реакции опоры \vec{N}' направлена внутрь круга и обуславливает необходимое центростремительное ускорение (рис. 1.5).

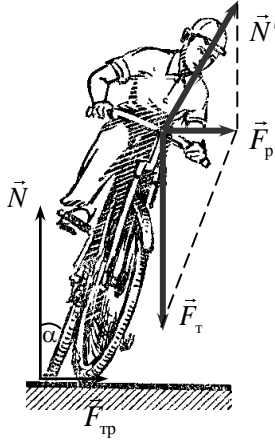


Рис. 1.5

Согласно второму Закону Ньютона уравнение движения тела:

$$\vec{F}_p = m\vec{a}_c, \text{ или } \vec{F}_T + \vec{N}' = m\vec{a}_c.$$

Найдём проекции уравнения движения велосипедиста на оси координат:

$$OX: N' \sin \alpha = \frac{mv^2}{R}; \quad (1.1)$$

$$OY: N' \cos \alpha - mg = 0. \quad (1.2)$$

Разделим уравнение (1.1) на уравнение (1.2) и получим формулу для определения угла наклона велосипедиста в сторону закругления:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v^2}{gR}.$$

Пример 2. Тело массой m на нити длиной l движется равномерно по окружности в горизонтальной плоскости. На тело действуют сила тяжести $\vec{F}_T = m\vec{g}$ и сила натяжения нити \vec{T} (рис. 1.6). Результирующая сила \vec{F}_p сообщает телу центростремительное ускорение \vec{a}_c . Запишем для тела второй закон Ньютона в векторной форме:

$$m\vec{g} + \vec{T} = \vec{a}_c.$$

Направим ось OX к центру окружности и спроецируем уравнение движения на выбранные направления осей координат:

$$OX: T \sin \alpha = ma_c; \quad OY: -mg + T \cos \alpha = 0.$$

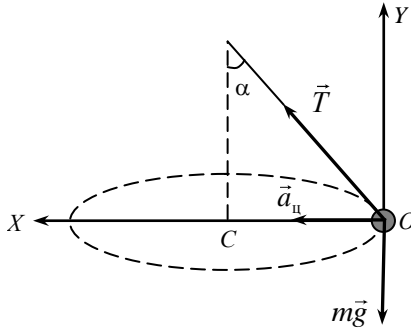


Рис. 1.6

Так как центростремительное ускорение $a_{ц} = \frac{v^2}{R}$ и $R = l \sin \alpha$, где l — длина нити, то

$$T \sin \alpha = \frac{mv^2}{l \sin \alpha}; \quad T \cos \alpha = mg.$$

Скорость движения тела: $v = \sin \alpha \sqrt{\frac{gl}{\cos \alpha}}$; сила натяжения нити:

$$T = \frac{mg}{\cos \alpha}.$$

Задача. На горизонтальном диске на расстоянии 64 см от его вертикальной оси вращения лежит груз. Коэффициент трения между грузом и диском равен 0,1. При какой частоте вращения груз начнёт скользить?

Дано:

$$R = 64 \text{ см} =$$

$$= 0,64 \text{ м}$$

$$\mu_0 = 0,1$$

$$n \text{ — ?}$$

Решение

На груз действует сила трения покоя, направленная по радиусу к центру окружности (рис. 1.7). Сила трения является силой, которая сообщает грузу центростремительное ускорение $\vec{F}_{тр} = \vec{F}_p$. Силу трения покоя можно

найти по формуле: $F_{тр} = \mu_0 F_{нд}$,

где $F_{нд}$ — сила нормального давления.

При движении в горизонтальной плоскости сила нормального давления равна: $F_{нд} = mg$.

Согласно второму закону Ньютона, уравнение движения груза имеет вид: $\vec{F}_{тр} = m\vec{a}_{ц}$.

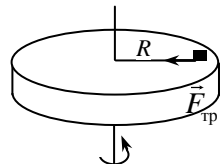


Рис. 1.7

В алгебраической форме: $\mu_0 mg = \frac{mv^2}{R}$.

Скорость, при которой груз начинает скользить по диску

$$v = \sqrt{\mu_0 Rg} = \sqrt{0,1 \cdot 0,64 \cdot 10} = 0,8 \text{ м/с.}$$

При такой линейной скорости частота вращения диска равна:

$$n = \frac{v}{2\pi R} = \frac{0,8}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,64} \approx 0,2 \text{ об/с.}$$

Ответ. Груз начнёт скользить при частоте вращения диска $n = 0,2$ об/с.

Слова и словосочетания

поворот	горизонтальная плоскость
на поворотах	шероховатая поверхность
скользить	наклон
удержаться	наклониться
диск	вертикальная ось
велосипедист	мотоциклист

Обратите внимание!



1. При движении тела вместе с горизонтальным диском связью является шероховатая поверхность диска. Если бы трения не было, то тело не могло бы удержаться на поверхности диска.

2. На повороте на тело должна действовать сила, которая сообщает телу центростремительное ускорение. Тело должно наклониться внутрь круга.

3. Движение велосипедиста, мотоциклиста, поезда по траектории, являющейся дугой окружности, происходит под действием нескольких сил, равнодействующая которых сообщает телу центростремительное ускорение.

Упражнение 1.3

1. Мотоциклист движется по горизонтальной плоскости, описывая дугу радиусом 90 м. Коэффициент трения колёс о почву 0,4. Определить, с какой максимальной скоростью может при этом двигаться мотоциклист.

2. Шарик на нити движется равномерно по окружности в горизонтальной плоскости. Масса шарика 200 г. Определить скорость шарика и период его вращения по окружности, если длина нити 1 м. Угол нити с вертикалью составляет 60° .

3. Велосипедист движется с постоянной по модулю скоростью 36 км/ч по окружности, радиус которой 34 м. Под каким углом к вертикали он должен наклонить велосипед?

4. Горизонтальный диск вращается вокруг вертикальной оси с частотой 18 об/мин. Коэффициент трения 0,2. Определить, на каком расстоянии от центра диска может удержаться человек.

1.4. Импульс тела. Импульс силы. Второй закон Ньютона в общей форме

Основные законы механики — второй и третий законы Ньютона — включают в себя возможность решения любой механической задачи. Формула

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (1.3)$$

выражает второй закон Ньютона. Но часто решение задачи можно облегчить, если видоизменить этот закон.

Пусть на тело массой m действует постоянная сила \vec{F} . Тогда ускорение тела также будет постоянным:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}, \quad (1.4)$$

где ускорение \vec{a} равно: $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}$. Подставим это выражение в формулу (1.4).

$$\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t} = \frac{\vec{F}}{m}, \quad \text{или} \quad \vec{F}\Delta t = m\vec{v} - m\vec{v}_0.$$

Импульс тела (количество движения) — это физическая величина, равная произведению массы тела на его скорость

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

Импульс тела — векторная величина, так как скорость — вектор.

Импульс силы — это физическая величина, равная произведению силы \vec{F} на время её действия t . Импульс силы $\vec{F}t = \vec{I}$ — векторная физическая величина.

Направление вектора импульса тела совпадает с направлением вектора скорости: $\vec{p} \uparrow \vec{v}$. За единицу импульса тела в СИ принят импульс тела массой 1 кг, которое движется со скоростью 1 м/с.

Единица импульса тела — килограмм-метр в секунду: [p] = кг · м/с.

Выражение (1.4) можно записать в виде:

$$\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0 = \Delta(m\vec{v}) \quad \text{или} \quad \vec{I} = \Delta p, \quad (1.5)$$

где $\Delta\vec{p}$ — изменение импульса тела.

Выражение (1.5) представляет собой в т о р о й з а к о н Н ь ю т о н а в о б щ е й ф о р м е:

изменение импульса тела равно импульсу силы, которая вызывает это изменение.

Оба выражения второго закона Ньютона (1.3) и (1.5) эквивалентны, если масса тела во время движения не изменяется или изменением массы можно пренебречь. Если масса тела во время движения изменяется, то при решении задач необходимо применять второй закон Ньютона в общей форме (1.5).

Слова и словосочетания

импульс тела
общая форма
эквивалентны

импульс силы
количество движения
видоизменить

Обратите внимание!



1. При движении масса тела может изменяться.
2. Изменение массы тела происходит, если: тело движется со скоростью, близкой к скорости света $v \approx c$ (скорость света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с); при движении от тела отделяются какие-либо части.

Упражнение 1.4

1. Что называется импульсом силы?
2. Что называется импульсом тела?
3. Какое направление имеет вектор импульса тела?
4. Сформулировать второй закон Ньютона в общей форме.
5. Назвать единицу импульса тела в системе единиц СИ.
6. Когда необходимо применять второй закон Ньютона в общей форме?

1.5. Закон сохранения импульса

В механике часто встречаются задачи, когда необходимо одновременно рассматривать несколько тел, движущихся по-разному. Это, например, движение небесных тел, соударение тел, движение пули или снаряда при выстреле (и движение автомата, пушки).

При взаимодействии тел импульс одного тела может частично или полностью передаваться другому телу. Если на систему тел не действуют внешние силы со стороны других тел, такая система называется замкнутой.

Рассмотрим два взаимодействующих тела, входящих в состав замкнутой системы.

Пусть два тела с массами m_1 и m_2 движутся навстречу друг другу (рис. 1.8, а). Произведение массы тела на его скорость — это импульс тела. Тогда $m_1\vec{v}_1$ — импульс первого тела до взаимодействия, $m_2\vec{v}_2$ — импульс второго тела до взаимодействия.

В момент взаимодействия (рис. 1.8, б) тела действуют друг на друга с силами \vec{F}_{12} и \vec{F}_{21} .

По третьему закону Ньютона $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.

После взаимодействия (рис. 1.8, в) тела получают скорости \vec{v}'_1 и \vec{v}'_2 . Тогда импульсы тел после взаимодействия равны:

$$m_1\vec{v}'_1 \text{ и } m_2\vec{v}'_2.$$

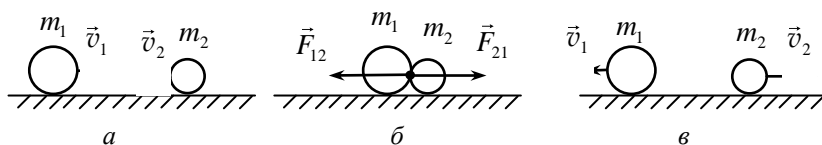


Рис. 1.8

Запишем второй закон Ньютона в импульсной форме для каждого тела:

$$\vec{F}_{12}\Delta t = m_1\vec{v}'_1 - m_1\vec{v}_1,$$

$$\vec{F}_{21}\Delta t = m_2\vec{v}'_2 - m_2\vec{v}_2.$$

Здесь Δt — время взаимодействия двух тел.

Применим к этим телам третий закон Ньютона:

$$\vec{F}_{12}\Delta t = -\vec{F}_{21}\Delta t, \text{ или}$$

$$m_1\vec{v}'_1 - m_1\vec{v}_1 = -(m_2\vec{v}'_2 - m_2\vec{v}_2).$$

После преобразования соотношений получим:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2.$$

Мы получили фундаментальный закон природы, который называется **законом сохранения импульса**:

в замкнутой системе векторная сумма импульсов тел до взаимодействия равна сумме импульсов тел после взаимодействия.

Закон сохранения импульса является следствием из второго и третьего законов Ньютона.

Обратите внимание!



1. Несколько взаимодействующих физических тел называются системой тел.
2. Силы взаимодействия между телами системы называются внутренними силами.
3. Внешние силы — это силы взаимодействия между телами системы и телами, которые не принадлежат этой системе.
4. Система тел, на которую не действуют внешние силы, называется замкнутой системой. В природе изолированных систем не существует. Но если внешние силы не учитывать (пренебречь ими), то систему можно рассматривать как изолированную.

Слова и словосочетания

изолированный
небесное тело
система
платформа
пушка
песок
пуля

силы взаимодействия
внутренние силы
внешние силы
замкнутая система
снаряд
выстрел
соударение тел

Упражнение 1.5

1. Что называется системой тел?
2. Какая система называется замкнутой?
3. Что называется внутренними силами системы тел?
4. Какие силы называются внешними?
5. Сформулируйте закон сохранения импульса.
6. С платформы, которая движется со скоростью $v_0 = 9$ км/ч, выстрелили из пушки в горизонтальном направлении.

Масса платформы с пушкой $m_1 = 20$ т, масса снаряда $m_2 = 23$ кг, его начальная скорость $v_{0_2} = 700$ м/с. Определить скорость платформы после выстрела, если направление выстрела совпадает с направлением движения платформы.

7. В неподвижную платформу с песком массой 900 кг падает снаряд массой 60 кг и остаётся в песке. До взаимодействия снаряд двигался под углом 45° к горизонту со скоростью 300 м/с. Определить скорость платформы после взаимодействия.

8. Вагон массой 20 т движется со скоростью 1,5 м/с и встречает платформу массой 10 т, которая стоит на его пути. После столкновения вагон и платформа движутся вместе. Найти скорость их движения.

9. Снаряд массой 5 кг летел со скоростью 200 м/с и разорвался на две части. Одна часть массой 2 кг после разрыва продолжала двигаться в направлении движения снаряда со скоростью 300 м/с. Определить скорость и направление движения второй части снаряда.

10. Платформа массой 500 кг едет по горизонтальной дороге со скоростью 4 м/с. Навстречу ей движется другая платформа массой 300 кг со скоростью 8 м/с. После встречи они соединяются. С какой скоростью будут двигаться платформы?

11. Вагон массой 25 т движется по горизонтальной дороге со скоростью 2 м/с и сталкивается с неподвижным вагоном массой 15 т. После взаимодействия вагоны движутся вместе. Найти скорость вагонов после взаимодействия.

1.6. Реактивное движение

Закон сохранения импульса во многих случаях позволяет находить скорости взаимодействующих тел даже тогда, когда значения действующих сил неизвестны. Примером может служить реактивное движение.

Реактивное движение — это движение, происходящее при взаимодействии тела с веществом, которое выбрасывается из тела.

Например, движение ракеты — это реактивное движение.

Ракета представляет собой систему двух тел: корпуса ракеты и топлива. Один конец корпуса имеет отверстие.

Топливо сгорает и через отверстие в корпусе с большой скоростью \vec{v} вытекает газ (рис. 1.9).

Газ и корпус ракеты взаимодействуют. Действует *реактивная сила*, направленная в сторону, противоположную направлению скорости выбрасываемых газов.

Импульс корпуса ракеты равен по величине импульсу газа, но противоположен по направлению. По закону сохранения импульса

$$0 = m_r \vec{u} + m_k \vec{v},$$

где m_r — масса газа; \vec{u} — скорость вытекания газа; m_k — масса корпуса ракеты; \vec{v} — скорость корпуса ракеты.

Тогда $-m_r \vec{u} = m_k \vec{v}$.

Найдём скорость корпуса ракеты:

$$\vec{v} = -\frac{m_r}{m_k} \vec{u}.$$

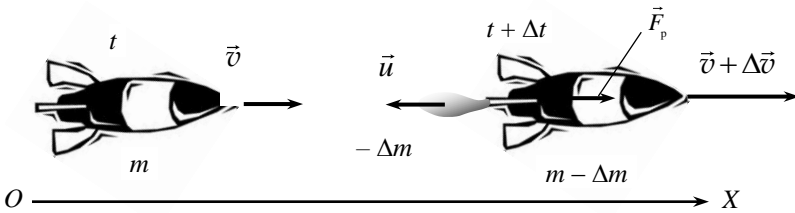


Рис. 1.9

Здесь предполагалось, что начальная скорость ракеты равнялась нулю. Полученная формула для скорости ракеты справедлива лишь при условии, что вся масса сгоревшего топлива выбрасывается из ракеты одновременно.

Знак «-» показывает, что корпус ракеты движется в сторону, противоположную движению газа.

Скорость ракеты можно увеличить, если:

- 1) увеличить скорость вытекания газа;
- 2) увеличить массу топлива, которое сгорает.

Для полёта ракеты не нужна окружающая среда. Ракета движется в результате взаимодействия с газами, которые образуются при сгорании топлива. Поэтому для движения ракеты не нужны ни земля, ни вода, ни воздух. Ракета может лететь в безвоздушном космическом пространстве.

Обратите внимание!



1. В основе реактивного движения лежит закон сохранения импульса.

2. Реактивная сила может изменять не только величину скорости, но и её направление.

3. Если струя газа выбрасывается в направлении, противоположном движению ракеты, то скорость ракеты увеличивается, если в направлении, совпадающем с движением ракеты, то скорость ракеты уменьшается.

Слова и словосочетания

ракета	реактивное движение
корпус	струя газа
топливо	космическое пространство
одновременно	окружающая среда

Упражнение 1.6

1. Какое движение называется реактивным движением?
2. Какая сила называется реактивной силой?
3. Как всегда направлена реактивная сила?
4. Зависит ли реактивная сила от скорости полёта? от окружающей ракету среды?
5. Ракета массой 500 г содержит 50 г пороха. Порох сгорел мгновенно. Ракета поднялась на высоту 90 м. Определить скорость выходящих газов (сопротивление воздуха не учитывать).





2. МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА И ЭНЕРГИЯ

2.1. Механическая работа

Понятие работы в физике является очень важным и отличается от того, что мы привыкли называть работой в жизни. Для того чтобы совершать работу в физическом смысле, должно быть соблюдено два условия:

- 1) к телу должна быть приложена сила;
- 2) тело должно переместиться под действием этой силы ($\Delta r \neq 0$).

Если под действием силы тело перемещается, то говорят, что сила выполняет *работу*. Под действием силы может изменяться взаимное расположение частей этого тела (например, при растяжении или сжатии). В этом случае сила также выполняет работу. Чем больше сила действует на тело, тем большую работу она выполняет.

Работу обозначают буквой A .

Механическая работа — это физическая величина, равная скалярному произведению силы на перемещение

$$A = (\vec{F} \Delta \vec{r}), \text{ или } A = F \Delta r \cos \alpha,$$

где α — угол между направлением силы и направлением перемещения.

Формула работы справедлива, если величина силы не изменяется ($\vec{F} = \text{const}$).

Если движение прямолинейное, то величина перемещения и путь равны ($|\Delta \vec{r}| = \Delta r = S$), поэтому

$$A = F S \cos \alpha.$$

Рассмотрим частные случаи действия силы на тело.

1. Направление силы совпадает с направлением перемещения ($\cos 0^\circ = 1$): $A = F S$.

Например, сила тяги перемещает тело и выполняет положительную работу.

Сила, работа которой положительная, называется движущей силой, или силой тяги.

2. Направление силы противоположно направлению перемещения:

$$A = F S \cdot \cos \pi = - F S.$$

Сила трения, сила сопротивления направлены противоположно направлению перемещения и выполняют отрицательную работу.

Сила, работа которой отрицательная, называется силой сопротивления.

3. Направление силы перпендикулярно направлению перемещения:

$$A = F S \cos \frac{\pi}{2} = 0.$$

Сила тяжести и сила реакции опоры при горизонтальном перемещении тела направлены под углом 90° к перемещению. В этом случае сила не выполняет работу.

Сила, которая не выполняет работу, называется нормальной силой.

4. Направление силы составляет угол $0 < \alpha < \pi$ с направлением перемещения:

$$A = F S \cos \alpha \left(\alpha < \frac{\pi}{2} \right); \quad A = - F S \cdot \cos \alpha \left(\alpha > \frac{\pi}{2} \right).$$

Единица работы в СИ — джоуль: $[A] = 1 \text{ Дж}$.

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

1 джоуль — это работа, которую совершает сила 1 Н при перемещении на 1 м, если направление перемещения совпадает с направлением силы.

Величину механической работы можно изобразить графически (рис. 2.1). Если на тело действует постоянная сила ($\vec{F} = \text{const}$), то работа равна площади прямоугольника $OABC$ (рис. 2.1, а):

$$S_{OABC} = BC \cdot OC = F \Delta r = F \cdot S = A.$$

Если работу совершает переменная по величине сила, то на графике работа равна площади сложной фигуры (рис. 2.1, б). Кривая AB выражает закон изменения величины силы на участке пути S . Площадь такой фигуры приближённо равна сумме площадей маленьких прямоугольников ΔS_i .

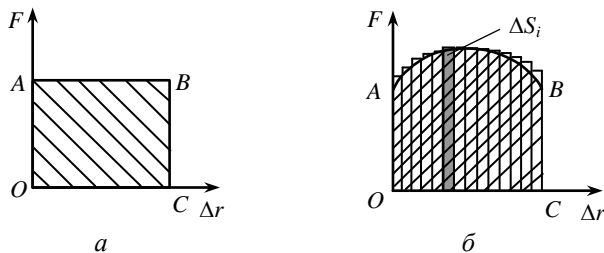


Рис. 2.1

Если прямоугольников очень много ($n \rightarrow \infty$), то сумма площадей прямоугольников стремится к площади всей фигуры $OABC$.

Математически это записывается так:

$$S_{OABC} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n S_i.$$

Тогда формула работы переменной силы имеет вид:

$$S_{OABC} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n F_i \Delta S = \int_0^C F dS.$$

Обратите внимание!



1. Если под действием силы тело не совершает перемещение, то работа силы равна нулю.
2. Работа силы может быть положительной, отрицательной или равняться нулю.

Слова и словосочетания

совершать
положительная
отрицательная

механическая работа
нормальная сила
сила сопротивления

Упражнение 2.1

1. Что называется механической работой?
2. Назовите единицу работы.
3. В каком случае сила выполняет положительную работу?
4. Когда работа силы равна нулю?
5. Когда работа силы отрицательная?

6. Что называется движущей силой?
 7. Что называется силой сопротивления?
 8. Какие силы называются нормальными?
 9. По горизонтальной дороге под действием силы $F = 450$ Н начинает двигаться тело. Угол между направлением вектора силы и горизонтом составляет 30° .
 Какую работу совершила сила за 10 с, если через 20 с скорость тела равна 6 м/с?

2.2. Мощность. Коэффициент полезного действия механизмов

Мощность характеризует способность механизма выполнять ту или иную работу за определённое время.

Мощность — это физическая величина, равная отношению работы ко времени, за которое она совершается.

$$\langle N \rangle = \frac{A}{\Delta t},$$

где $\langle N \rangle$ — средняя мощность.

Если на тело действует постоянная сила и направление этой силы совпадает с направлением движения, то:

$$\langle N \rangle = \frac{A}{\Delta t} = F \langle v \rangle,$$

где $\langle v \rangle$ — средняя скорость на пути S .

Мощность показывает, какую работу совершает механизм (двигатель) за единицу времени.

При равномерном прямолинейном движении скорость не изменяется ($\vec{v} = \text{const}$), поэтому средняя скорость равна мгновенной скорости в любой момент времени.

Величина мощности также постоянна:

$$N = F \cdot v.$$

Мощность — скалярная физическая величина.

Единица мощности в СИ — ватт: $[N] = 1 \text{ Вт}$.

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

Один ватт — это мощность механизма, который за 1 с выполняет работу в 1 Дж.

При выполнении работы любым механизмом часть энергии теряется на трение. Поэтому работа механизма всегда больше той полезной работы, которую он выполняет.

Работу механизма при наличии трения в нём называют *полной работой* $A_{\text{полн}}$, а работу без потерь на трение — *полезной работой* $A_{\text{полезн}}$.

Величина, показывающая, какую часть полной работы составляет полезная работа, называется коэффициентом полезного действия (КПД).

Тогда коэффициент полезного действия механизма — это отношение полезной работы к выполненной (полной) работе:

$$\eta = \frac{A_{\text{полезн}}}{A_{\text{полн}}}.$$

Коэффициент полезного действия всегда меньше единицы, так как выполненная работа всегда больше полезной ($\text{КПД} < 1$). КПД обычно выражают в процентах:

$$\eta = \frac{A_{\text{полезн}}}{A_{\text{полн}}} \cdot 100\%.$$

Обратите внимание!



1. Различные машины и механизмы используют для совершения механической работы.
2. Двигатель — это система, которая совершает положительную работу.
3. Быстроту совершения работы характеризует мощность.
4. Работа, для выполнения которой используется механизм, называется полезной работой.
5. КПД характеризует экономичность машины.

Слова и словосочетания

мощность	полезная работа
механизм	полная работа
способность	потери на трение
проценты	коэффициент полезного действия
двигатель	экономичность

Упражнение 2.2

1. Что называется мощностью?
2. Назовите единицу мощности.
3. Что показывает мощность?
4. Какая работа механизма называется полной?
5. Что такое полезная работа?
6. Что называется коэффициентом полезного действия?
7. Какие значения принимает коэффициент полезного действия и почему?

2.3. Механическая энергия

Из подраздела 2.1 следует, что в тех случаях, когда тело, действуя на другое тело, вызывает его перемещение, а направление силы при этом не перпендикулярно направлению перемещения, совершается механическая работа. Наблюдения показывают, что при определённых условиях работа может быть совершена любым телом.

Например, сжатая или растянутая пружина, действующая силой упругости на прикреплённое к ней тело, перемещает его и при этом совершает механическую работу. Может совершать работу и любое движущееся тело. Сталкиваясь с другим телом, оно действует на него силой и может вызвать перемещение этого тела или его частей (деформацию). При этом тоже совершается механическая работа. Сила тяжести тела, поднятого на некоторую высоту и опущенного, совершает работу.

Про тела, которые могут совершать работу, говорят, что они обладают энергией.

Механическая энергия E — это скалярная физическая величина, характеризующая способность тела (системы тел) совершать механическую работу.

Энергия равна той максимальной работе, которую тело может совершить в данных условиях.

Механическая работа является мерой изменения энергии в различных процессах. Поэтому энергию и работу выражают в одних и тех же единицах.

Единица энергии в СИ — джоуль: $[E] = 1 \text{ Дж}$.

В более общем смысле энергия — это единая мера разных форм движения материи, а также мера перехода движения материи из одной формы в другую. Для характеристики конкретных форм движения материи используют понятия о соответствующих видах энергии: механической, внутренней, электромагнитной и т. д.

Если тело выполняет работу, то при этом изменяется его скорость или положение относительно других тел, т.е. изменяется механическое состояние. Значит, механическая работа является характеристикой механического состояния тела, тогда работа — это мера изменения механической энергии тела.

При совершении работы энергия изменяется:

$$A = \Delta E = E_2 - E_1,$$

где A — работа внешних сил; E_1 — начальная энергия тела; E_2 — энергия тела после совершения работы.

Если тело выполняет работу A' против внешних сил, то его энергия уменьшается:

$$A' = -\Delta E = -(E_2 - E_1).$$

Различают два вида механической энергии тела — кинетическую и потенциальную энергию.

Обратите внимание!



1. Деформированное тело, поднятое над Землёй и движущееся тело способны совершить работу, значит, они обладают энергией.

2. Для того чтобы тело совершило работу, необходимо сначала совершить работу над телом.

3. Если внешняя сила выполняет работу по изменению механического состояния тела, то энергия тела увеличивается.

4. Если тело выполняет работу против внешних сил, то его энергия уменьшается.

Слова и словосочетания

энергия
способность
внутренняя
мера

кинетическая энергия
потенциальная энергия
обладать энергией
состояние тела

Упражнение 2.3

1. Какие тела могут совершать работу?
2. Что называется механической энергией?
3. Чему равна энергия?
4. Назовите единицу энергии в СИ.
5. Какие виды энергии вы знаете?
6. Как изменяется энергия тела, которое выполняет работу против внешних сил?
7. Назовите два вида механической энергии.

8. Электровоз при движении со скоростью 54 км/ч потребляет мощность 600 кВт. Найти силу тяги электровоза, если его КПД = 75 %.

9. Сила тяги локомотива $24 \cdot 10^4$ Н, мощность 3000 кВт. За какое время поезд пройдёт расстояние 10,8 км?

2.4. Виды механической энергии

2.4.1. Кинетическая энергия

Тело, которое движется, обладает энергией.

Кинетическая энергия E_k — это механическая энергия движения тела.

Тело, которое движется в определённой системе отсчёта, обладает кинетической энергией относительно этой системы отсчёта.

Выведем формулу кинетической энергии.

Под действием постоянной силы \vec{F} тело массой m начинает двигаться ($v_0=0$) и приобретает постоянное ускорение \vec{a} . Работа A этой силы $A = F \cdot S$. Подставим в эту формулу выражения для силы (из второго закона Ньютона) и для пути S (из кинематики):

$$F = ma; \quad S = \frac{at^2}{2},$$

тогда

$$A = ma \frac{at^2}{2} = \frac{m(at)^2}{2} = \frac{mv^2}{2}.$$

В начале движения скорость тела равна нулю ($v_0 = 0$), следовательно, его кинетическая энергия тоже равна нулю ($E_0 = 0$).

Работа силы: $A = \Delta E = E - E_0 = E$.

Значит, тело под действием силы \vec{F} приобрело кинетическую энергию

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

где m — масса тела; v — скорость тела.

Кинетическая энергия тела равна половине произведения массы тела на квадрат его скорости.

Если скорость тела не изменяется, то его кинетическая энергия в каждой точке траектории будет одинакова. Если начальная скорость тела не равна нулю, то сила изменяет кинетическую энергию от E_{k_0} до E_k .

Тогда

$$\Delta E = E_{\kappa} - E_{\kappa_0} = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2},$$

где E_{κ_0} — начальная кинетическая энергия тела; E_{κ} — кинетическая энергия тела в момент времени t .

2.4.2. Потенциальная энергия

Потенциальная энергия $E_{\text{п}}$ — это энергия взаимодействия тел. Величина потенциальной энергии зависит от взаимного положения тел, которые взаимодействуют между собой, или от положения одной части тела относительно другой.

Сила тяжести, сила упругости, гравитационная сила, кулоновская сила (электричество) зависят от положения данного тела относительно других тел или от взаимного расположения частей данного тела. Такие силы называются *консервативными силами*. Если в системе действуют консервативные силы, то система обладает потенциальной энергией.

Если консервативные силы совершают работу, то положение тел в системе изменяется. Изменяется и потенциальная энергия тела (системы).

Рассмотрим два вида состояния системы, при которых тело приобретает потенциальную энергию.

1. Потенциальная энергия в поле тяготения Земли.

Условно считают потенциальную энергию тела на поверхности Земли равной нулю $E_{\text{п}0} = 0$.

Будем поднимать тело массой m внешней силой \vec{F} на высоту h . Эта сила (сила тяги или сила натяжения нити) выполняет работу. При равномерном подъёме сила тяги будет равна силе тяжести. Работа силы тяги: $A = F_{\text{т}} h = mgh$. Но работа равна изменению энергии:

$$A = \Delta E_{\text{п}} = E_{\text{п}} - E_{\text{п}0}.$$

Поэтому на высоте h тело будет иметь потенциальную энергию $E_{\text{п}}$, которая равна:

$$E_{\text{п}} = mgh.$$

При выполнении работы внешней силой потенциальная энергия тела увеличивается.

Когда под действием силы тяжести $\vec{F}_{\text{т}}$ тело падает вниз, то его потенциальная энергия уменьшается.

Работа силы тяжести $A = mgh$. Изменение энергии $\Delta E_{\text{п}} = E_{\text{п}} - E_{\text{п}0}$. Но в момент падения на Землю $E_{\text{п}} = 0$ ($h = 0$). Поэтому $A = -E_{\text{п}0}$.

Знак «минус» означает, что при падении энергия тела под действием внутренней силы $\vec{F}_{\text{т}}$ уменьшается.

2. Потенциальная энергия упругой деформации.

Под действием внешней силы \vec{F} тело деформируется. При этом в теле возникает сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$, которая стремится вернуть тело в первоначальное состояние. Сила упругости может выполнить работу — вернуть тело в первоначальное состояние.

Рассмотрим это на примере пружины. Пусть $\vec{F}_{\text{упр}}$ — сила упругости, под действием которой пружина возвращается в первоначальное положение; Δx — смещение точки приложения силы \vec{F} ; точка O — положение равновесия пружины; $E_{\text{п}0}$ условно равно нулю. Тогда работа силы упругости по возвращению тела в первоначальное положение:

$$A_{\text{упр}} = \langle F_{\text{упр}} \rangle \Delta x,$$

где $\langle F_{\text{упр}} \rangle$ — средняя сила упругости.

Средняя сила упругости изменяется от максимального значения $\vec{F}_{\text{упр}}$ до нуля в положении равновесия.

Но работа равна изменению энергии:

$$A = \Delta E_{\text{п}} = E_{\text{п}} - E_{\text{п}0} = \langle F_{\text{упр}} \rangle \cdot \Delta x = \frac{F_{\text{упр}} + 0}{2} \Delta x.$$

При возвращении пружины в первоначальное положение сила упругости выполняет положительную работу ($A > 0$), а потенциальная энергия пружины уменьшается ($\Delta E_{\text{п}} < 0$).

$$A = E_{\text{п}} = \frac{F_{\text{упр}}}{2} \Delta x = \frac{k \Delta x}{2} \Delta x = \frac{k (\Delta x)^2}{2}.$$

Если $x_0 = 0$, то $\Delta x = x$ и формула потенциальной энергии упругой деформации имеет вид:

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}.$$

Работа силы упругости, так же как и работа силы тяжести, равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком.

Обратите внимание!



1. Кинетической энергией обладают тела, движущиеся с некоторой скоростью.
2. Потенциальная энергия определяется взаимным положением тел (или частей тела), между которыми действуют консервативные силы.
3. Чем больше смещение, тем большую потенциальную энергию имеет тело.
4. Уровень, на котором потенциальная энергия принимается равной нулю, называется нулевым уровнем.

Упражнение 2.4

1. Назовите виды механической энергии.
2. Что называется кинетической энергией?
3. По какой формуле можно вычислить кинетическую энергию?
4. Что называется потенциальной энергией?
5. Какие силы называются консервативными?
6. По какой формуле можно вычислить потенциальную энергию тела, поднятого над поверхностью?
7. Чему равна потенциальная энергия упругой деформации?
8. Локомотив тянет поезд массой 500 т по горизонтальному пути. Мощность локомотива постоянна и составляет 10^6 Вт. Коэффициент трения равен 0,01. Найти ускорение поезда в тот момент, когда его скорость равна 10 м/с.
9. На горизонтальном участке пути длиной 3 км скорость автомобиля увеличилась с 36 км/ч до 72 км/ч. Масса автомобиля 3 т. Коэффициент трения 0,01. Определить работу, совершённую двигателем автомобиля, и его среднюю мощность.
10. Подъёмный кран должен в течение 8 ч поднять 3000 т строительных материалов на высоту 9 м. Чему равна мощность двигателя крана, если коэффициент полезного действия мотора 60 %?
11. Какое ускорение в горизонтальном направлении сообщает телу пружина в тот момент, когда её энергия равна 50 Дж? Коэффициент упругости пружины равен 0,25 Н/м, масса тела 20 кг.
12. Определить кинетическую энергию тела массой 2 кг, брошенного вертикально вверх со скоростью 40 м/с, через 3 секунды после бросания.

2.5. Полная механическая энергия. Закон сохранения и превращения механической энергии

Полная механическая энергия тела — это сумма кинетической и потенциальной энергии этого тела:

$$E = E_k + E_p.$$

Если в системе действуют только консервативные силы (сила тяжести, сила упругости), то система называется *замкнутой*.

В замкнутой системе тел полная механическая энергия не изменяется. Она только превращается из одного вида в другой в равных количествах.

$$E = \text{const.}$$

Это утверждение называется законом сохранения механической энергии в механических процессах.

Проверим этот закон. Пусть тело массой m свободно падает ($v_0 = 0$) с высоты H под действием силы тяжести (рис. 2.2). Силу сопротивления воздуха учитывать не будем. Тогда систему тел «Земля — тело» можно считать замкнутой. Потенциальная энергия тела на поверхности Земли (точка C) равна нулю.

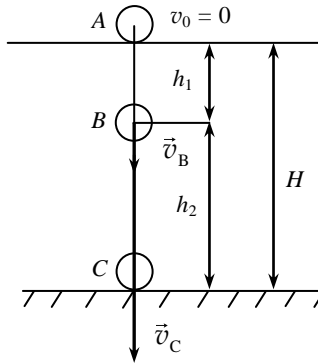


Рис. 2.2

Запишем формулы для определения полной механической энергии тела в разных точках траектории.

В точке A : $E_{пА} = mgH$; $E_{кА} = 0$; ($v_0 = 0$).

Полная энергия тела: $E_A = E_{пА} + E_{кА} = mgH$.

В точке B : $E_{пВ} = mgh_2$; $E_{кВ} = \frac{mv_B^2}{2}$.

Полная энергия тела: $E = mgh_2 + \frac{mv_B^2}{2}$.

Но $v_B^2 = 2gh_1$, поэтому

$$E_B = mgh_2 + mgh_1 = mgH.$$

В точке C :

$$E_{пC} = 0, \quad E_{кC} = \frac{mv_C^2}{2}.$$

Полная энергия:

$$E_C = E_{пC} + E_{кC} = \frac{mv_C^2}{2} = mgH, \quad \text{где } H = \frac{v_C^2}{2g}.$$

Мы видим, что полная энергия во всех точках одинакова:

$$E_A = E_B = E_C = mgH = \text{const}.$$

Покажем, что изменение потенциальной энергии по модулю равно изменению кинетической энергии. Изменение кинетической энергии при падении тела из точки A в точку B равно:

$$\Delta E_{к(A \rightarrow B)} = E_{кВ} - E_{кА} = \frac{mv_B^2}{2} = mgh_1,$$

где $v_B^2 = 2gh_1$.

Изменение потенциальной энергии за это время равно:

$$\Delta E_{п(A \rightarrow B)} = E_{пВ} - E_{пА} = mgh_2 - mgh_1 = -mgh_1.$$

Знак «минус» показывает, что потенциальная энергия при этом уменьшилась, но по модулю это изменение равно изменению кинетической энергии:

$$|\Delta E_{к}| = |\Delta E_{п}|.$$

Закон сохранения механической энергии справедлив только при движении без сопротивления. Но в реальных условиях движение без сопротивления невозможно. На практике этот закон можно применять только тогда, когда сопротивление очень мало и его можно не учитывать.

Если учесть сопротивление воздуха (или другие внешние силы), то изменение полной механической энергии незамкнутой системы равно работе этих внешних сил:

$$\Delta E = A_{с}.$$

При этом энергия не исчезает, а переходит в другие виды энергии (например, в тепловую). Механическая энергия может переходить от одного тела к другому.

Например, вагон, который движется, встречает на своем пути неподвижный вагон.

Скорость подвижного вагона уменьшается (или он может даже остановиться). Неподвижный вагон начинает двигаться. Он получает импульс от подвижного вагона, при этом его кинетическая энергия увеличивается.

Обратите внимание!



1. Замкнутой системой тел называется совокупность физических тел, на которую не действуют внешние силы.
2. Под действием консервативных сил происходит превращение кинетической энергии в потенциальную или наоборот.
3. Под действием неконсервативных сил происходит превращение механической энергии в другие виды энергии.

Слова и словосочетания

замкнутая система
превращение

полная механическая энергия
консервативные силы

Упражнение 2.5

1. Какая система называется замкнутой?
2. Чему равна полная энергия тела?
3. Сформулируйте закон сохранения механической энергии.
4. Чему равно изменение полной механической энергии незамкнутой системы тел?
5. С какой скоростью нужно бросить мяч с высоты 10 м, чтобы он, ударившись о землю, поднялся на высоту 20 м?
6. Тело массой 200 г падает с высоты 100 м. В момент удара о землю его скорость 40 м/с. Определить работу сил сопротивления воздуха.
7. Пуля массой 10 г летит со скоростью 500 м/с, пробивает доску толщиной 50 см и вылетает со скоростью 200 м/с. Определить среднюю силу сопротивления, которая действовала на пулю.
8. Тело массой 3 кг висит на нити. Нить с телом отклоняют на 90° и отпускают. Найти силу натяжения нити в нижней точке. Силу сопротивления и деформацию нити не учитывать.

2.6. Центральный удар

Удар — это кратковременное взаимодействие тел, при котором происходит изменение скоростей.

Удар называется *центральный*, если направление действия внешней силы проходит через центр тела.

При ударе тел возникает их деформация. Деформация бывает упругая и остаточная.

Упругая деформация — это деформация, которая исчезает после взаимодействия тел.

Остаточная деформация — это деформация, которая остаётся после взаимодействия тел.

Абсолютно упругий удар — это удар, при котором механическая энергия системы не изменяется. Полная механическая энергия системы до удара равна полной механической энергии после удара. При абсолютно упругом ударе нет остаточной деформации.

Рассмотрим это на примере соударения двух шаров с массами m_1 и m_2 , которые движутся навстречу друг другу со скоростями \vec{v}_1 и \vec{v}_2 (рис. 2.3).

При ударе возникают упругие силы. Под действием сил скорости шаров изменятся и станут равными \vec{u}_1 и \vec{u}_2 .



Рис. 2.3

Если удар абсолютно упругий и система замкнутая, то для нахождения неизвестных величин можно использовать закон сохранения и превращения энергии, а также закон сохранения импульса системы:

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

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

При решении этих уравнений можно определить скорости шаров после удара.

Абсолютно неупругий удар — это удар, в результате которого тела начинают двигаться с одинаковой скоростью или не движутся.

Пусть два тела массами m_1 и m_2 движутся со скоростями \vec{v}_1 и \vec{v}_2 (рис. 2.4). После абсолютно неупругого удара шары движутся вместе со скоростью \vec{u} .



Рис. 2.4

При абсолютно неупругом ударе полная механическая энергия не сохраняется, часть её идёт на работу по деформации тел или на нагревание тел.

В этом случае закон сохранения и превращения энергии имеет вид:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u^2}{2} + \frac{m_2 u^2}{2} + A.$$

Закон сохранения импульса:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) \vec{u}.$$

Решая эти уравнения, можно найти общую скорость тел \vec{u} после абсолютно неупругого удара.

Слова и словосочетания

удар	центральный удар
центр	упругая деформация
упругий	остаточная деформация
абсолютно	нагревание

Упражнение 2.6

1. Что называется ударом?
2. Что называется упругой деформацией?
3. Что называется остаточной деформацией?
4. Что называется абсолютно упругим ударом?
5. Что называется абсолютно неупругим ударом?
6. Шар массой 2 кг движется по столу со скоростью 2 м/с и попадает в неподвижный шар, масса которого 3 кг. Чему равны скорости шаров после удара, если удар считать абсолютно упругим? Трение не учитывать.



3. СТАТИКА

3.1. Условия равновесия тела

Статика — это часть механики, которая изучает условия равновесия тела или системы тел.

Механическая система находится в равновесии, если все точки системы покоятся относительно выбранной системы отсчёта.

Если система покоится относительно инерциальной системы отсчёта, то такое равновесие называется *абсолютным*.

Если система покоится относительно неинерциальной системы отсчёта, то такое равновесие называется *относительным*.

В статике тело рассматривают как систему материальных точек. Самой простой системой материальных точек является абсолютно твёрдое тело, т.е. тело, которое не деформируется под действием любой системы сил.

Любое тело может двигаться поступательно и вращаться вокруг некоторой оси. Если тело не может вращаться, то оно будет находиться в равновесии при выполнении следующих условий.

Условие равновесия тела без оси вращения: тело находится в равновесии, если векторная сумма всех действующих на тело сил равна нулю и линии действия всех сил пересекаются в одной точке:

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0.$$

Если тело имеет неподвижную ось вращения, то под действием силы оно приобретает угловое ускорение и совершает вращательное движение. Сила, линия действия которой проходит через ось вращения, не вызывает вращения тела.

Вращение, вызываемое силой \vec{F} , зависит от величины силы и от точки её приложения.

Плечо силы d — это длина перпендикуляра, проведённого от оси вращения к линии действия силы.

Момент силы M — это физическая величина, равная произведению модуля силы на её плечо.

Если сила вращает тело по часовой стрелке, то момент этой силы *отрицательный*.

Если сила вращает тело против часовой стрелки, то момент этой силы *положительный*.

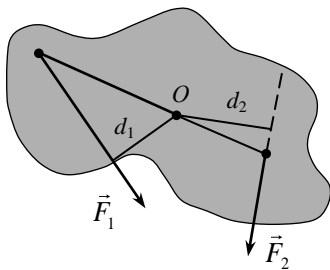


Рис. 3.1

Пусть на тело действуют силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 (рис. 3.1).

Тогда d_1 — плечо силы \vec{F}_1 ; d_2 — плечо силы \vec{F}_2 .

Момент силы \vec{F}_1 : $M_1 = F_1 d_1$; момент силы \vec{F}_2 : $M_2 = -F_2 d_2$.

В СИ единица момента силы — ньютон-метр: $[M] = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Момент силы является мерой вращательного действия силы.

Условие равновесия тела, имеющего ось вращения: тело, имеющее неподвижную ось вращения, находится в равновесии, если алгебраическая сумма моментов действующих на тело сил равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n M_i = 0,$$

где n — число действующих на тело сил.

Таким образом, можно сформулировать *условие равновесия любого твёрдого тела*: любое твёрдое тело находится в равновесии, если:

1) векторная сумма действующих на тело сил равна нулю

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{0};$$

2) алгебраическая сумма моментов сил равна нулю

$$\sum_{i=1}^n M_i = 0.$$

Центр тяжести тела — это точка приложения равнодействующей всех сил тяжести, действующих на отдельные части тела.

Если положение тела в пространстве изменяется, то положение центра тяжести не изменяется.

Центр масс — это точка тела, в которой пересекаются линии действия сил, приводящих тело в состояние покоя или поступательного движения.

Если линейные размеры тела малы по сравнению с радиусом Земли, то центр масс тела совпадает с центром тяжести этого тела.

Слова и словосочетания

абсолютный	относительный
условие	равновесие
вращение	ось вращения
центр масс	плечо силы
центр тяжести	момент силы
положительный	отрицательный

Упражнение 3.1

1. Сформулируйте условие равновесия тела, у которого нет оси вращения.
2. Сформулируйте условие равновесия тела, у которого есть ось вращения.
3. Что называется центром масс тела?
4. Что называется центром тяжести тела?
5. Что называется плечом силы?
6. Что называется моментом силы?
7. Сформулируйте условие равновесия любого твёрдого тела.
8. Когда центр масс тела совпадает с его центром тяжести?
9. Может ли тело вращаться под действием уравновешенных сил?
10. Деревянный брусок лежит на наклонной плоскости. Масса бруска 2 кг, длина наклонной плоскости 1 м, высота 60 см. Коэффициент трения бруска о наклонную плоскость равен 0,4. С какой силой нужно прижать брусок к наклонной плоскости, чтобы он оставался в равновесии?
11. Груз весом 150 Н подвешен на нити. Сила \vec{F} действует на груз в горизонтальном направлении и отклоняет груз. Нить образует с вертикалью угол $\alpha = 30^\circ$. Определить силу \vec{F} и силу натяжения нити.

3.2. Виды равновесия

Различают три вида равновесия: *безразличное*, *неустойчивое*, *устойчивое*. В состоянии равновесия на тело действуют сила тяжести $m\vec{g}$ и сила реакции поверхности \vec{N} .

Векторная сумма этих сил равна нулю $m\vec{g} + \vec{N} = 0$.

Равновесие тела в некотором положении называется *безразличным*, если при любых малых отклонениях тела от этого положения не возникает сил, стремящихся вернуть тело в начальное положение или ещё более отклонить тело от начального положения (рис. 3.2, *а*).

При выводе тела из состояния безразличного равновесия потенциальная энергия тела не изменяется.

Равновесие тела в некотором положении называется *неустойчивым*, если при малых отклонениях тела от этого положения возникают силы, которые стремятся ещё больше отклонить тело от начального положения (рис. 3.2, *б*). Если тело вывести из равновесия, то возникает сила $\vec{F} = m\vec{g} + \vec{N}$. Она вызывает ещё большее отклонение тела от положения равновесия.

При выводе тела из состояния неустойчивого равновесия потенциальная энергия тела уменьшается.

Равновесие тела в некотором положении называется *устойчивым*, если при любых малых отклонениях тела от этого положения возникают силы, которые стремятся возвратить тело в начальное положение (рис. 3.2, *в*).

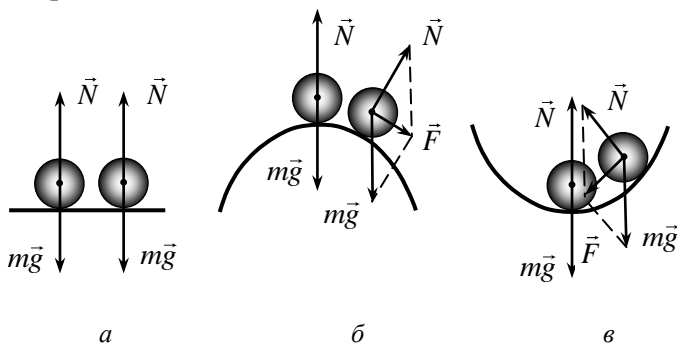


Рис. 3.2

При выводе тела из состояния устойчивого равновесия потенциальная энергия тела увеличивается.

Если тело имеет несколько точек опоры или плоскость опоры, то оно будет находиться в равновесии, если вертикальная линия, проведённая через центр тяжести тела, проходит внутри контура, образованного точками опоры.

Равновесие тел, имеющих плоскость опоры, будет тем устойчивее, чем больше площадь опоры тела и чем ниже лежит центр тяжести тела.

Слова и словосочетания

вывести из равновесия	равновесие
абсолютное	относительное
устойчивое	неустойчивое
пол	условие равновесия
трос	стена
балка	блок
лестница	кронштейн

Упражнение 3.2

1. Какие виды равновесия Вы знаете?
2. Какое равновесие называется устойчивым?
3. Какое равновесие называется безразличным?
4. Какое равновесие называется неустойчивым?
5. Как изменяется потенциальная энергия тела при выводе его из состояния равновесия?

6. Лестница длиной 3 м прислонена к стене. На середине лестницы в точке O стоит человек весом 500 Н. Коэффициент трения между лестницей и полом 0,4, а между лестницей и стеной 0,5. Определить наименьший угол α , при котором лестница сохраняет равновесие, а также силы давления на пол и на стену (вес лестницы не учитывать).

7. Балка АВ весом 600 Н лежит на двух опорах A и C (рис. 3.3). Определить силу давления балки на опоры A и C , если $AC = 2BC = 10$ м.

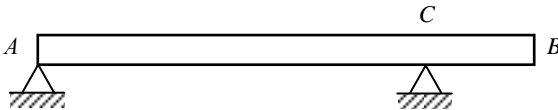
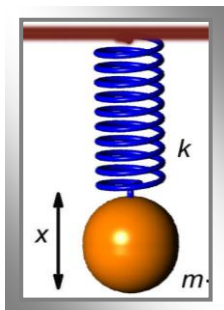


Рис. 3.3





4. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

4.1. Колебательное движение. Характеристики колебательного движения

Пусть на нити подвешено тело. На тело действует сила тяжести и сила натяжения нити. Векторная сумма сил равна нулю. Тело находится в состоянии равновесия.

Потенциальная энергия тела минимальная, поэтому тело находится в состоянии устойчивого равновесия. Выведем тело из состояния равновесия. Под действием внутренних сил тело будет совершать отклонения от положения равновесия то в одну, то в другую сторону.

Такое движение тела называется колебательным движением, или колебанием.

Колеблющееся тело всегда связано с другими телами и образует колебательную систему.

Колебания — это движение системы, при котором она периодически отклоняется от положения равновесия то в одну, то в другую сторону.

Свободные или собственные колебания — это колебания, которые система совершает под действием внутренних сил.

Вынужденные колебания — это колебания, возникающие в системе под действием периодических внешних сил.

Любое тело, которое подвешено или закреплено так, что находится в устойчивом равновесии (центр тяжести ниже точки подвеса), может выполнять свободные колебания (рис. 4.1).

Такое тело называется *маятником*.

Свободные колебания совершаются под действием внутренних сил системы после того, как система была выведена из состояния равновесия.

Колебания груза на пружине (рис. 4.1, а) или колебания маятника (рис. 4.1, б) являются свободными колебаниями.

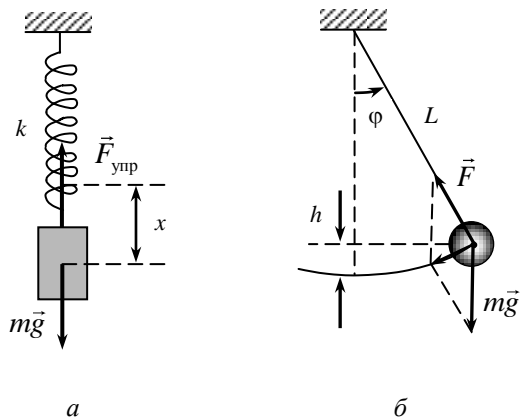


Рис. 4.1

Математический маятник — это материальная точка, подвешенная на длинной нерастяжимой нити.

Рассмотрим свободное колебание математического маятника (рис. 4.2). Проведём ось координат Ox . Начало координат совпадает с положением равновесия маятника. Координата x в данный момент времени — это *смещение*.

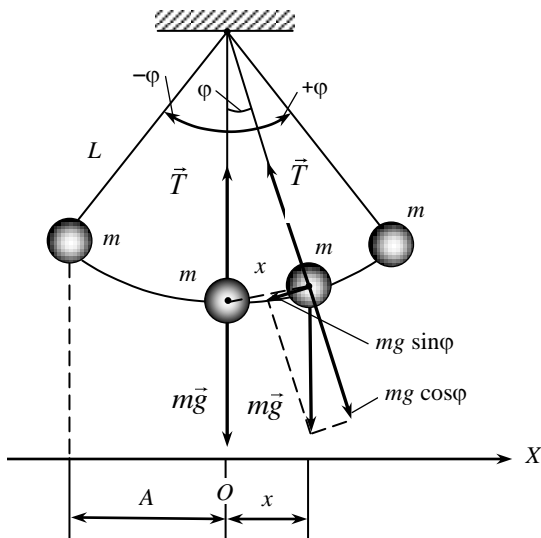


Рис. 4.2

Амплитуда A — это максимальное смещение маятника от положения равновесия.

В положении равновесия на маятник действуют сила тяжести $m\vec{g}$ и сила натяжения нити \vec{T} , которые уравновешены.

При отклонении маятника из положения равновесия на некоторый угол φ появляется касательная составляющая силы тяжести $F_{\tau} = -mg \sin \varphi$. Знак «минус» в этой формуле означает, что касательная составляющая направлена в сторону, противоположную отклонению маятника.

Характеристиками колебательного движения являются период и частота.

Период колебания T — это время одного полного колебания.

Единица периода в СИ — секунда: $[T] = 1 \text{ с}$.

Если за время t тело совершает N колебаний, то период колебаний можно определить по формуле:

$$T = \frac{t}{N}.$$

Если известны длина нити l и ускорение свободного падения g , то период математического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Пусть тело массой m подвешено на пружине с коэффициентом упругости k и совершает колебания.

Такое тело называется *пружинным маятником* (см. рис. 4.1, а). Период колебаний пружинного маятника равен:

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

Частота колебаний ν — это величина, обратная периоду:

$$\nu = \frac{N}{t} = \frac{1}{T}.$$

Частота — это число колебаний, которые совершает тело за единицу времени.

Единица частоты в СИ — герц: $[\nu] = 1/\text{с} = 1 \text{ с}^{-1} = 1 \text{ Гц}$.

Герц равен частоте колебаний, при которой за 1 секунду совершается одно полное колебание.

Осциллограф — прибор для записи колебаний.

Кривая линия, которую записывает осциллограф, называется осциллограммой.

Осциллограмма — это график зависимости смещения маятника от времени. График имеет вид синусоиды или косинусоиды.

Гармонические колебания — это колебания, у которых график зависимости смещения от времени является синусоидой или косинусоидой (рис. 4.3).

Кривая 1 отличается от кривой 2 значением периода колебаний ($T' = T / 2$).

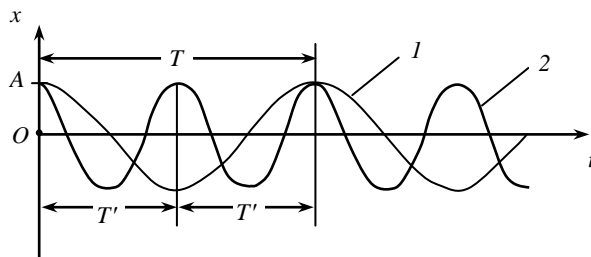


Рис. 4.3

Слова и словосочетания

колебание
свободный
вынужденный
затухающий
гармонический
волна
колебательный
маятник
пружина
синусоида
косинусоида
сдвигать, сдвинуть
смещение
прохождение
обратный
герц
резонанс
уравнение

свободные колебания
затухающие колебания
вынужденные колебания
гармонические колебания
математический маятник
пружинный маятник
полное колебание
положение равновесия
амплитуда
частота
период
фаза
фаза колебаний
круговая частота
сдвиг фаз
колебаться
совершать
осциллограф

Упражнение 4.1

1. Какое движение называется колебательным?
2. Что называется свободными колебаниями?
3. Что называют математическим маятником?
4. Какое тело может быть маятником?
5. Назовите характеристики колебательного движения.
6. Что называется амплитудой колебаний?
7. Что называется периодом колебаний?
8. Какая единица периода в СИ?
9. Что называется частотой колебаний? Какая единица частоты в СИ?
10. Что такое осциллограф?
11. Какие колебания называются гармоническими?
12. Маятник длиной 0,25 м совершает 120 колебаний в течение 120 с. Чему равно ускорение свободного падения?
13. На пружине, жёсткость которой 20 Н/м, висит тело массой 0,2 кг. Определить период гармонических колебаний, возникающих при отклонении тела от положения равновесия.

4.2. Уравнение смещения гармонических колебаний

Пусть точка M совершает равномерное движение по окружности с радиусом R (рис. 4.4). Точка N — проекция точки M на ось OX — совершает колебательное движение относительно диаметра.

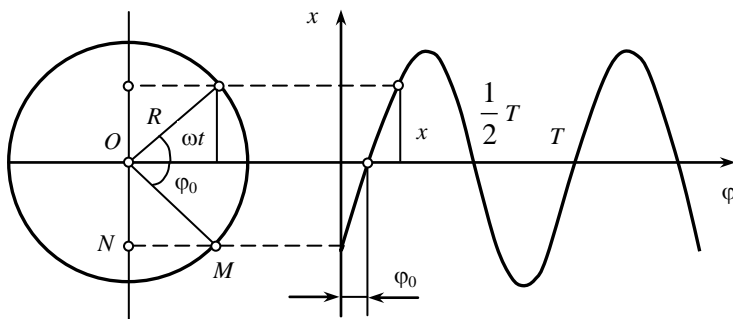


Рис. 4.4

Смещение точки N можно выразить через радиус:

$$x = R \sin \varphi, \quad (4.1)$$

но $R = A$, где A — амплитуда колебаний точки N ; $\varphi = \omega t$ — угол поворота точки M при движении по окружности; ω — угловая скорость вращения точки M .

Подставим значения R и φ в уравнение (4.1) и получим:

$$x = A \sin \omega t.$$

Эта формула называется уравнением смещения гармонических колебаний.

При колебательном движении величина $\varphi = \omega t$ называется *фазой колебаний*, величина ω называется *круговой (или циклической) частотой колебаний*.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu.$$

Круговая частота колебаний равна количеству колебаний за 2π единиц времени. Единица круговой частоты в СИ — радиан в секунду: $[\omega] = 1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

Уравнение смещения гармонических колебаний можно записать в виде:

$$x = A \sin \varphi = A \sin \omega t = A \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right) = A \sin 2\pi\nu t. \quad (4.2)$$

Уравнение (4.2) описывает колебательное движение точки, если она в начальный момент времени была в равновесии.

Если в начальный момент времени точка N , которая совершает колебания, не находится в равновесии, тогда уравнение смещения гармонических колебаний будет иметь вид:

$$x = A \sin (\omega t + \varphi_0), \text{ или } x = A \cos (\omega t + \varphi_0). \quad (4.3)$$

Это уравнение смещения гармонических колебаний в общем виде. Величина $\omega t + \varphi_0$ — это фаза колебаний; φ_0 — начальная фаза колебаний.

Фаза колебаний — это физическая величина, которая характеризует положение тела в данный момент времени t .

Единица фазы колебаний — радиан.

Числовое значение фазы колебаний зависит от того, какой момент времени принят за начало отсчёта времени.

Из уравнения (4.3) следует, что гармоническое колебание определяется тремя постоянными параметрами:

1) амплитудой A ;

2) круговой частотой $\omega = \frac{2\pi}{T}$;

3) начальной фазой φ_0 .

Упражнение 4.2

1. Что называется круговой частотой колебаний?
2. Что называется фазой колебаний?
3. Написать уравнение смещения гармонических колебаний в общем виде.
4. Какими постоянными параметрами определяется гармоническое колебание?

5. Колебание точки задано уравнением $x = 10 \sin \left(15,7t + \frac{\pi}{4} \right)$ см. Найти амплитуду, частоту и период колебаний. Определить смещение точки и фазу колебаний в момент времени $t = \frac{T}{4}$.

6. Груз массой 9,86 кг колеблется на пружине, период колебаний 2 с. Чему равен коэффициент упругости пружины? Какова частота колебаний?

7. Написать уравнение гармонического колебания, амплитуда которого 10 см, период 10 с, начальная фаза равна нулю. Найти смещение точки через 12 с после начала колебаний.

4.3. Скорость и ускорение при гармонических колебаниях

Колебательное движение точки является неравномерным движением. В разные моменты времени скорость колеблющейся материальной точки разная. Модуль скорости гармонически колеблющейся точки в момент времени t можно определить так:

$$v(t) = x'(t).$$

Тогда

$$v = \omega A \cos(\omega t + \varphi_0).$$

На рис. 4.5 приведены графики координаты, скорости и ускорения тела, совершающего гармонические колебания.

В момент прохождения точки через положение равновесия (координата равна нулю) модуль скорости максимальный. Когда координата максимальна по модулю, скорость равна нулю.

Максимальное по модулю значение скорости называется *амплитудой скорости*.

$v_{\max} = \omega \cdot A$ — амплитуда скорости.

Мгновенную скорость точки (в момент времени t) можно определить по формуле:

$$v = v_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0).$$

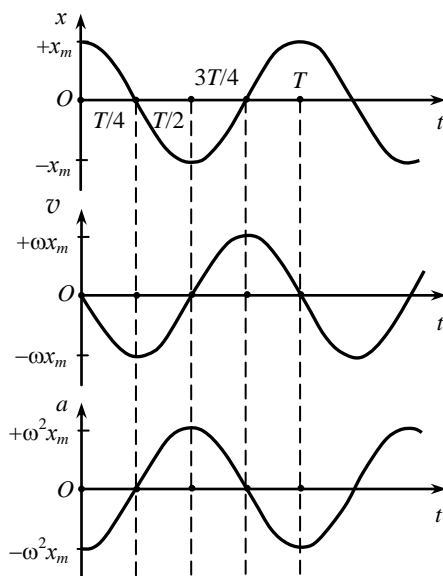


Рис. 4.5

Ускорение колеблющейся по гармоническому закону точки в разные моменты времени разное.

Модуль ускорения точки в момент времени t можно определить так:

$$a(t) = x''(t) = v'(t).$$

Тогда

$$a = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 x.$$

Ускорение и координата (смещение) одновременно становятся максимальными по модулю, но имеют противоположные знаки.

Максимальное по модулю значение ускорения называется *амплитудой ускорения*.

$$a_{\max} = \omega^2 A \text{ — амплитуда ускорения.}$$

Следовательно, формулу ускорения колеблющейся точки можно записать так:

$$a = -a_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0).$$

Обратите внимание!



1. Тело, выведенное из состояния устойчивого равновесия, может совершать колебания.
2. Гармонические колебания являются наиболее важным видом колебаний, эти колебания часто встречаются на практике.
3. Гармонические колебания совершаются под действием силы, пропорциональной смещению и направленной к положению равновесия.

Упражнение 4.3

1. Что называется амплитудой скорости?
2. Что называется амплитудой ускорения?
3. Как определить скорость и ускорение колеблющейся точки в момент времени t .
4. Точка совершает гармонические колебания с периодом 2 с. Амплитуда колебаний 10 см. Найти смещение, скорость, ускорение точки через 0,2 с после прохождения через положение равновесия. Начало колебаний совпадало с положением равновесия.
5. Написать уравнение гармонического колебательного движения, если максимальное ускорение $49,3 \text{ см/с}^2$, период колебаний 2 с и смещение точки от положения равновесия в начальный момент времени 25 мм.

4.4. Превращение энергии при механических колебаниях. Резонанс

Различают свободные и вынужденные механические колебания. В случае свободных колебаний системе первоначально сообщается энергия и в дальнейшем воздействие внешних сил на систему отсутствует.

При вынужденных колебаниях внешняя периодическая сила называется *вынуждающей*. Она сообщает колебательной системе дополнительную энергию, идущую на восполнение энергетических потерь, происходящих из-за трения.

Рассмотрим процесс превращения энергии на примере колебаний груза на нити.

При отклонении маятника от положения равновесия он поднимается на высоту h относительно нулевого уровня, следовательно, в точке A маятник обладает потенциальной энергией mgh . При движении к положению равновесия, к точке O , уменьшается высо-

та до нуля, а скорость груза увеличивается, и в точке O вся потенциальная энергия mgh превратится в кинетическую энергию $\frac{mv^2}{2}$.

В положении равновесия кинетическая энергия имеет максимальное значение, а потенциальная энергия минимальна. После прохождения положения равновесия происходит превращение кинетической энергии в потенциальную, скорость маятника уменьшается и при максимальном отклонении от положения равновесия становится равной нулю. При колебательном движении всегда происходят периодические превращения его кинетической и потенциальной энергии.

При свободных механических колебаниях неизбежно происходит потеря энергии на преодоление сил сопротивления.

В отличие от свободных колебаний, когда система получает энергию лишь один раз (при выведении системы из состояния равновесия), в случае вынужденных колебаний система поглощает эту энергию от источника внешней периодической силы непрерывно. Эта энергия восполняет потери, расходуемые на преодоление трения, и потому полная энергия колебательной системы по-прежнему остается неизменной.

Частота вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы. В случае, когда частота вынуждающей силы ν совпадает с собственной частотой колебательной системы ν_0 , происходит резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний — *резонанс*.

Резонанс возникает из-за того, что при $\nu = \nu_0$ внешняя сила, действуя в такт со свободными колебаниями, всё время сонаправлена со скоростью колеблющегося тела и совершает положительную работу: энергия колеблющегося тела увеличивается, и амплитуда его колебаний становится большой.

График зависимости амплитуды вынужденных колебаний A_m от частоты вынуждающей силы ν представлен на рис. 4.6, этот график называется резонансной кривой.

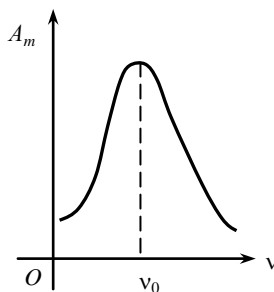


Рис. 4.6

Явление резонанса может быть причиной разрушения машин, зданий, мостов, если собственные их частоты совпадают с частотой периодически действующей силы. Поэтому, например, двигатели в

автомобилях устанавливают на специальных амортизаторах, а воинским подразделениям при движении по мосту запрещается идти «в ногу».

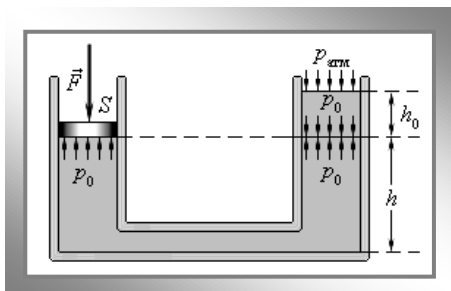
При отсутствии трения амплитуда вынужденных колебаний при резонансе должна возрасти со временем неограниченно.

В реальных системах амплитуда в установившемся режиме резонанса определяется условием потерь энергии в течение периода и работы внешней силы за то же время. Чем меньше трение, тем больше амплитуда при резонансе.

Явление резонанса играет большую роль в ряде природных, научных и производственных процессов.

Например, необходимо учитывать явление резонанса при проектировании мостов, зданий и других сооружений, испытывающих вибрацию под нагрузкой, в противном случае при определённых условиях эти сооружения могут быть разрушены.





5. МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

5.1. Механические свойства жидкостей и газов

Механические свойства жидкостей и газов отличаются от свойств твёрдых тел. Под действием внешних сил жидкости изменяют свою форму, а газы — форму и объём.

Основные понятия статики жидкости и газа: текучесть, сжимаемость, несжимаемость, атмосферное давление, давление внутри газа и жидкости, плавание тел в жидкости и газе.

Рассмотрим эти понятия более подробно. Взаимное притяжение между молекулами жидкости меньше, чем в твёрдых телах. Поэтому частицы жидкости более подвижны, чем частицы твёрдых тел. Ещё большей подвижностью обладают частицы газа. Это даёт возможность жидкостям и газам занимать сосуд любой формы, т. е. приобретать форму сосуда. При этом упругие силы в жидкости и газе не возникают.

Под действием внешней силы жидкости и газы начинают двигаться в направлении действия силы. Говорят, что жидкость (или газ) течёт.

Основное свойство жидкостей и газов — текучесть.

Текучесть — это способность одних слоёв жидкости (или газа) двигаться относительно других слоёв.

Смещение слоёв жидкости происходит под действием сил, касательных к свободной поверхности. Под действием сил, нормальных к поверхности, жидкость находится в состоянии покоя. При этом силы сжимают жидкость, и в ней создаётся давление.

Давление — это физическая величина, равная отношению силы, перпендикулярной поверхности, к площади этой поверхности.

Давление характеризует действие силы на физическое тело.

Будем обозначать давление буквой p .

Сила, действующая перпендикулярно поверхности жидкости, называется *силой давления*.

Если S — площадь поверхности, на которую действует сила давления F , то давление можно найти по формуле:

$$p = \frac{F}{S}.$$

Если силы давления распределены равномерно по поверхности, то давление одинаково в каждой её точке.

Единица давления в СИ — паскаль: $[p] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 1 \text{ Па}$.

Единицей давления называют такое давление, при котором сила давления, действующая на единицу площади, равна единице силы.

Несмотря на то, что жидкость течёт, она сохраняет свой объём. Если на жидкость действует относительно большая внешняя сила, то её объём может изменяться, но очень незначительно. При этом в жидкости возникают упругие силы.

В обычном состоянии (под действием незначительных сил) объём жидкости не изменяется, поэтому мы будем говорить об *абсолютно несжимаемой жидкости*.

Плотность абсолютно несжимаемой жидкости одинакова по всему объёму.

Обратите внимание!



1. Давление в данном месте жидкости не зависит от ориентировки площадки, на которой оно измеряется.

Давление зависит от степени сжатия жидкости в данном месте.

2. В технике часто употребляют единицу давления бар.

1 бар = 10^5 Па.

Слова и словосочетания

жидкость

газ

подвижность

течь

сосуд

слой

касательная

давление

текученье

несжимаемость

приобретать форму

сжиматься

способность

свободная поверхность

несжимаемая жидкость

сила давления

Упражнение 5.1

1. Чем отличаются свойства жидкостей и газов от свойств твёрдых тел?
2. Назвать основное свойство жидкости.
3. Что такое текучесть и почему жидкости обладают этим свойством?
4. Что такое абсолютно несжимаемая жидкость?
5. Что такое давление?
6. Назвать единицу давления в системе СИ.

5.2. Передача давления жидкостями и газами

Известно, что твёрдые тела передают внешнее давление по направлению действия силы.

Жидкости и газы не имеют определённой формы, поэтому они передают внешнее давление по всем направлениям.

Французский учёный Блез Паскаль (1623—1662) изучал давление жидкости и газа и установил, что жидкости и газы передают давление по всем направлениям и что величина передаваемого ими давления одинакова во всех направлениях (рис. 5.1): $p_1 = p_2 = p_3$.

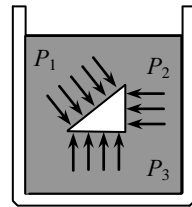


Рис. 5.1

Это открытие носит название закона Паскаля:

жидкость и газ передают внешнее давление во все стороны одинаково.

Это свойство жидкостей и газов лежит в основе работы многих гидравлических и пневматических машин и механизмов (домкрат, подъемник, тормоза). Рассмотрим действие простого гидравлического пресса (рис. 5.2).

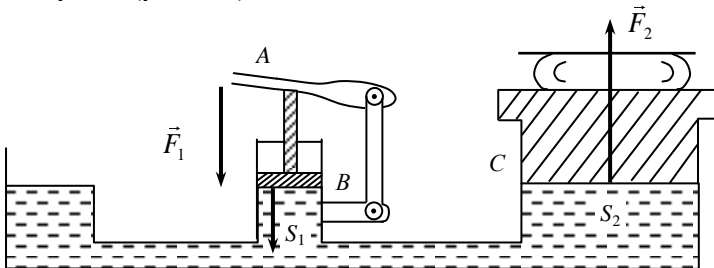


Рис. 5.2

При помощи рычага A будем действовать на малый поршень B с площадью поверхности S_1 . Малый поршень будет оказывать на жидкость давление p . Известно, что давление определяется силой давления, которая действует на единицу площади, поэтому $p = F_1/S_1$.

По закону Паскаля это давление будет передаваться жидкостью по всем направлениям без изменения. Следовательно, на поверхности цилиндров (B и C), трубки и поршней жидкость будет производить давление p .

Если площадь большого поршня S_2 , то сила давления на него будет равна:

$$F_2 = p \cdot S_2.$$

Тогда давление можно выразить в следующем виде:

$$p = \frac{F_2}{S_2}.$$

Сравнив выражения $p = \frac{F_1}{S_1}$ и $p = \frac{F_2}{S_2}$, получим:

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}, \quad \text{или} \quad \frac{S_2}{S_1} = \frac{F_2}{F_1}.$$

Во сколько раз площадь S_2 большого поршня будет больше площади S_1 малого поршня, во столько же раз сила давления F_2 будет больше силы давления F_1 .

Таким образом, при помощи гидравлического пресса можно получить выигрыш в силе. Это правило выполняется для любых идеальных машин, в которых не действуют силы трения. Оно называется «золотым правилом механики».

Гидравлические машины (рис. 5.3), используемые для подъёма грузов, называются домкратами. Они широко применяются и как гидравлические прессы. В качестве жидкости обычно используют минеральные масла.

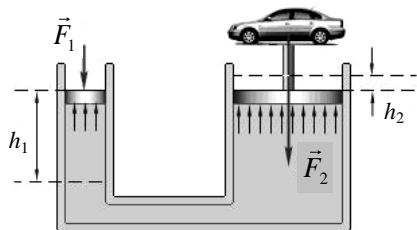


Рис. 5.3

Гидравлический пресс состоит из двух цилиндров разного диаметра, снабжённых поршнями и соединённых между собой.

Пространство под поршнями заполняется жидкостью.

К малому поршню площадью S_1 приложена сила F_1 , которая уравнивает силу F_2 , действующую на большой поршень с площадью S_2 .

Сила F_2 во столько раз больше силы F_1 , во сколько площадь второго поршня больше площади первого:

$$F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}.$$

Если первый поршень переместился на расстояние h_1 , то второй поршень под действием вытесненной жидкости поднимется на расстояние h_2 :

$$h_2 = h_1 \frac{S_1}{S_2}.$$

И здесь соблюдается «золотое правило механики»: сколько выигрывается в силе, столько теряется в пути.

Слова и словосочетания

передавать	гидравлический	внешнее давление
поршень	пневматический	оказывать давление
давить	дно	пресс
домкрат	стенка	минеральное масло

Упражнение 5.2

1. Сформулируйте закон Паскаля.
2. В основе работы каких механизмов лежит закон Паскаля?
3. Для чего используют гидравлические машины?
4. В чём заключается «золотое правило механики»?
5. К малому поршню гидравлической машины приложена сила 196 Н. Под действием этой силы поршень за один ход опускается на 25 см. А большой поршень поднимается на 5 см. Какая сила давления передаётся при этом на большой поршень?
6. Малый поршень гидравлического пресса за один ход опускается на расстояние 20 см, а большой поршень поднимается на 1 см. С какой силой действует большой поршень на тело, если на малый поршень действует сила 500 Н?

5.3. Давление жидкости на дно и стенки сосуда

На все жидкости на Земле действует сила тяжести \vec{F}_T . Согласно третьему закону Ньютона жидкость действует на дно и стенки сосуда с силой веса:

$$\vec{P} = -\vec{F}_T, \quad P = mg.$$

Давление жидкости определяется известной формулой

$$p = \frac{F}{S}, \quad (5.1)$$

где F — сила давления; S — площадь поверхности, на которую давит жидкость.

Если жидкость находится в состоянии равновесия, то сила давления равна весу жидкости и, следовательно, силе тяжести, действующей на жидкость:

$$F = P = mg.$$

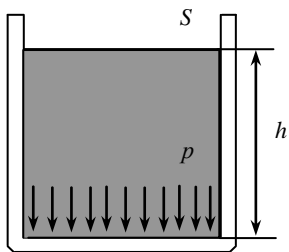


Рис. 5.4

Опыт показывает, что давление жидкости на дно сосуда не зависит от формы сосуда, но зависит от высоты h столба жидкости в этом сосуде (рис. 5.4).

Так как жидкость обладает свойством текучести, то под действием силы тяжести она оказывает давление и на стенки сосуда.

Рассчитаем давление жидкости на дно цилиндрического сосуда.

Пусть S — площадь дна сосуда, а h — высота столба жидкости. Сила давления равна весу столба жидкости $F = mg$.

Массу жидкости в сосуде определим по формуле:

$$m = \rho ghS,$$

где ρ — плотность жидкости.

Подставим эти формулы в выражение (5.1) и рассчитаем давление жидкости на дно и стенки сосуда:

$$p \frac{mg}{S} = \frac{\rho ghS}{S} = \rho gh. \quad (5.2)$$

Слои жидкости, которые лежат выше данного слоя, оказывают на него давление.

Данный слой жидкости, по закону Паскаля, передаёт внешнее давление по всем направлениям без изменения. Это значит, что данный слой жидкости оказывает равное по величине давление на нижние слои жидкости, на верхние слои и на стенки сосуда. Следовательно, давление жидкости на стенки сосуда зависит от глубины, на которой мы хотим определить давление.

Например, давление жидкости на дно AA_1 (рис. 5.5): $p = \rho gh$, давление на слой BB_1 $p = \rho gh_1$. На открытую поверхность жидкости CC_1 в сосуде оказывает давление окружающий воздух (атмосфера). Следовательно, давление на стенки и дно сосуда будет состоять из давления жидкости и атмосферного давления:

$$p = \rho gh + p_{\text{атм.}}$$

В сообщающихся сосудах однородная жидкость устанавливается на одинаковом уровне, так как давление жидкости не зависит от формы сосудов, а зависит от высоты столба жидкости (рис. 5.6).

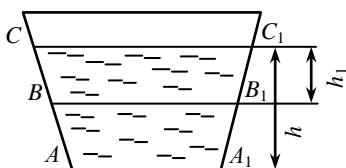


Рис. 5.5

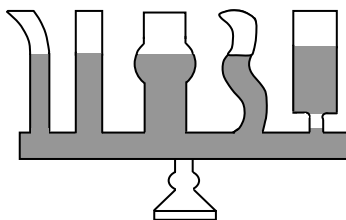


Рис. 5.6

Обратите внимание!



1. Давление, вызванное весом жидкости, называют гидростатическим давлением.
 2. Давление жидкости под действием силы тяжести зависит только от плотности жидкости и высоты столба жидкости.

3. Давление жидкости передаётся во всех направлениях одинаково.

4. В сообщающихся сосудах свободные поверхности однородной жидкости устанавливаются на одном уровне.

5. Свободные поверхности разных жидкостей, которые не смешиваются, при одинаковом внешнем давлении в сообщающихся сосудах устанавливаются на высотах h_1 и h_2 относительно их раз-

дела обратно пропорционально их плотностям: $\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$.

Слова и словосочетания

сосуд	сообщающиеся сосуды
уровень	столб жидкости
смешиваться	однородная жидкость
глубина	подводная лодка
море	морская вода
трубка	площадь сечения
ртуть	колесо трубки

Упражнение 5.3

1. От чего зависит давление жидкости?
2. Что называется гидростатическим давлением?
3. Записать формулу для определения давления жидкости на дно и стенки сосуда.
4. Как устанавливается жидкость в сообщающихся сосудах?
5. Подводная лодка находится на глубине моря 50 м. Найти силу давления на ее верхнюю часть площадью 130 м^2 . Плотность морской воды $\rho = 1,03 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.
6. В сообщающиеся сосуды разного сечения налили сначала ртуть, а потом в широкую трубку площадью сечения 8 см^2 налили воду массой 272 г. На сколько выше поднялся уровень ртути в узком колене, чем в широком? Плотность ртути $13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

5.4. Атмосферное давление

Землю окружает воздушная оболочка, которая называется атмосферой. Поверхность Земли является нижней границей атмосферы. Верхней границы атмосфера не имеет. 90 % всей массы воздуха находится в слое высотой 16 км.

Воздух, как и жидкость, притягивается Землёй. Поэтому он оказывает давление на нижние слои и на все тела, находящиеся в атмосфере. Это давление называется *атмосферным*.

Чем выше над поверхностью Земли находится слой воздуха, тем меньше давление он оказывает на другие тела.

Определить величину атмосферного давления по формуле $p = \rho gh$ невозможно, так как величина плотности воздуха не постоянна.

Величину атмосферного давления можно измерить на опыте. Опустим в воду конец стеклянной трубки, внутри которой находится поршень (рис. 5.7). Если поршень поднимать вверх, то за ним будет подниматься вода. Это объясняется тем, что в пространстве между поршнем и водой нет воздуха, и на воду не создаётся

давление внутри трубки. На остальную поверхность воды действует атмосферное давление, которое передается водой по всем направлениям. Под действием этого давления столб воды поднимается вместе с поршнем. Он будет подниматься до тех пор, пока его давление не станет равным атмосферному.

Ещё в 1643 году итальянский учёный Эванджелист Ториччели (1608—1647) на опыте определил атмосферное давление. Вместо воды использовалась ртуть. Стеклянную трубку длиной 1 м, закрытую с одного конца, наполняют ртутью и переворачивают открытым концом в сосуд с ртутью (рис. 5.8).

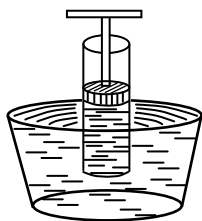


Рис. 5.7

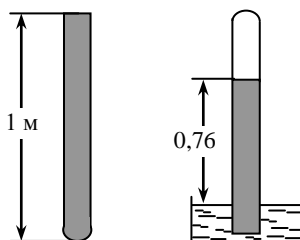


Рис. 5.8

Часть ртути выливается, а в трубке остается столб ртути определенной высоты. Этот столб удерживается атмосферным давлением.

При нормальных условиях высота столба ртути равна 76 см — это нормальное атмосферное давление, нормальная атмосфера (атм) $p = 76 \text{ см рт. ст.} = 760 \text{ мм рт. ст.}$ Выразим это давление в паскалях. Для этого воспользуемся формулой давления жидкости (5.2):

$$p = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 0,76 \text{ м} = 101\,325 \text{ Н/м}^2 \approx 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Используют и другие единицы измерения:

– техническая атмосфера (ат): $1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2$, где 1 кгс — это сила, равная 9,8 Н. Поэтому: $1 \text{ кгс/см}^2 = 9,8 \text{ Н/см}^2 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2 = 0,98 \cdot 10^5 \text{ Па}$;

– физическая атмосфера (атм): $1 \text{ атм} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$;

– бар: $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$.

Соотношение между паскалем и миллиметром ртутного столба:
 $1 \text{ мм рт. ст.} \approx 133 \text{ Па}$.

Барометр и манометр — приборы для измерения давления.

При изменении атмосферного давления меняется высота столба ртути в трубке. При увеличении давления столб ртути удлиняется, при уменьшении давления столб ртути уменьшает высоту.

Слова и словосочетания

атмосфера
граница
воздух
барометр

воздушная оболочка
стеклянная трубка
атмосферное давление
манометр

Упражнение 5.4

1. Что такое атмосфера?
2. Почему воздух оказывает давление на все тела, которые находятся в атмосфере?
3. Кто впервые на опыте определил атмосферное давление?
4. Назвать значение нормального атмосферного давления.
5. Как называются приборы для измерения давления?
6. Какие вы знаете единицы давления?
7. Какое соотношение между паскалем и миллиметром ртутного столба?

5.5. Давление внутри жидкости. Закон Архимеда

Внутри жидкости существует гидростатическое давление. В соответствии с законом Паскаля нижние слои жидкости (или газа) передают давление, которое производят на них верхние слои, во всех направлениях. В жидкость погружено тело в виде прямоугольного параллелепипеда высотой h и площадью основания S (рис. 5.9). Со всех сторон на куб жидкость оказывает давление. Нижняя поверхность тела находится на большей глубине, чем верхняя: $h_2 > h_1$. Поэтому давление жидкости на нижнюю поверхность тела всегда больше, чем на его верхнюю поверхность.

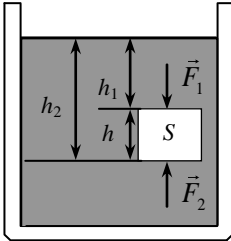


Рис. 5.9

Давление на верхнее основание тела равно $p_1 = \rho gh_1$, а на нижнее $p_2 = \rho gh_2$.

Разность этих давлений создаёт выталкивающее действие жидкости, направленное вертикально вверх. Силы давления на верхнее и нижнее основания равны:

$$F_1 = \rho gh_1 S; \quad F_2 = \rho gh_2 S.$$

Сила давления жидкости на нижнее основание тела больше, чем на верхнее. Поэтому результирующая сила \vec{F} направлена вертикально вверх и называется *выталкивающей силой*

$F_{\text{выт}} = F_2 - F_1 = \rho g S (h_2 - h_1) = \rho g S h = \rho g V_{\text{т}}$,
где $V_{\text{т}} = S \cdot h$ — объём тела, которое находится в жидкости.

Из сказанного можно сделать вывод:

На тело, погружённое в жидкость (или газ), действует выталкивающая сила. Она направлена вертикально вверх и равна весу жидкости (или газа) в объёме тела

$$F_{\text{выт}} = \rho g V_{\text{т}},$$

где ρ — плотность жидкости; $V_{\text{т}}$ — объём тела.

Эта закономерность была открыта ещё в Древней Греции учёным Архимедом (287—212 гг. до н. э.) и получила название закона Архимеда.

Закон Архимеда легко проверить на опыте. Для этого подвесим к динамометру ведёрко и цилиндр (рис. 5.10, а) и отметим показание динамометра (или длину, на которую растянется пружина).

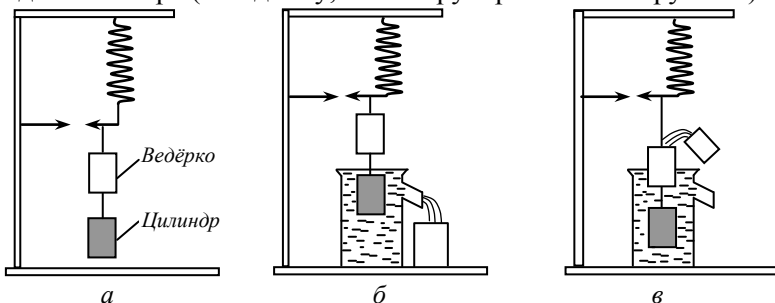


Рис. 5.10

Опустим цилиндр в сосуд с водой (рис. 5.10, б). Цилиндр вытеснит часть воды, объём этой воды будет равен объёму цилиндра. При этом длина растянутой пружины уменьшится, так как на цилиндр действует выталкивающая сила. Выльем вытесненную воду в ведёрко (рис. 5.10, в). Пружина динамометра растянется до первоначальной длины. Очевидно, что величина выталкивающей силы равна весу жидкости, вытесненной телом.

Слова и словосочетания

погрузить
вытеснить
внутри
выталкивать
вытеснять
погружаться
плавать
удерживать
приравнять

весовое давление
выталкивающая сила
выталкивающее действие
глубина
полый — пустой
погружение
вытесненный
подъёмная сила
воздушный шар

Обратите внимание!



1. Закон Архимеда справедлив для тел, нижняя часть которых окружена жидкостью. Так, например, закон Архимеда нельзя применить к кубику, который лежит на дне резервуара, герметично касаясь дна.

2. Тело, погружённое в жидкость, теряет в своём весе столько, сколько весит вытесненная им жидкость.

3. На тело, которое находится в газе, например в воздухе, тоже действует подъёмная сила. Для нахождения подъёмной силы нужно заменить плотность жидкости на плотность газа. Например, шарик с гелием летит вверх из-за того, что его плотность, плотность самого газа, меньше чем плотность воздуха.

4. На основании закона Архимеда можно определить удельный вес однородного тела неправильной формы, объём которого трудно найти при помощи определения размеров тела.

Упражнение 5.5

1. Какое давление существует внутри жидкости?
2. Какая сила действует на тело, погружённое в жидкость?
3. Сформулировать закон Архимеда.
4. Тело массой 10,8 кг удерживают в воде. Плотность вещества тела $2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Какую силу надо приложить, чтобы это тело удержать в воде?
5. Кусок стекла массой 0,14 кг весит в воде 0,82 Н. Найти плотность стекла.
6. Шарик подвесили на пружине и опустили в воду. При этом растяжение пружины уменьшилось в два раза. Определить плотность материала шарика.
7. К пружине динамометра подвешивают тело, динамометр показывает силу 14 Н. Когда подвешенное к пружине тело опускают в жидкость, динамометр показывает силу 9,45 Н. Жидкостью является раствор холодной кислоты с плотностью 1185 кг/м^3 . Определить объём тела.
8. Аэростат наполняют водородом ($\rho_1 = 0,09 \text{ кг/м}^3$) или гелием ($\rho_2 = 0,09 \text{ кг/м}^3$). На сколько процентов подъёмная сила наполненного водородом аэростата больше, чем после заполнения гелием? Плотность воздуха $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$.

5.6. Плавание тел

На тело, погружённое в жидкость (или газ), действует две силы: сила тяжести \vec{F}_T и выталкивающая сила $\vec{F}_{\text{выт}}$. В каком состоянии будет находиться тело?

Рассмотрим различные случаи.

1. Пусть выталкивающая сила $\vec{F}_{\text{выт}}$ и сила тяжести \vec{F}_T равны по величине (рис. 5.11, а). Поскольку их направления противоположны, то результирующая сила равна нулю. Тело находится в равновесии. Оно плавает внутри жидкости.

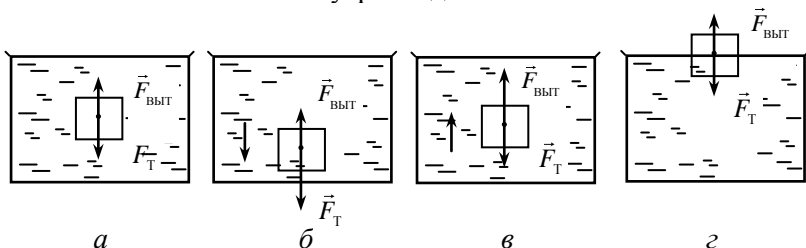


Рис. 5.11

Посмотрим, какое при этом существует соотношение между плотностями вещества тела и жидкости. Запишем формулы для вычисления $\vec{F}_{\text{выт}}$ и \vec{F}_T :

$$\vec{F}_{\text{выт}} = \rho_{\text{ж}} V_{\text{т}} g; \quad \vec{F}_T = mg = \rho_{\text{т}} V_{\text{т}} g,$$

где $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости; $\rho_{\text{т}}$ — плотность вещества тела.

Поскольку $\vec{F}_{\text{выт}} = \vec{F}_T$, то $\rho_{\text{ж}} V_{\text{т}} g = \rho_{\text{т}} V_{\text{т}} g$, или $\rho_{\text{ж}} = \rho_{\text{т}}$.

Если плотность твёрдого тела равна плотности жидкости, то тело плавает внутри жидкости.

2. Если $\vec{F}_T > \vec{F}_{\text{выт}}$, то $\rho_{\text{т}} V_{\text{т}} g > \rho_{\text{ж}} V_{\text{жг}}$, но объём вытесненной жидкости равен объёму тела ($V_{\text{ж}} = V_{\text{т}}$), тогда $\rho_{\text{т}} > \rho_{\text{ж}}$ (рис. 5.11, б).

Если плотность тела больше, чем плотность жидкости, то тело тонет.

3. Пусть сила тяжести меньше по величине выталкивающей силы $\vec{F}_T < \vec{F}_{\text{выт}}$. В этом случае плотность вещества тела меньше плотности жидкости. Результирующая сила $\vec{F}_{\text{выт}} - \vec{F}_T$ направлена вертикально вверх и тело поднимается равноускоренно к поверхности жидкости (рис. 5.11, в).

Если плотность тела меньше, чем плотность жидкости, то тело всплывает.

4. Некоторая часть объёма тела выходит из жидкости (рис. 5.11, г). При этом находящийся в жидкости объём тела уменьшается, следовательно, выталкивающая сила тоже уменьшается. Когда вытал-

кивающая сила становится равной по величине силе тяжести тела, движение вверх прекращается. Тело находится в равновесии, оно плавает на поверхности жидкости.

Если на поверхности жидкости плавает сплошное тело (без пустот) объёмом V , то только часть тела объёмом V_1 погружена в жидкость. При этом

$$\vec{F}_{\text{выт}} = \vec{F}_T, \quad \vec{F}_{\text{выт}} = \rho_{\text{ж}} V_1 g, \quad \vec{F}_T = \rho_{\text{т}} V g,$$

где $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости; $\rho_{\text{т}}$ — плотность вещества тела.

Приравниваем значения $\vec{F}_{\text{выт}}$ и \vec{F}_T :

$$\rho_{\text{ж}} V_1 g = \rho_{\text{т}} V g, \quad \text{или} \quad \frac{V}{V_1} = \frac{\rho_{\text{т}}}{\rho_{\text{ж}}}.$$

Таким образом, отношение объёма погружённой части тела к его полному объёму равно отношению плотности вещества тела к плотности жидкости.

Эта зависимость используется для изготовления *ареометров* — приборов для определения плотности жидкости.

Чем меньше плотность жидкости, тем глубже погружается ареометр и наоборот.

Деление, до которого погружается в жидкость ареометр, показывает плотность данной жидкости.

Закон Архимеда широко используется в технике, например, при строительстве кораблей. Форму корабля выбирают такой, чтобы вес воды, вытесняемой только нижней частью корабля, был равен весу корабля с грузом.

Наибольшая глубина, на которую может погружаться данный корабль, отмечается на его корпусе красной линией, так называемой ватерлинией.

Для плавания в воздушной среде используются шары, наполненные газом с малой плотностью — водородом ($\rho = 0,09 \text{ кг/м}^3$) или гелием ($\rho = 0,18 \text{ кг/м}^3$).

Если сравнить плотность водорода или гелия с плотностью воздуха ($\rho = 1,3 \text{ кг/м}^3$), то можно сделать вывод, что шар, наполненный водородом или гелием, может не только сам подниматься в воздухе, но и поднять груз. Такие шары используют для изучения верхних слоёв атмосферы. Они поднимаются на высоту 40—45 км.

На аэростат или воздушный шар действует подъёмная сила, которая равна разнице веса воздуха в объёме шара и веса газа, который заполняет шар.

Слова и словосочетания

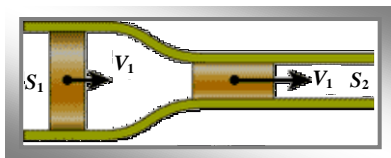
тонуть
всплывать
льдина
аэростат

ареометр
ватерлиния
погрузить
воздушная среда

Упражнение 5.6

1. Какие силы действуют на тело, погружённое в жидкость или газ?
2. При каком условии тело будет плавать внутри жидкости?
3. При каком условии тело будет тонуть?
4. При каком условии тело поднимается равноускоренно к поверхности жидкости?
5. Какой прибор используют для определения плотности жидкости?
6. Где используется закон Архимеда?
7. Что применяют для изучения верхних слоёв атмосферы?
8. Шарик движется с постоянной скоростью вверх в жидкости. Плотность жидкости в 4 раза больше плотности вещества шарика. Определить силу сопротивления жидкости при движении в ней шарика. Масса шарика 10 г.
9. Полый цинковый шар, внешний объём которого 200 см^3 , плавает так, что половина его находится в воде. Найти объём пространства внутри шара. Массой воздуха в шаре пренебречь.
10. Тело объёмом 160 см^3 плавает на поверхности воды, при этом $3/4$ объёма тела оказывается погружённым в воду. Плотность воды 10^3 кг/м^3 . Определить величину выталкивающей силы.
11. Льдина площадью 1 м^2 и высотой $0,4 \text{ м}$ плавает в воде. Какую работу необходимо выполнить, чтобы льдину полностью погрузить в воду? $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{л}} = 900 \text{ кг/м}^3$.





6. АЭРОДИНАМИКА И ГИДРОДИНАМИКА

6.1. Уравнение неразрывности течения

Работа летательных аппаратов, ветродвигателей, вентиляторов, лодок, кораблей и других устройств очень тесно связана с аэро- и гидродинамическими закономерностями.

Эти закономерности дают возможность объяснить работу, определить действующие силы и найти самые выгодные формы самолётов, вертолёт, ракет, кораблей.

При этом стремятся к тому, чтобы при наименьшей затрате мощности двигателя они могли перемещать наибольший груз как можно быстрее, экономичнее и дальше.

Аэродинамика и гидродинамика — это науки, которые изучают законы движения газа или жидкости и силовое взаимодействие между телом и обтекающим газом или жидкостью.

Течение газа или жидкости выражается двумя уравнениями: уравнением неразрывности течения и *уравнением Бернулли*.

Будем наблюдать течение воды в реке. На равнине вода разливается широко, течёт спокойно. Когда река входит в узкое русло, скорость течения увеличивается. Почему? Расход воды у большого и малого поперечного сечения реки одинаковый. Поэтому при течении через малое поперечное сечение движение воды должно ускоряться. Подобным образом ведёт себя поток жидкости или газа при движении по трубам или при обтекании различных тел.

В основе уравнения неразрывности течения лежит закон Ломоносова о сохранении вещества.

Выведем это уравнение. Для этого рассмотрим, например, движение воздуха в трубе неодинакового сечения (рис. 6.1).

Объём воздуха V_1 , который входит в трубу через поперечное сечение 1—1, равен объёму V_2 воздуха, выходящего через поперечное сечение 2—2.

Массовый расход воздуха Q_1 $\left(Q = \frac{m}{t} \right)$, который вошёл за t с через сечение S_1 , найдём так:

$$Q_1 = \frac{m_1}{t} = \frac{\rho V_1}{t} = \frac{\rho S_1 X_1}{t} = \rho S_1 v_1,$$

где v_1 — скорость течения воздуха; ρ — плотность воздуха; S_1 — площадь сечения трубы ($I-I$).

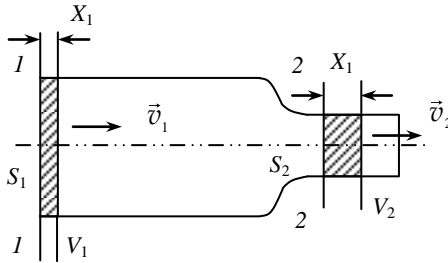


Рис. 6.1

За это же время из трубы выйдет такой же объём воздуха:

$$Q_2 = \frac{m_2}{t} = \rho S_2 v_2.$$

Приравняем правые части уравнений и получим уравнение неразрывности течения:

$$\rho S_1 v_1 = \rho S_2 v_2.$$

Сократим на ρ :

$$S_1 v_1 = S_2 v_2, \quad \text{или} \quad \frac{v_2}{v_1} = \frac{S_1}{S_2},$$

т. е. скорость течения обратно пропорциональна площади поперечного сечения потока.

Слова и словосочетания

аэродинамика	гидродинамика	сечение
летательный аппарат	течение	входить
ветродвигатель	скорость течения	выходить
вентилятор	река	труба
закономерность	неразрывность	ускоряться
обтекать	поперечное сечение	расход
поток воздуха	узкий	сужаться
вытекать	вытекающий газ	втекающий газ

Упражнение 6.1

1. Что изучает аэродинамика и гидродинамика?
2. Какие уравнения описывают течение жидкости и газа?
3. Написать уравнение неразрывности течения.
4. Как зависит скорость течения потока жидкости или газа от площади поперечного сечения потока?

6.2. Уравнение Бернулли

Движение жидкостей или газов представляет собой сложное явление. Для его описания используются различные упрощающие предположения (модели). В простейшей модели жидкость (или газ) предполагаются несжимаемыми и идеальными (т. е. без внутреннего трения между движущимися слоями). При движении идеальной жидкости не происходит превращения механической энергии во внутреннюю, поэтому выполняется закон сохранения механической энергии. Следствием этого закона для стационарного потока идеальной и несжимаемой жидкости является уравнение Бернулли.

Стационарным принято называть такой поток жидкости, в котором не образуются вихри.

В стационарном потоке частицы жидкости перемещаются по неизменным во времени траекториям, которые называются линиями тока. Опыт показывает, что стационарные потоки возникают только при достаточно малых скоростях движения жидкости.

При движении по трубе неодинакового сечения скорость потока в узкой части трубы больше, чем в широкой.

В сужающейся части поток имеет ускорение, возникающее под действием силы. Эта сила создаётся разностью давлений в широкой и узкой части трубы.

Поток жидкости или газа создаёт давление на стенки, вдоль которых этот поток движется. Это *статическое давление*. На поверхность тела, которая обращена навстречу потоку, создается *динамическое давление*.

Сумма статического и динамического давлений называется *полным давлением*.

Для расчёта полного давления потока пользуются уравнением Бернулли, которое он вывел в 1738 году.¹

¹ Даниил Бернулли (1700—1782) — выдающийся физик и математик, совместно с Л. Эйлером является создателем теоретической гидродинамики. Несколько лет работал в России, в Петербургской Академии наук.

Рассмотрим стационарное движение идеальной несжимаемой жидкости по трубе переменного сечения (рис. 6.2). Различные части трубы могут находиться на разных высотах.

За промежуток времени Δt жидкость в трубе сечением S_1 переместится на $l_1 = v_1 \Delta t$, а в трубе сечением S_2 — на $l_2 = v_2 \Delta t$, где v_1 и v_2 — скорости частиц жидкости в трубах. Условие несжимаемости записывается в виде: $\Delta V = l_1 S_1 = l_2 S_2$, или $v_1 S_1 = v_2 S_2$. Здесь ΔV — объём жидкости, протекшей через сечения S_1 и S_2 .

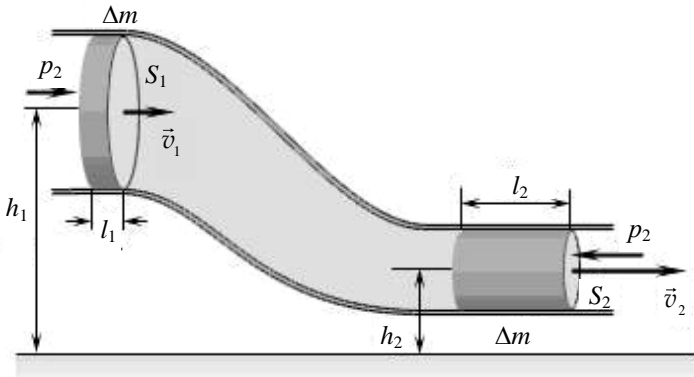


Рис. 6.2

Таким образом, при переходе жидкости с участка трубы с большим сечением на участок с меньшим сечением скорость течения возрастает, т. е. жидкость движется с ускорением. Следовательно, на жидкость действует сила. В горизонтальной трубе эта сила может возникнуть только из-за разности давлений в широком и узком участках трубы. Давление в широком участке трубы должно быть больше, чем в узком участке. Если участки трубы расположены на разной высоте, то ускорение жидкости вызывается совместным действием силы тяжести и силы давления. Сила давления — это упругая сила сжатия жидкости. Несжимаемость жидкости означает лишь то, что появление упругих сил происходит при пренебрежимо малом изменении объёма любой части жидкости.

Так как жидкость предполагается идеальной, она течёт по трубе без трения. Поэтому к её течению можно применить закон сохранения механической энергии.

При перемещении жидкости силы давления совершают работу:

$$A = p_1 S_1 l_1 - p_2 S_2 l_2 = p_1 S_1 v_1 \Delta t - p_2 S_2 v_2 \Delta t = (p_1 - p_2) \Delta V.$$

Работа A сил давления равна изменению потенциальной энергии упругой деформации жидкости, взятому с обратным знаком.

За время Δt происходит перемещение массы жидкости $\Delta m = \rho \Delta V$ (ρ — плотность жидкости) из участка трубы сечением S_1 в участок трубы сечением S_2 . Тогда закон сохранения механической энергии для этой массы жидкости имеет вид:

$$E_2 - E_1 = A = (p_1 - p_2)\Delta V,$$

где E_1 и E_2 — полные механические энергии массы Δm в поле тяготения:

$$E_1 = \frac{\Delta m v_1^2}{2} + \Delta m g h_1; \quad E_2 = \frac{\Delta m v_2^2}{2} + \Delta m g h_2.$$

Так как

$$\Delta m = S_1 \Delta V \rho \Delta t = S_2 \Delta V \rho \Delta t,$$

то кинетическая энергия втекающей жидкости:

$$\frac{\Delta m v_1^2}{2} = \frac{\rho S_1 v_1 \Delta t v_1^2}{2},$$

кинетическая энергия вытекающей жидкости:

$$\frac{\Delta m v_2^2}{2} = \frac{S_2 v_2 \rho \Delta t v_2^2}{2}.$$

Отсюда следует:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2, \quad (6.1)$$

где p_1 — статическое давление в сечении S_1 ; p_2 — статическое давление в сечении S_2 ; $\frac{\rho v_1^2}{2}$ и $\frac{\rho v_2^2}{2}$ — скоростные напоры или динамическое давление в сечениях S_1 и S_2 .

Выражение (6.1) называют *уравнением Бернулли*.

Из уравнения Бернулли следует, что сумма

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho g h + p = \text{const}$$

остаётся неизменной вдоль всей трубы. В частности, для горизонтально расположенной трубы ($h_1 = h_2$) уравнение Бернулли принимает вид:

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const}.$$

Величина p — статическое давление в жидкости. Оно может быть измерено с помощью манометра, перемещающегося вместе с жидкостью. Уравнение Бернулли даёт зависимость изменения давления p внутри жидкости с изменением высоты и скорости жидкости.

Это фундаментальное уравнение используется во всех гидро- и аэродинамических исследованиях.

Обратите внимание!



1. Линии тока жидкости (или газа) — это линии, вдоль которых происходит движение жидкости (или газа).

2. В местах потока, где линии тока сближены, давление понижено, а в тех местах, где они расходятся, давление повышено.

3. Статическое давление можно измерить манометром, который движется вместе с жидкостью.

4. Неподвижный манометр, мембрана которого поставлена перпендикулярно к потоку, измеряет полное давление.

5. С помощью уравнения Бернулли нельзя дать объяснение явлений, в которых проявляются силы трения. В этих случаях можно руководствоваться только качественными соображениями — чем больше скорость, тем меньше давление в потоке газа.

Слова и словосочетания

упрощение

модель

напор

динамическое давление

статическое давление

скоростной напор

Упражнение 6.2

1. Что такое модель жидкости или газа?
2. Какой поток жидкости называют стационарным?
3. Какое давление называется статическим?
4. Какое давление называется динамическим?
5. Как найти полное давление потока?
6. Кто является создателем теоретической гидродинамики?
7. Запишите уравнение Бернулли.
8. От чего зависит давление внутри жидкости?

6.3. Подъёмная сила крыла и полёт самолёта

В отличие от жидкостей, газы могут сильно изменять свой объём. Расчёты показывают, что сжимаемостью газов можно пренебречь, если наибольшие скорости в потоке малы по сравнению со скоростью

звука в этом газе. Таким образом, уравнение Бернулли можно применять к достаточно широкому классу задач аэродинамики.

Одной из таких задач является изучение сил, действующих на крыло самолёта. Рассмотрим обтекание крыла самолёта потоком воздуха. Опыт показывает, что, когда крыло помещено в поток воздуха, вблизи острой задней кромки крыла возникают вихри (рис. 6.3). Вихри эти растут, отрываются от крыла и уносятся потоком. Если вихри вращаются против часовой стрелки, то остальная масса воздуха вблизи крыла вращается по часовой стрелке и образует циркуляцию около крыла (рис. 6.4).

Накладываясь на общий поток, циркуляция обуславливает распределение линий тока, изображённое на рис. 6.5. Вихрь унесён потоком, а линии тока плавно обтекают профиль; они сгущены над крылом и разрежены под крылом.

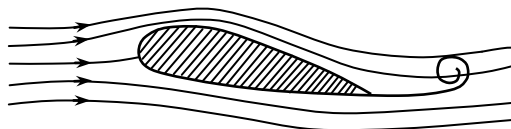


Рис. 6.3

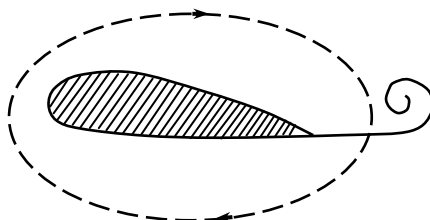


Рис. 6.4

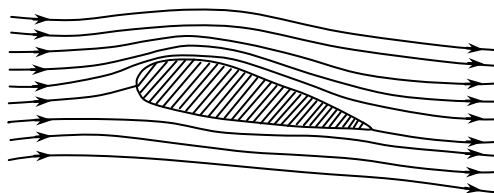


Рис. 6.5

Циркуляция ускоряет движение воздуха над крылом и замедляет его под крылом. Вследствие этого над крылом давление понижается, а под крылом повышается.

Равнодействующая \vec{F} всех сил, действующих со стороны потока на крыло (включая силы трения), направлена вверх и немного отклонена назад (рис. 6.6). Её составляющая, перпендикулярная к потоку, представляет собой *подъёмную силу* \vec{F}_y , а составляющая в направлении потока — *силу лобового сопротивления* \vec{F}_x . Чем больше скорость набегающего потока, тем больше и подъёмная сила, и сила лобового сопротивления. Эти силы зависят, кроме того, и от формы профиля крыла, и от угла, под которым поток набегаёт на крыло (угол атаки α), а также от плотности набегающего потока: чем больше плотность, тем больше и эти силы.

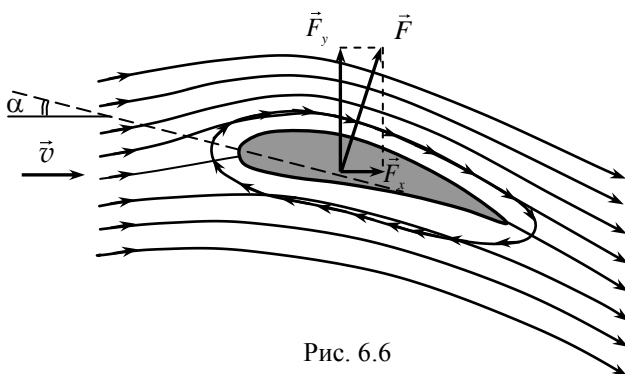


Рис. 6.6

Угол атаки α — это угол наклона крыла по отношению к набегающему потоку воздуха.

Профиль крыла выбирают так, чтобы он давал возможно большую подъёмную силу при возможно меньшем лобовом сопротивлении.

Подъёмная сила позволяет скомпенсировать силу тяжести, действующую на самолёт. Подъёмная сила обеспечивает возможность полёта тяжёлых летательных аппаратов в воздухе.

Теория подъёмной силы крыла самолёта была создана Н. Е. Жуковским (1847—1921). Он показал, что существенную роль при обтекании крыла играют силы вязкого трения в поверхностном слое. В результате их действия возникает круговое движение (циркуляция) воздуха вокруг крыла (рис. 6.6, стрелка 1). В верхней части крыла скорость циркулирующего воздуха складывается со скоростью набегающего потока, в нижней части эти скорости на-

правлены в противоположные стороны. Это и приводит к возникновению разности давлений и появлению подъёмной силы.

Теперь мы можем объяснить, как летает самолёт. Воздушный винт самолёта, вращаемый двигателем, или реакция струи реактивного двигателя, сообщает самолёту такую скорость, что подъёмная сила крыла достигает веса самолёта и даже превосходит его. Тогда самолёт взлетает. При равномерном прямолинейном полёте сумма всех сил, действующих на самолёт, согласно первому закону Ньютона равна нулю. На рис. 6.7 изображены силы, действующие на самолет при горизонтальном полёте с постоянной скоростью. Сила тяги двигателя $\vec{F}_{\text{тяги}}$ равна по модулю и противоположна по направлению силе лобового сопротивления воздуха \vec{F}_x для всего самолёта, а сила тяжести \vec{F}_T равна по модулю и противоположна по направлению подъёмной силе \vec{F}_y (рис. 6.7).

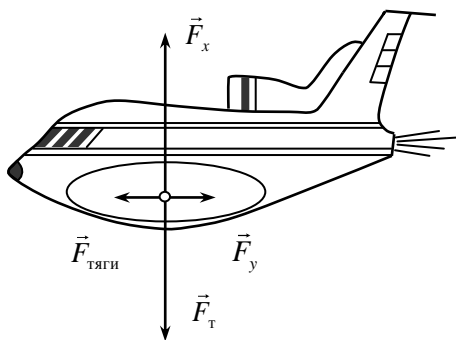


Рис. 6.7

Самолёты, рассчитанные на полёт с различной скоростью, имеют различные размеры крыльев. Медленно летящие транспортные самолёты должны иметь большую площадь крыльев, так как при малой скорости подъёмная сила, приходящаяся на единицу площади крыла, невелика.

Скоростные же самолёты получают достаточную подъёмную силу и от крыльев малой площади. Так как подъёмная сила крыла уменьшается при уменьшении плотности воздуха, то для полёта на большой высоте самолёт должен двигаться с большей скоростью, чем вблизи земли.

Назначение самолётного винта — это придание самолёту большой скорости, при которой крыло создает подъёмную силу, урав-

новешивающую вес самолёта. С этой целью винт самолёта укрепляют на горизонтальной оси. Существует тип летательных аппаратов тяжелее воздуха, для которого крылья не нужны. Это — вертолёт (рис. 6.8).

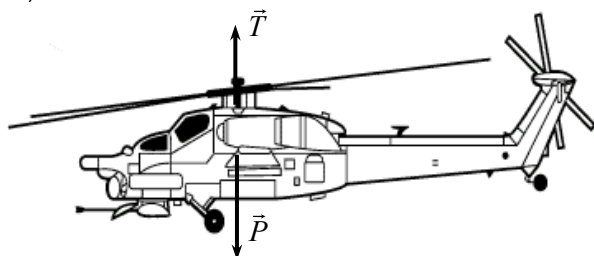


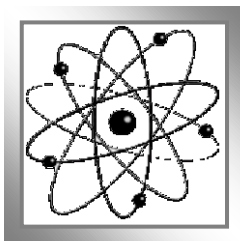
Рис. 6.8

В вертолётках ось воздушного винта расположена вертикально и винт создает тягу, направленную вверх, которая и уравнивает вес вертолётки, заменяя подъёмную силу крыла. Винт вертолётки создает вертикальную тягу независимо от того, движется вертолёт или нет. Поэтому при работе воздушных винтов вертолёт может неподвижно висеть в воздухе или подниматься по вертикали. Для горизонтального перемещения вертолётки необходимо создать тягу, направленную горизонтально. Для этого не нужно устанавливать специальный винт с горизонтальной осью, а достаточно только несколько изменить наклон лопастей вертикального винта, что выполняется при помощи специального механизма во втулке винта.

Упражнение 6.3

1. Какие силы действуют на крыло самолёта во время полёта?
2. Что такое угол атаки?
3. Что обеспечивает возможность полёта тяжёлых летательных аппаратов в воздухе?
4. Что такое подъёмная сила?
5. Кем была создана теория подъёмной силы крыла самолёта?
6. Какой тип летательных аппаратов летает без крыльев?
7. Какое назначение самолётного винта?





7. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

7.1. Основные положения молекулярно-кинетической теории

Молекулярная физика изучает закономерности тепловых явлений, физические свойства тел и веществ на основе их молекулярного строения, взаимодействия и движения большой совокупности частиц. Начиная с XVIII века, постепенно стала складываться система научных представлений о строении вещества.

Древнегреческие философы предположили, что всё в мире состоит из атомов. Великий русский учёный М. В. Ломоносов (1711—1765) развил теорию строения веществ из мельчайших частиц.

В середине XIX века на основании большого количества экспериментальных данных была создана молекулярно-кинетическая теория строения вещества.

Молекулярно-кинетическая теория (МКТ) — это научная теория, которая объясняет тепловые явления, физические свойства тел и веществ в разных агрегатных состояниях на основе их молекулярного строения, взаимодействия и движения частиц.

Основные положения молекулярно-кинетической теории:

- 1) все тела состоят из мельчайших частиц — атомов, молекул и ионов. Любое вещество обладает дискретной структурой;
 - 2) атомы и молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении. Движение частиц называется тепловым;
 - 3) атомы, молекулы и ионы взаимодействуют друг с другом.
- Рассмотрим эти положения подробно.

Молекулярное строение вещества. Моль вещества.

Число Авогадро. Количество вещества

Современная физика большим числом экспериментальных фактов подтвердила, что все тела и вещества состоят из частиц — атомов, молекул и ионов. Эти частицы определяют основные физические свойства тел.

Атом — это наименьшая частица данного химического элемента, являющаяся носителем его свойств. Каждому химическому элементу соответствует свой атом.

Молекула — это устойчивая наименьшая частица данного вещества, обладающая его основными химическими свойствами. Молекула состоит из атомов одинаковых или различных химических элементов. Молекулы имеют сложное строение и форму.

Ион — электрически заряженная частица, которая образуется при потере или приобретении атомами и молекулами одного или нескольких электронов.

Реальное существование частиц подтверждается экспериментальными фактами: растворение веществ (соль, сахар растворяются в воде), испарение жидкостей и твёрдых тел, распространение запаха вещества.

Атомное строение имеют инертные газы (гелий, аргон и др.), жидкости (ртуть) и твёрдые тела (медь, алмаз). Ряд кристаллических веществ, например хлористый натрий, состоит из разноимённо заряженных ионов. Однако большинство веществ образовано из молекул (углекислый газ, вода).

Молекулярно-кинетическая теория условно считает, что молекулы имеют форму шариков (рис. 7.1).

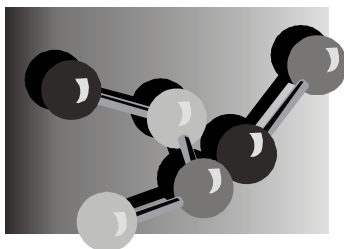


Рис. 7.1

Современная экспериментальная техника позволяет наблюдать молекулярную структуру вещества, а также определять размеры атомов и молекул. Эти размеры очень маленькие: для атомов они составляют величину порядка 10^{-10} м, для молекул их диапазон значительно шире — от 10^{-10} м для простейших молекул до 10^{-5} м для молекул сложных органических веществ.

При таких размерах масса атомов и молекул также очень мала. Например, масса молекулы водорода составляет $3,3 \cdot 10^{-27}$ кг.

Чем больше молекул (или атомов) в макроскопическом теле, тем больше вещества содержится в этом теле.

Для сравнения свойств разных веществ и проведения практических расчётов в молекулярной физике используют следующие величины.

Моль — это количество однородного вещества, которое содержит столько же молекул, сколько содержится атомов в 0,012 кг углерода.

Таким образом, в одном моле любого вещества содержится одно и то же число молекул или атомов, которое называется числом (постоянной) Авогадро и равно:

$$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Молярная масса M — это масса одного моля вещества.

Молярная масса обозначается буквой M и равна произведению массы одной молекулы вещества m_m на число Авогадро:

$$M = m_m \cdot N_A$$

Единица молярной массы в СИ — килограмм на моль:

$$[M] = \text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

Масса молекулы рассчитывается по формуле:

$$m_m = \frac{M}{N_A},$$

где M — молярная масса; N_A — постоянная Авогадро.

Число молекул N в данном количестве вещества n :

$$N = nN_A = \frac{m}{M} N_A.$$

Количество вещества n определяется как число молей, равное отношению числа молекул N к числу Авогадро:

$$n = \frac{N}{N_A}.$$

Масса m любого количества вещества в теле

$$m = N \cdot m_m, \text{ или } m = \frac{N}{N_A} M = nM.$$

Количество вещества или число молей n равно отношению массы этого вещества к его молярной массе:

$$n = \frac{m}{M}.$$

Молярный объём V_m — это объём одного моля вещества.

Объём тела V равен:

$$V = nV_m,$$

где $n = m/M$ — число молей, которые содержатся в теле.

Тепловое движение молекул

Частицы постоянно двигаются. Движение частиц беспорядочное и хаотичное. Непрерывное хаотичное движение частиц называется *тепловым движением*. Экспериментальным доказательством непрерывного характера движения молекул является диффузия и броуновское движение.

При соприкосновении тел частицы одного из них проникают в промежутки между частицами другого тела.

Диффузия — это явление самопроизвольного проникновения молекул одного вещества в другое.

Так, например, проникновение молекул духов в воздух позволяет нам ощущать запах (рис. 7.2).



Рис. 7.2

Диффузию наблюдают в газах, жидкостях и твёрдых телах. В результате взаимной диффузии веществ происходит постепенное выравнивание их концентрации во всех областях занимаемого ими объёма. Установлено, что скорость протекания процесса диффузии зависит от рода диффундирующих веществ и температуры.

Одним из наиболее интересных явлений, подтверждающих хаотичность движения молекул, является броуновское движение.

Броуновское движение — это тепловое движение микроскопических (но состоящих из очень большого числа молекул) частиц вещества, находящихся во взвешенном состоянии в жидкости или в газе. Размер броуновской частицы $\approx 10^{-6}$ м.

Причина броуновского движения заключается в непрерывном движении молекул жидкости (газа), в которой находятся броуновские частицы. Молекулы жидкости движутся хаотически и ударя-

ются о броуновские частицы. Поэтому импульс, который они передают броуновской частице при ударе с одной стороны может быть больше, чем с другой стороны. Поэтому результирующий импульс, получаемый частицей, не равен нулю, и броуновская частица изменяет направление движения. Броуновское движение проявляется тем заметнее, чем меньше частицы и вязкость среды, и чем выше температура системы. Зависимость от температуры свидетельствует о том, что скорость хаотического движения молекул возрастает с увеличением температуры, именно поэтому его и называют тепловым движением.

Броуновское движение было первым физическим явлением, в котором существование молекул обнаружили на опыте. Броуновское движение никогда не прекращается, оно является следствием непрерывного движения молекул.

Взаимодействие молекул

Между частицами происходит взаимодействие, которое характеризуется силами притяжения и силами отталкивания.

Способность твёрдого тела сопротивляться растяжению, существование сил поверхностного натяжения жидкостей (рис. 7.3), смачивание твёрдых тел жидкостями — все эти явления доказывают существование сил взаимного притяжения между молекулами веществ.



Рис. 7.3

Одновременно с притяжением между частицами существует и отталкивание. Доказательством этого является способность твёрдых тел, жидкостей и газов сопротивляться сжатию. Если бы эти силы не действовали одновременно, то частицы, образующие тела, разлетелись бы в разные стороны или соединились.

Силы молекулярного взаимодействия имеют электромагнитную природу, потому что молекулы состоят из заряженных частиц. Эти силы являются короткодействующими и проявляются лишь на расстояниях, сравнимых с размерами молекул.

Силы притяжения и отталкивания уменьшаются с увеличением расстояния между молекулами, однако скорость их уменьшения различна. Сила отталкивания преобладает на малых расстояниях и неограниченно растёт по мере приближения расстояния между центрами масс молекул r к некоторой величине d , которую можно рассматривать как эффективный диаметр молекул.

Сила притяжения уменьшается с увеличением r намного медленнее силы отталкивания, поэтому существует некоторое значение межмолекулярного расстояния $r = r_0$, на котором силы отталкивания и притяжения компенсируют друг друга, так что результирующая сила межмолекулярного взаимодействия обращается в нуль.

Обратите внимание!



1. Основные положения молекулярно-кинетической теории утверждают, что все вещества состоят из атомов и молекул; что атомы и молекулы находятся в непрерывном тепловом движении и между ними существуют силы взаимодействия.

2. Силы притяжения и силы отталкивания между частицами действуют одновременно и зависят от расстояния — с увеличением расстояния они убывают, причём силы отталкивания убывают быстрее, чем силы притяжения.

Упражнение 7.1

1. Что изучает молекулярная физика?
2. Что такое молекулярно-кинетическая теория?
3. Сформулировать основные положения молекулярно-кинетической теории.
4. Из чего состоят все тела и вещества?
5. Что такое молекула, атом, ион?
6. Что такое моль?
7. Чему равна постоянная Авогадро?
8. Что называется тепловым движением?
9. Что свидетельствует о том, что между частицами существуют силы молекулярного взаимодействия?
10. Какие силы молекулярного взаимодействия Вы знаете?
11. Вычислить массу молекулы воды H_2O . Молярная масса воды $M = 18$ г/моль, $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$. Определить, сколько молекул содержится в 90 г воды.
12. Вычислить массу одной молекулы азота.
 $M_{N_2} = 28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$.

Слова и словосочетания

атом	строение	броуновское движение
частица	моль	взаимное
молекула	твёрдый	одновременно
ион	твёрдое тело	притяжение
факт	идея	экспериментальный
гипотеза	жидкость	отталкивание
дискретный	жидкий	взаимодействие
непрерывный	газ	агрегатное состояние
хаотический	газообразный	тепловой — тепловое
беспорядочный	диффузия	нагревание — нагревать
закономерность	проникать	охлаждение — охлаждать
научная теория	процесс	температура
расширение	термометр	давление
сжатие	сосуд	объём
линейное	стенка сосуда	параметр
объёмное	система	микроскопический
постоянная	внутри	макроскопический
идеальный	реальный	закрытый
модель	воздух	парциальное давление
водород	кислород	тепловое равновесие
гелий	равновесие	углекислый газ
смесь	изобара	молярная газовая постоянная
изохора	изотерма	изопроцесс
концентрация	плотность	обобщение
столкновение	хаотичный	количество
массовый	обладать	причина
баллон	сопротивляться	самопроизвольно

7.2. Тепловое движение молекул в газах, твёрдых телах и жидкостях

Вещества в природе могут находиться в четырёх агрегатных состояниях: 1) твёрдом — твёрдые тела; 2) жидком — жидкости; 3) газообразном — газы; 4) плазменном.

Плазма — это состояние, при котором вещество в виде ионизированного газа состоит из заряженных частиц (электронов, ионов).

В разных состояниях вещество имеет разное строение и в разных веществах частицы двигаются по-разному. Движущиеся молекулы обладают кинетической энергией и потенциальной энергией.

В газах среднее расстояние между молекулами большое (по сравнению с размерами молекул).

На рис. 7.4, *а* изображены молекулы водяного пара. Силы молекулярного взаимодействия на таком расстоянии практически не действуют. Тепловое движение молекул газа — это беспорядочное хаотическое движение. Каждая молекула газа движется прямолинейно и изменяет направление своего движения при столкновениях с другой молекулой или со стенками сосуда.

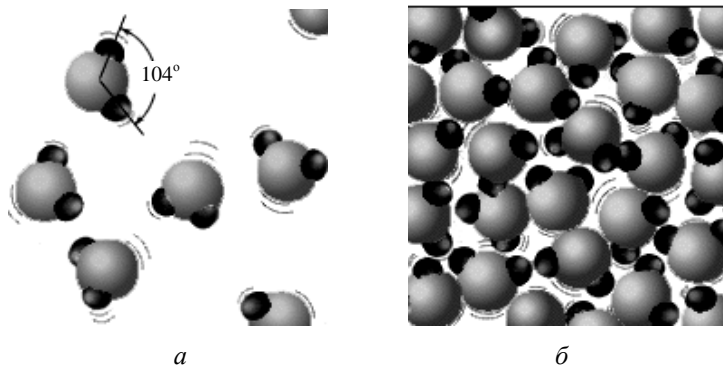


Рис. 7.4

В газах средняя кинетическая энергия теплового движения молекул значительно больше потенциальной энергии их взаимодействия. В этом случае силы взаимодействия между молекулами слабо влияют на характер их относительного движения, поскольку молекулы находятся на большом расстоянии друг от друга. При уменьшении температуры или при сжатии взаимодействие молекул начинает играть настолько существенную роль, что газ переходит в конденсированное состояние — жидкость.

В жидкости средняя энергия взаимодействия молекул примерно равна средней энергии теплового движения. Расстояние между молекулами жидкости меньше, чем в газах (рис. 7.4, б), поэтому молекулы жидкости не так свободны, как молекулы газа. Но они и не так сильно связаны между собой, как молекулы твёрдого тела. Тепловое движение в жидкостях представляет собой колебательное движение вблизи положения равновесия и периодическое перемещение молекул относительно друг друга внутри объёма жидкости. Поэтому жидкость принимает форму сосуда, в который она помещена.

В твёрдых телах частицы совершают хаотическое колебательное движение около положения равновесия. Твёрдые тела — это кристаллы, в которых атомы или ионы имеют постоянное расположение и образуют кристаллическую решётку (рис. 7.5).

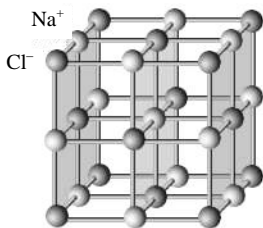


Рис. 7.5

В твёрдом теле кинетическая энергия колебательного движения атомов значительно меньше абсолютного значения потенциальной энергии их взаимодействия. Тепловое движение не может разрушить связь между атомами. Поэтому твёрдое тело, в отличие от жидкости, сохраняет свою форму и обладает большой механической прочностью.

Кристаллические структуры металлов имеют важную особенность. Положительно заряженные ионы металла, образующие кристаллическую решётку, удерживаются вблизи положения равновесия силами взаимодействия с «газом свободных электронов». Электронный газ образуется за счёт одного или нескольких электронов, отданных каждым атомом. Свободные электроны способны блуждать по всему объёму кристалла.

Кроме кристаллических тел существуют *аморфные* тела. Они, хотя и рассматриваются обычно как твёрдые, представляют собой переохлаждённые жидкости. Если рассматривать некоторый атом аморфного тела как центральный, то ближайши к нему атомы будут располагаться в определённом порядке, но по мере удаления от «центрального» атома этот порядок нарушается, и расположение атомов становится случайным.

Характерной особенностью аморфных тел является их *изотропность*, т. е. независимость всех физических свойств (механических, оптических и т. д.) от направления. Молекулы и атомы в изотропных твёрдых телах располагаются хаотично, образуя лишь небольшие локальные группы, содержащие несколько частиц (ближний

порядок). По своей структуре аморфные тела очень близки к жидкостям. Примерами аморфных тел могут служить стекло, различные затвердевшие смолы (янтарь), пластики и т. д. Если аморфное тело нагревать, то оно постепенно размягчается, и переход в жидкое состояние занимает значительный интервал температур.

Основными свойствами теплового движения являются массовость, непрерывность и хаотичность.

Слова и словосочетания

плазма	кристаллическая решётка
структура	агрегатное состояние
конденсированное состояние	колебательное движение
аморфные тела	тепловое движение
изотропность	размягчиться

Упражнение 7.2

1. В каких агрегатных состояниях могут находиться вещества?
2. Какой энергией обладают молекулы?
3. Как движутся молекулы газа?
4. Как расположены молекулы в твёрдых телах?
5. Как движутся молекулы в твёрдых телах?
6. Почему твёрдые тела обладают большой механической прочностью и сохраняют свою форму?
7. Как происходит тепловое движение в жидкостях?
8. Привести пример аморфных тел.
9. Назвать основные свойства теплового движения.
10. Что такое изотропность?
11. Как располагаются молекулы и атомы в изотропных телах?
12. К каким веществам по своей структуре близки аморфные тела?

7.3. Тепловое равновесие. Температура. Шкала температур Цельсия

Молекулярная физика и термодинамика изучают свойства и поведение макроскопических систем, т.е. систем, состоящих из огромного числа атомов и молекул. Типичные системы, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни, содержат около 10^{25} атомов.

При исследовании таких систем важнейшими являются макроскопические величины, которые непосредственно измеряются

опытным путём и характеризуют свойства всей совокупности молекул в целом. Такие величины называются *макроскопическими параметрами*. Макроскопические параметры — это давление, объём и температура.

Макросистемы — это сложные физические объекты. Поэтому начнём их изучение с наиболее простых объектов — систем, состояние которых не меняется со временем. Состояние макроскопической системы, в котором она может находиться неопределённо долгое время, называется *равновесным*. Такое состояние ещё называют *состоянием теплового равновесия*.

Равновесное состояние системы описывают при помощи макроскопических параметров. Каждый из параметров характеризует некоторое свойство системы. Так объём V — мера свойства системы занимать ту или иную область пространства; давление P — мера свойства системы сопротивляться внешнему изменению её объёма.

В состоянии теплового равновесия макроскопические параметры не меняются со временем, остаются постоянными.

Одним из наиболее важных параметров, характеризующих равновесные свойства макроскопической системы, является *температура*. Введём этот параметр, для чего рассмотрим два тела, которые могут взаимодействовать и обмениваться энергией. Этот тип взаимодействия, называемый *тепловым*, приводит к тому, что в результате столкновений молекул в области контакта двух тел происходит передача энергии от быстрых молекул к медленным. Это означает, что энергия движения атомов в одном теле уменьшается, в другом — увеличивается. Тело, теряющее энергию, называют более нагретым, а тело, к которому энергия переходит — менее нагретым. Такой переход энергии продолжается до тех пор, пока не установится состояние теплового равновесия. В состоянии теплового равновесия степени нагретости тел одинаковые. Для характеристики степени нагретости тела вводят параметр, называемый температурой. Физические процессы, связанные с нагреванием или охлаждением тел, изменением их агрегатного состояния, называются *тепловыми явлениями*.

Из опыта известно, что при изменении температуры изменяются размеры тел, электрическое сопротивление и другие свойства. Таким образом, температуру можно определить по изменению какого-либо удобного для измерения физического свойства данного вещества. Чаще всего для измерения температуры используют свойство жидкости изменять объём при нагревании и охлаждении. Прибор, с помощью которого измеряется температура, называется *термометром*.

Обыкновенный жидкостный термометр состоит из небольшого стеклянного резервуара, к которому присоединена стеклянная трубка с узким внутренним каналом. Резервуар и часть трубки наполнены ртутью или другой жидкостью. Температуру среды, в которую погружён термометр, определяют по положению верхнего уровня ртути в трубке. Деления на шкале условились наносить следующим образом. Цифру 0 ставят в том месте шкалы, где устанавливается уровень столбика жидкости, когда термометр опущен в тающий снег (рис. 7.6, *а*). Цифру 100 — в том месте, где устанавливается уровень столбика жидкости, когда термометр погружен в пары воды, кипящей при нормальном давлении $p = 10^5$ Па (рис. 7.6, *б*). Расстояние между этими метками делят на 100 равных частей, называемых *градусами* (рис. 7.6, *в*). Такая температурная шкала создана Цельсием. Градус по шкале Цельсия обозначают °С. Температурную шкалу Цельсия применяют на практике.

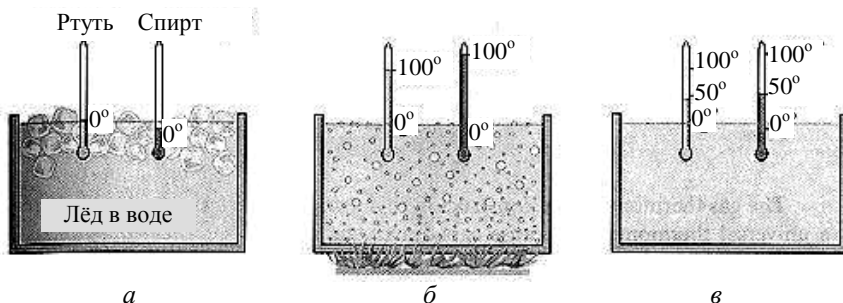


Рис. 7.6

В физике в системе СИ используется термодинамическая шкала. Единицей, применяемой для выражения температуры в этой шкале, является *кельвин* (К).

На шкале Кельвина температурный интервал между точками плавления льда и кипения воды разделён на 100 частей, а температура плавления льда равна 273 К, температура кипения воды 373 К.

Любая температура T по шкале Кельвина связана с той же температурой t по шкале Цельсия формулой:

$$T = t + 273 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Кроме макроскопических параметров, вводят *микроскопические параметры системы*, характеризующие отдельные частицы. Микроскопические параметры — это масса частиц, их скорость, кинетическая энергия частиц.

Слова и словосочетания

внешняя	градус	расширение
внутренняя	Цельсий	линейное
нагревать	Кельвин	объёмное
охлаждать	ртуть	процесс
шкала	трубка	плавление
интенсивность	термодинамический	кипение
увеличение	концентрация	лёд
холодный	уменьшение	горячий
быстро — быстрее	медленно — медленнее	средняя
массовость	непрерывность	хаотичность

Упражнение 7.3

1. Что характеризуют макроскопические параметры?
2. Какие макроскопические параметры Вы знаете?
3. Какое состояние макросистемы называется равновесным?
4. Какие физические явления называются тепловыми явлениями?
5. Когда тела имеют одинаковую степень нагретости?
6. Какой прибор применяют для измерения температуры?
7. Какую температурную шкалу применяют на практике? Назовите единицу выражения температуры.
8. Какую температурную шкалу применяют в системе СИ? Назвать единицу выражения температуры.
9. Что характеризуют микроскопические параметры?
10. Какие микроскопические параметры вы знаете?

7.4. Связь между температурой и средней кинетической энергией частиц

Установлено, что скорость теплового движения зависит от температуры. Наблюдение движения броуновских частиц в горячей и холодной жидкостях показывает, что в горячей жидкости частицы перемещаются быстрее.

Повышение температуры приводит к увеличению интенсивности теплового движения. Чем больше температура тела, тем больше средняя скорость движения молекул, тем больше средняя кинетическая энергия молекул.

Разным тепловым состояниям тела соответствуют разные значения кинетической энергии теплового движения частиц.

Положение частиц в процессе теплового движения всё время изменяется, их скорости могут быть разными как по модулю, так и по направлению. Движение каждой частицы подчиняется законам механики.

Для описания теплового движения определяют среднее значение скорости молекул $\langle v \rangle$ и среднее значение энергии молекул $\langle E_k \rangle$.

Рассмотрим N молекул. Проекция скоростей этих молекул на любое направление могут принимать отрицательные и положительные значения. Средняя арифметическая величина проекции скорости равна сумме проекций скоростей всех молекул, делённой на их число:

$$\langle v_x \rangle = \frac{v_{1x} + v_{2x} + v_{3x} + \dots + v_{Nx}}{N}.$$

Движение молекул хаотичное. Положительные значения проекций скорости встречаются так же часто, как и отрицательные. Поэтому средние значения проекций скоростей на любые направления равны нулю: $\langle v_x \rangle = 0$, $\langle v_y \rangle = 0$, $\langle v_z \rangle = 0$.

Но средний квадрат проекции скорости не равен нулю:

$$\langle v^2 \rangle = \frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_N^2}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N v_i^2}{N}.$$

Поэтому в физике тепловое движение молекул характеризуют средней квадратичной скоростью:

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N v_i^2}{N}}.$$

Если молекулы газа двигаются со скоростью v_i , то кинетическая энергия молекул равна:

$$E_{k_i} = \frac{mv_i^2}{2}.$$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения N молекул:

$$\langle E_k \rangle = \frac{E_{k_1} + E_{k_2} + E_{k_3} + \dots + E_{k_N}}{N}.$$

Величина кинетической энергии зависит от скорости движения частиц. Скорость движения частиц зависит от температуры. Значит, средняя кинетическая энергия частиц пропорциональна температуре:

$$\langle E_k \rangle \sim T.$$

Температура — мера средней кинетической энергии теплового движения частиц.

В состоянии теплового равновесия тела имеют одинаковые температуры. Значит, средняя кинетическая энергия всех молекул системы одинаковая.

Обратите внимание!



1. Для характеристики теплового состояния тела достаточно знать среднюю кинетическую энергию молекул.
2. Температура является мерой средней кинетической энергии молекул, её определяют при помощи термометров.
3. С увеличением температуры интенсивность теплового движения молекул возрастает.

Упражнение 7.4

1. От чего зависит скорость теплового движения?
2. Что происходит с увеличением температуры?
3. Какой физической величиной характеризуют тепловое движение молекул?
4. От чего зависит средняя кинетическая энергия частиц?
5. Сколько молекул содержится в 5 см^3 газа при нормальных условиях ($T_0 = 273 \text{ К}$, $p_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$)?

7.5. Тепловое расширение жидкостей и твёрдых тел

Известно, что с повышением температуры размеры тел немного увеличиваются, а при уменьшении температуры — уменьшаются до прежней величины. Говорят, что при нагревании тела расширяются, при охлаждении — сжимаются. Различают два вида теплового расширения твёрдых тел: 1) линейное расширение; 2) объёмное расширение.

При нагревании увеличивается средняя скорость теплового движения частиц, при этом увеличивается амплитуда колебаний и увеличиваются средние расстояния между частицами. Это приводит к увеличению линейных размеров тела, следовательно, увеличивается и объём тела.

Расширение твёрдого тела вдоль одного его измерения называется *линейным расширением* (рис. 7.7).

Пусть l_0 — начальная длина тела при $T_0 = 273$ К; l_T — длина тела, нагретого до температуры T кельвинов.

$\Delta T = T - T_0$ — изменение температуры;

$\Delta l = l_T - l_0$ — изменение длины тела.

При изменении температуры на ΔT длина тела увеличилась на Δl .

В интервале температур 473—573 К удлинение тела Δl пропорционально изменению его температуры:

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta T,$$

где α — коэффициент линейного расширения.

$$\alpha = \frac{l_T - l_0}{l_0 \Delta T}.$$

Коэффициент линейного расширения равен относительному удлинению тела при его нагревании на 1 К.

Коэффициент линейного расширения выражается в кельвинах в минус первой степени: $[\alpha] = \text{K}^{-1}$.

Для большинства веществ среднее значение α составляет 10^{-5} — 10^{-6} K^{-1} . Линейное расширение большинства тел незначительно.

Длину тела при нагревании можно вычислить по формуле:

$$l = l_0(1 + \alpha \Delta T).$$

Объёмное расширение — это увеличение объёма тела при нагревании. Объёмное расширение характеризуется *коэффициентом объёмного расширения* β :

$$\beta = \frac{V_T - V_0}{V_0 \Delta T},$$

где V_0 — объём тела при $T_0 = 273$ К; V_T — объём при температуре T .

Коэффициент объёмного расширения равен относительному изменению объёма тела при изменении его температуры на 1 К.

Если твёрдое тело расширяется при нагревании одинаково по всем направлениям, то между коэффициентами линейного и объёмного расширения существует зависимость: $\beta = 3\alpha$.

Объём тела после нагревания можно вычислить по формуле:

$$V = V_0(1 + \beta \Delta T).$$

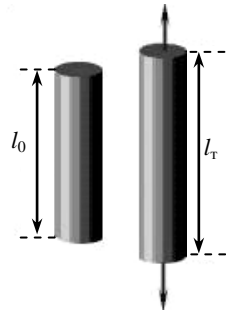


Рис. 7.7

Жидкости не имеют определённой формы, поэтому изменение их объёма при нагревании характеризуется только коэффициентом объёмного расширения.

У жидкостей коэффициент объёмного расширения больше, чем у твёрдых тел. Среднее значение коэффициента объёмного расширения жидкостей составляет $10^{-3}—10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

Интересными особенностями обладает вода. При нагревании от 0° до 4°C её объём не увеличивается, а уменьшается. При нагревании свыше 4°C объём воды увеличивается. Поэтому наибольшую плотность вода имеет при температуре 4°C .

Упражнение 7.5

1. Что такое линейное расширение? объёмное расширение?
2. Какая зависимость существует между коэффициентами линейного и объёмного расширения?
3. Почему происходит тепловое расширение?
4. При 0°C железная и медная линейки имеют одинаковую длину — 1 метр. Определите разность длин этих линеек при температуре 27°C .

При какой температуре железная линейка будет короче (меньше) медной на 2 мм? Коэффициент линейного расширения железа $\alpha_{\text{Fe}} = 0,000012 \text{ K}^{-1}$, меди — $\alpha_{\text{Cu}} = 0,000017 \text{ K}^{-1}$.

5. Медная линейка при 0°C имеет длину 1 м. При какой температуре она изменит длину на 0,5 мм, если $\alpha_{\text{Cu}} = 0,000017 \text{ K}^{-1}$?

6. Разность длин алюминиевого и медного стержней при любой температуре составляет 15 см. Какую длину при 0°C будут иметь эти стержни?





8. ОСНОВЫ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

8.1. Идеальный газ

В молекулярной физике используют физические модели для упрощения изучения физических явлений. Молекулярно-кинетическая теория газов создана немецким физиком Р. Клаузиусом в 1957 году для модели реального газа, которая называется идеальный газ.

Идеальный газ — это такая модель газа, в которой не учитываются размеры молекул, их взаимодействие, а столкновение молекул рассматривают как абсолютно упругий удар.

Основные характеристики идеального газа:

— расстояния между молекулами велики по сравнению с их размерами;

— взаимодействие между молекулами на расстоянии отсутствует;

— при столкновениях молекул действуют большие силы отталкивания;

— время столкновения много меньше времени свободного движения между столкновениями.

Свойства реальных газов при небольших давлениях (от 10^5 до 10^7 Па) и нормальных температурах хорошо совпадают со свойствами идеального газа.

Некоторые газы — азот, кислород, гелий, водород — при комнатной температуре и атмосферном давлении близки к идеальному газу. Поэтому при малых давлениях и нормальной температуре реальные газы можно описать моделью идеального газа.

При увеличении давления газа увеличивается его плотность и уменьшается среднее расстояние между молекулами. Начинают проявляться силы взаимодействия между молекулами. Поэтому при низких температурах и больших давлениях свойства реальных газов отличаются от свойств идеального газа.

При определённых условиях нельзя пренебрегать размерами молекул и их взаимодействием.

Обратите внимание!



1. Понятие идеального газа вводится в молекулярной физике для упрощения вывода многих закономерностей.
2. Все реальные газы при нормальных условиях настолько разреженные, что их свойства близки к идеальному газу.

Слова и словосочетания

модель

идеальный газ

8.2. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа

Молекулярно-кинетическая теория (МКТ) устанавливает связи между макроскопическими (давление, температура, объём) и микроскопическими (масса, скорость, кинетическая энергия молекул) параметрами идеального газа. Согласно МКТ, газ, находящийся в сосуде — это хаотически движущиеся молекулы. При движении молекулы ударяются о стенки сосуда. При каждом ударе молекула действует на стенку с некоторой силой.

Давление газа p на стенки сосуда — это результат многочисленных ударов молекул. При каждом ударе стенка получает силовой импульс, величина которого зависит от скорости молекул и, следовательно, от энергии их движения (рис. 8.1). При огромном количестве ударов создаётся постоянное давление газа на стенку.

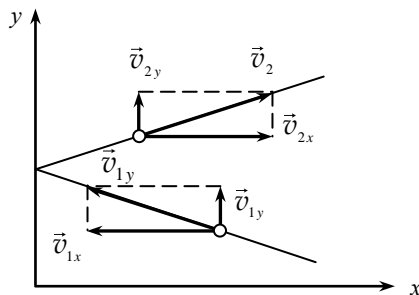


Рис. 8.1

Количество ударов зависит от концентрации молекул n . Поэтому можно ожидать, что давление газа связано с концентрацией молекул и с энергией их движения.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов выражает связь давления газа со средней кинетической энергией поступательного движения молекул.

Найдём зависимость среднего давления газа на стенки сосуда от средней квадратичной скорости движения молекул или от средней кинетической энергии теплового движения.

Пусть в закрытом сосуде объёмом V находится N молекул идеального газа, масса которых m . Газ и сосуд имеют одинаковую температуру, находятся в тепловом равновесии.

Давление газа можно найти, если известны концентрация молекул

$n = \frac{N}{v}$ и их скорость.

Предположим, что молекулы газа движутся только вдоль трёх направлений: OX , OY , OZ . Тогда в любой момент времени вдоль каждого направления будет двигаться $1/3 N$ молекул. Так как половина молекул движется вдоль данного направления в одну сторону, половина в противоположную сторону, то в одном направлении будет двигаться $1/6 N$ молекул.

Предположим, что все молекулы имеют одинаковую по модулю скорость v . Число молекул, которые за промежуток времени Δt долетят к поверхности ΔS , равно

$$\Delta N = \frac{1}{6} n v \Delta S \Delta t,$$

где $V = v \Delta S \Delta t$ — объём цилиндра, в котором находятся молекулы.

При ударе молекул поверхность ΔS получает суммарный импульс $m\bar{u}$. Суммарный импульс равен произведению числа ударов молекул и импульса при каждом ударе.

Определим импульс, который получает поверхность ΔS при каждом ударе. Предположим, что импульс каждой молекулы направлен перпендикулярно поверхности ΔS . В результате абсолютно упругого удара о поверхность молекула изменяет свою скорость на противоположное значение. Изменение импульса молекулы равно

$$\Delta(m\bar{u}) = m\bar{u} - (-m\bar{u}) = 2m\bar{u}.$$

По второму закону Ньютона

$$F = \frac{|\Delta m\bar{u}|}{\Delta t} = \frac{2mu}{\Delta t}.$$

Суммарная сила удара всех молекул равна

$$\sum F = \frac{2mi}{\Delta t} \frac{1}{6} nu \Delta S \Delta t.$$

Давление — это физическая величина, равная отношению силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности. Значит, среднее давление на поверхность ΔS равно

$$p = \frac{\sum F}{\Delta S} = \frac{2mi}{\Delta S \Delta t} \frac{1}{6} nu \Delta S \Delta t,$$

или

$$p = \frac{1}{3} nmu^2.$$

Так как кинетическая энергия $E_k = \frac{mu^2}{2}$, то давление равно:

$$p = \frac{2}{3} nE_k.$$

Эта формула получена для случая, когда все молекулы имеют одинаковую скорость. В действительности все молекулы газа имеют разные скорости движения. Поэтому необходимо рассчитывать среднюю кинетическую энергию движения молекул

$$\langle E_k \rangle = \frac{m \langle v^2 \rangle}{2}.$$

Тогда среднее давление на поверхность равно

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle. \quad (8.1)$$

Это основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа.

Давление идеального газа зависит от концентрации молекул и их средней кинетической энергии.

Упражнение 8.1

1. Для чего используют физические модели?
2. Что такое идеальный газ?
3. Назвать основные характеристики идеального газа.
4. Какие реальные газы при комнатной температуре и атмосферном давлении по своим свойствам близки к идеальному газу?

5. Что такое давление газа?
6. Что происходит при увеличении давления газа?
7. Что выражает основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов?
8. От чего зависит давление идеального газа?
9. Используя основное уравнение молекулярно-кинетической теории, показать, что количество частиц, находящихся в одинаковых объёмах при одинаковых давлениях и температуре, для разных газов постоянно.
10. В баллоне находится газ под давлением $2 \cdot 10^5$ Па. Чему равна средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул? Концентрация молекул газа $2 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$.

8.3. Экспериментальные газовые законы. Изопроцессы

Всякое изменение состояния газа называется *термодинамическим процессом*. Состояние любой системы характеризуют совокупностью физических величин — параметров состояния.

Различают микроскопические параметры (масса частиц, их скорость, энергия) и макроскопические параметры (объём газа V , давление p , температура T).

Уравнение, определяющее связь давления, объёма, температуры, называют *уравнением состояния*. Каждая система — газ, жидкость, твёрдое тело — характеризуется своим уравнением состояния. С изменением параметров p , V , T изменяется состояние системы. Зная уравнение состояния, можно определить, как будут происходить различные процессы в системе при определённых внешних условиях. Простейшими процессами в идеальном газе являются *изопроцессы*. Это процессы, при которых масса газа и один из его параметров состояния (температура, давление или объём) остаются постоянными.

Изотермический процесс — это процесс изменения состояния газа при постоянной температуре ($T = \text{const}$).

Экспериментально Р. Бойлем и Э. Мариоттом было установлено, что *при постоянной температуре произведение давления газа на объём для данной массы газа есть величина постоянная* (закон Бойля–Мариотта):

$$pV = \text{const.}$$

Графически этот закон в координатах p , V при различных значениях температуры T изображается семейством гипербол $p \sim 1/V$, которые называются *изотермами* (рис. 8.2).

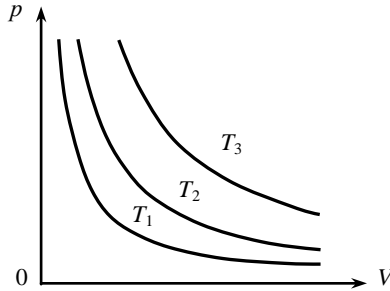


Рис. 8.2

Так как коэффициент пропорциональности в этом соотношении увеличивается с ростом температуры, изотермы, соответствующие более высоким значениям температуры, располагаются на графике выше изотерм, соответствующих меньшим значениям температуры ($T_1 < T_2 < T_3$). Для любых двух состояний газа закон Бойля—Мариотта можно записать в виде:

$$p_1V_1 = p_2V_2, \quad \text{или} \quad pV = p_0V_0.$$

Изобарный процесс — это процесс изменения состояния газа при постоянном давлении ($p = \text{const}$).

Зависимость объёма газа от его температуры при постоянном давлении была установлена Ж. Л. Гей-Люссаком, который показал, что

***объём газа данной массы при постоянном давлении
возрастает линейно с увеличением температуры
(закон Гей-Люссака):***

$$V = V_0 \cdot (1 + \beta \Delta T),$$

где V — объём газа при температуре T ; V_0 — объём газа при $T_0 = 273 \text{ К}$; β — коэффициент объёмного расширения газов.

Коэффициент объёмного расширения газов определяется по формуле:

$$\beta = \frac{V - V_0}{V_0 \Delta T}.$$

Изучая на опыте тепловое расширение газов, французский учёный Ж.Л. Гей-Люссак открыл, что коэффициент объёмного расширения при постоянном давлении у всех газов одинаковый и равен

$$\beta = \frac{1}{273} \text{ К}^{-1}.$$

Учитывая, что $T_0 = 273 \text{ К}$, а $\beta = \frac{1}{273} \text{ К}^{-1}$, объём газа при любой температуре равен

$$V = V_0 \beta T.$$

Для двух разных состояний газа при постоянном давлении справедливо равенство:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0}.$$

Графически зависимость объёма от температуры изображается прямой линией — *изобарой* (рис. 8.3).

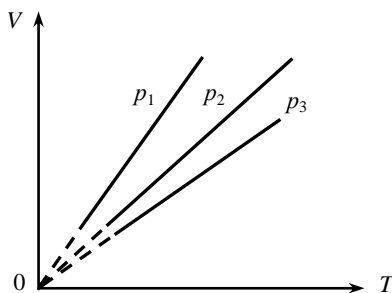


Рис. 8.3

Изобары, соответствующие более высоким значениям давления, располагаются на графике ниже изобар, соответствующих меньшим значениям давления ($p_1 < p_2 < p_3$).

При очень низких температурах (близких к $-273 \text{ }^\circ\text{C}$) закон Гей-Люссака не выполняется, поэтому сплошная линия на графике заменена пунктиром.

Изохорный процесс — это процесс изменения состояния газа при постоянном объёме ($V = \text{const}$).

Исследования зависимости давления данной массы газа от температуры при постоянном объёме были впервые проведены французским физиком Шарлем. Им было установлено, что

***давление газа данной массы при постоянном объёме
возрастает линейно с увеличением температуры***

(закон Шарля):

$$p = p_0(1 + \gamma \Delta T).$$

Коэффициент γ , который показывает, на какое значение увеличивается давление при нагревании на 1 К, называется термическим коэффициентом давления:

$$\gamma = \frac{p - p_0}{p_0 \Delta T},$$

где p — давление газа при температуре T ; p_0 — давление газа при $T_0 = 273$ К.

Значение термического коэффициента не зависит от природы газа; для всех газов $\gamma = 1/273$ К⁻¹.

Таким образом, давление газа при любой температуре и постоянном объёме равно

$$p = p_0 \gamma T, \quad \text{или} \quad \frac{p}{p_0} = \frac{T}{T_0}.$$

Графическая зависимость давления от температуры изображается прямой линией — *изохорой* (рис. 8.4).

Изохоры, соответствующие более высоким значениям объёма газа, располагаются на графике ниже изохор, соответствующих меньшим значениям объёма ($V_1 < V_2 < V_3$).

Продолжение изохоры пересекается с осью температур в точке $T = 0$ К, при которой давление газа равно нулю.

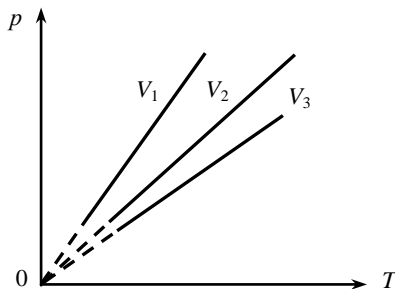


Рис. 8.4

Точка $T = 0$ К принята за начало отсчёта (нуль) термодинамической шкалы, или шкалы Кельвина.

Нуль этой шкалы называется нулём Кельвина: 0 К = -273 °С. Практически нуль Кельвина недостижим.

Упражнение 8.2

1. Какими параметрами определяют состояние данной массы газа?
2. Какие параметры называют микроскопическими?
3. Какие параметры называют макроскопическими?
4. Какие процессы называют изопроцессами?
5. Какой процесс называется изотермическим?
6. Сформулировать закон Бойля—Мариотта.
7. Какой процесс называется изобарным?
8. Сформулировать закон Гей-Люссака.
9. Какой процесс называется изохорным? Сформулировать закон Шарля.
10. До какой температуры надо нагреть газ при постоянном давлении, чтобы его объём увеличился в четыре раза по сравнению с объёмом $0\text{ }^{\circ}\text{C}$?

8.4. Уравнение состояния идеального газа

Газ может находиться в условиях, при которых изменяются все три параметра: давление p , температура T , объём V . Выведем уравнение состояния идеального газа. Используем для этого газовые законы.

Применим закон Шарля ($V = \text{const}$) и закон Гей-Люссака ($p = \text{const}$).

Совершим над газом тепловой процесс: 1) сначала нагреем газ при постоянном объёме — изохорный процесс; 2) затем нагреем газ при постоянном давлении — изобарный процесс.

Построим график в координатах p, V (рис. 8.5). Прямая $1-1'$ — график изохорного процесса, прямая $1'-2$ — график изобарного процесса.

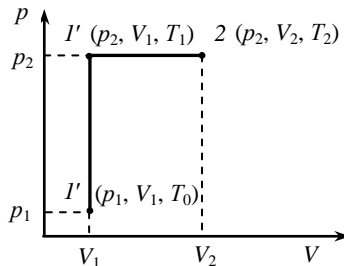


Рис. 8.5

По закону Шарля $\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_1}{T_0}$, тогда температура в конце изохорного процесса равна $T_1 = \frac{p_2 T_0}{T_1}$.

По закону Гей-Люссака $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$. Подставим в это уравнение температуру T_1 и получим:

$$\frac{p_1 V_1}{T_0} = \frac{p_2 V_2}{T_2}.$$

Значит, в состоянии теплового равновесия для данной массы газа справедливо соотношение:

$$\frac{pV}{T} = \text{const} = R,$$

где R — молярная газовая постоянная.

Вычислим молярную газовую постоянную. Для этого используем закон Авогадро: при нормальных условиях ($p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па, $T_0 = 273$ К) молярный объём любого газа $V_m = 0,0224$ м³/моль.

$$\text{Тогда: } \frac{p_0 V_m}{T_0} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,0224 \text{ м}^3/\text{моль}}{273 \text{ К}} = 8,31 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль}).$$

Значит, $R = 8,31$ Дж/(К · моль).

Тогда уравнение состояния идеального газа для одного моля запишется так:

$$pV_m = RT \quad \text{— уравнение Клапейрона,} \quad (8.2)$$

где V_m — молярный объём.

Для любой массы газа $m = nM$, где n — число молей; M — молярная масса.

Для n молей объём равен $V = nV_m$.

Умножим уравнение (8.2) на n : $pnV_m = nRT$. Тогда,

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (8.3)$$

— уравнение Менделеева—Клапейрона, где p — давление газа; V — объём газа; m — масса газа; T — термодинамическая температура.

Уравнение Менделеева—Клапейрона — это уравнение состояния идеального газа.

Обратите внимание!



1. Состояние данной массы газа определяется параметрами состояния: давлением, температурой и объёмом.
2. Уравнение, связывающее между собой все три параметра, называют уравнением состояния.
3. Газовые законы для отдельных изопроцессов являются частными случаями уравнения Менделеева—Клапейрона.

Упражнение 8.3

1. Что такое уравнение состояния газа?
2. В каких случаях применяют уравнение состояния идеального газа?
3. Чему равна молярная газовая постоянная?
4. Написать уравнение Менделеева—Клапейрона.

8.5. Уравнение состояния реального газа

При описании состояния реального газа надо учитывать притяжение частиц и их объём. Силы притяжения учитывают как действие дополнительного давления

$$\Delta p = \frac{a}{V_m^2},$$

где a — константа, которая зависит от природы газа.

Значит, в уравнении $pV_m = RT$ вместо p должно быть

$$p + \frac{a}{V_m^2}.$$

V_m — это объём одного моля газа или объём сосуда, в котором находятся частицы. У реального газа частицы имеют свой объём, поэтому фактический объём, в котором они могут двигаться, меньше V_m . Если b — суммарный объём частиц, то $(V_m - b)$ — объём пространства. Тогда, уравнение состояния для одного моля реального газа имеет вид:

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2} \right) (V_m - b) = RT \quad (8.4)$$

— уравнение Ван дер Ваальса.

Поправки a и b вычисляются экспериментально для каждого газа.

Уравнение (8.4) значительно точнее, чем уравнение состояния идеального газа (8.3) и более точно описывает свойства газов.

Обратите внимание!



1. Уравнение состояния идеального газа, законы Бойля—Мариотта, Гей-Люссака и Шарля строго справедливы только для идеального газа — упрощённой модели газа.

2. Если реальный газ находится не при очень больших давлениях и не при очень низких температурах, то свойства реального газа очень близки к свойствам идеального газа.

3. Если реальный газ находится при больших давлениях и имеет низкую температуру, то в законы идеального газа необходимо внести поправки, учитывающие свойства реального газа.

Слова и словосочетания

реальный газ

фактический объём

8.6. Температура — мера средней кинетической энергии

В подразд. 7.4 было показано, что температура является мерой теплового движения частиц. Температура — это макроскопическая характеристика газа. Найдём связь температуры газа с его микроскопическими характеристиками.

Сравнивая уравнение состояния идеального газа (8.3) и основное уравнение кинетической теории газов (8.2), записанные для одного моля (для этого количества молекул N возьмём равным числу Авогадро N_A), найдём среднюю кинетическую энергию одной молекулы:

$$pV_0 = \frac{2}{3} nV_0 \langle E_k \rangle.$$

Так как $nV_0 = N_A$, то $pV_0 = \frac{2}{3} N_A \langle E_k \rangle.$

Сравнивая это уравнение с уравнением состояния для одного моля $pV_0 = RT$, можно сделать вывод, что

$$\frac{2}{3} N_A \langle E_k \rangle = RT,$$

откуда

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT. \quad (8.5)$$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы не зависит от её природы и пропорциональна абсолютной температуре газа T . Отсюда следует, что абсолютная температура является мерой средней кинетической энергии молекул.

Величина $R/N_A = k$ называется *постоянной Больцмана* и представляет собой газовую постоянную, отнесённую к одной молекуле: $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К⁻²³.

Уравнение (8.5) одно из фундаментальных уравнений физики. Оно справедливо для вещества в любом состоянии. Из него следует, что температура идеального газа однозначно связана с кинетической энергией молекул газа. В этом физический смысл термодинамической температуры. Макроскопический параметр T газа связан с микроскопическим параметром $\langle E_k \rangle$. Например, изменение температуры на 1 К соответствует изменению энергии $\langle E_k \rangle$ на $2,07 \cdot 10^{-23}$ Дж:

$$3/2 k \cdot 1\text{К} = 3/2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \cdot 1\text{К} = 2,07 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}.$$

Температура, как и давление, является усреднённой, или статистической величиной. Поэтому нельзя говорить о температуре одной или нескольких молекул.

Обратите внимание!



1. Средняя кинетическая энергия теплового движения молекул идеального газа пропорциональна термодинамической температуре.
2. Увеличение температуры газа связано с увеличением скорости движения молекул.

Слова и словосочетания

абсолютная температура
сравнить

усреднённое значение
статистическая величина

Упражнение 8.4

1. Давление воздуха внутри закрытого сосуда при температуре 280 К равно 10^5 Па. До какой температуры надо нагреть сосуд, чтобы давление стало равным $1,3 \cdot 10^5$ Па?

2. Для наполнения баллона углекислым газом при 0 °С и давлении $40 \cdot 10^5$ Па потребовалось 7,88 кг углекислого газа. Определить объём баллона, зная, что плотность углекислого газа при нормальных условиях равна $1,97$ кг/м³.

3. Сколько молекул воздуха находится в комнате объёмом 240 м^3 при температуре 288 К и давлении 10^5 Па ?

4. Найти плотность водорода при температуре 288 К и давлении $9,8 \cdot 10^4 \text{ Па}$. Молярная масса водорода $2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

5. Газ при температуре 455 К занимает объём V_0 . До какой температуры следует охладить газ при постоянном давлении, чтобы его объём стал равным $\frac{2}{5}V_0$?

6. При $10 \text{ }^\circ\text{C}$ газ находится под давлением $5 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Какое будет давление при $65 \text{ }^\circ\text{C}$, если объём газа не изменяется?

7. Определить плотность кислорода при давлении $0,9 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и температуре 250 К .

8. Определить плотность азота при температуре $27 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Молярная масса азота $28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

8.7. Закон Дальтона

Рассмотрим газ, состоящий из молекул различных веществ, который находится в объёме V . Вследствие хаотичного теплового движения молекулы каждого компонента смеси будут распределены по объёму равномерно, т. е. так, как если бы остальные компоненты газа отсутствовали. Из-за постоянных соударений молекул друг с другом, сопровождающихся частичным обменом между ними импульсами и энергиями, в смеси устанавливается тепловое равновесие. Всё это приводит к тому, что давление каждого из компонентов смеси не будет зависеть от присутствия остальных.

Тогда результирующее давление определяется суммарным давлением всех компонентов, т.е. для смеси газов справедлив закон Дальтона:

давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений входящих в неё газов

$$p = \sum_{i=1}^n p_i,$$

где p_i — парциальное давление.

Парциальное давление — это давление, которое создавал бы каждый газ смеси, если бы только он один занимал весь объём, занимаемый смесью.

Слова и словосочетания

смесь газов
кислород
азот
воздух

парциальное давление
углекислый газ
баллон
водород

Упражнение 8.5

1. Сколько молекул воздуха находится в комнате размерами $6 \times 4 \times 3 \text{ м}^3$ при температуре $27 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 10^5 Па ? Определить массу этого воздуха.

2. Баллон объёмом $V = 20,5 \text{ м}^3$ содержит смесь водорода и гелия. Масса смеси $m = 13 \text{ г}$, температура $t = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, давление $p = 5,4 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Определить массу водорода и гелия в смеси. Молярная масса водорода $M_{\text{H}_2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, гелия — $M_{\text{He}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

3. Определить плотность смеси, состоящей из 4 г водорода и 32 г кислорода при температуре $7 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $9,3 \cdot 10^4 \text{ Па}$.

4. Выучить основные формулы молекулярной физики (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Молекулярная физика. Основные формулы

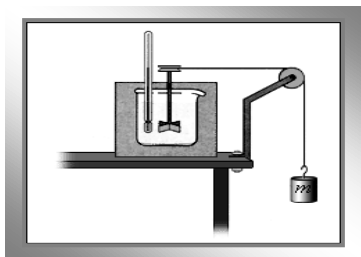
Физическая величина, закон	Формула	Единица измерения
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$	моль ⁻¹
Количество вещества	$n = \frac{N}{N_A}$	$\frac{\text{молекул}}{\text{моль}}$
N — число молекул в данном количестве вещества n	$N = nN_A = \frac{m}{M} N_A$	молекул
Молярная масса	$M = m_M \cdot N_A$, $M = \frac{m}{n}$	$\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$
Масса молекулы	$m_M = \frac{M}{N_A}$	кг
Объём тела	$V = nV_m$	м ³
Количество молей	$n = m/M$	молей
Коэффициент линейного расширения	$\alpha = \frac{l_T - l_0}{l_0 \Delta T}$	К ⁻¹
Коэффициент объёмного расширения	$\beta = \frac{V_T - V_0}{V_0 \Delta T}$	К ⁻¹
Масса вещества	$m = N \cdot m_M$	кг

	$m = \frac{N}{N_A} M = nM$	
--	----------------------------	--

Окончание табл. 8.1

Физическая величина, закон	Формула	Единица измерения
Газовые законы		
Закон Бойля—Мариотта (изотермический процесс)	$pV = p_0V_0, \quad T = \text{const}$	—
Закон Гей-Люссака (изобарный процесс)	$V = V_0(1 + \beta\Delta T), \quad p = \text{const};$ $\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0}$	м ³
Коэффициент объёмного расширения газов	$\beta = \frac{1}{273}$	К ⁻¹
Закон Шарля (изохорный процесс)	$p = p_0(1 + \gamma\Delta T), \quad V = \text{const};$ $\frac{p}{p_0} = \frac{T}{T_0}$	Па
Термический коэффициент давления	$\gamma = \frac{p - p_0}{p_0\Delta T}$	К ⁻¹
Молярная газовая постоянная	$R = 8,31$	$\frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$
Уравнение Менделеева—Клапейрона (уравнение состояния идеального газа)	$pV = \frac{m}{M} RT$	—
Уравнение состояния идеального газа для одного моля	$pV_m = RT$	—
Уравнение Ван дер Ваальса для одного моля реального газа	$\left(p + \frac{a}{V_m^2} \right) (V_m - b) = RT$	—
Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа	$p = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle$	Па
Средняя кинетическая энергия одной молекулы	$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT$	Дж

Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$
----------------------	---------------------------	------------------------------



9. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

9.1. Внутренняя энергия

Термодинамика — это раздел физики, в котором изучают тепловые явления в газах, жидкостях, твёрдых телах на основе превращения тепловой формы движения материи в другие виды энергии.

Внутренняя энергия тела U — это сумма кинетической энергии теплового движения молекул и потенциальной энергии их взаимодействия.

$$U = \sum_N E_{кN} + \sum_N E_{пN} ,$$

где N — число молекул.

Внутренней энергией обладают все тела. Внутренняя энергия является энергией неупорядоченного (теплового) движения и неупорядоченного взаимодействия большого числа молекул. Величины суммарной потенциальной энергии молекул твёрдого тела или жидкости и их суммарной кинетической энергии связаны между собой. Чем больше кинетическая энергия молекул, тем на большие расстояния от положения равновесия удаляются молекулы. При этом расстояние между молекулами увеличивается, а значит, увеличивается и абсолютное значение потенциальной энергии их взаимодействия. В данном состоянии тела значение суммарной кинетической и суммарной потенциальной энергии молекул не изменяется. Поэтому и внутренняя энергия тела в данном состоянии не изменяется.

Термодинамическая система — это тело или совокупность тел, в которых происходят процессы, связанные с изменением внутренней энергии. Пример термодинамической системы: газ, жидкость, твёрдое тело, человеческий организм.

Изолированная (замкнутая) термодинамическая система — это система, которая не имеет обмена энергией с внешней средой.

Термодинамическое равновесие — это состояние изолированной системы, при котором макроскопические параметры системы остаются постоянными.

Термодинамический процесс — это переход системы из одного термодинамического состояния в другое.

Идеальный газ — это термодинамическая система. Так как концентрация молекул газа невелика, то силы взаимодействия между молекулами практически отсутствуют. Поэтому внутренняя энергия идеального газа равна сумме кинетических энергий теплового движения молекул

$$U = E_{k_1} + E_{k_2} + \dots + E_{k_i} = \sum_{i=1}^N E_{ki} .$$

Средняя кинетическая энергия молекулы идеального газа:

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT .$$

Общая энергия для N молекул:

$$U = \frac{3}{2} kTN, \quad (9.1)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана.

Из формулы (9.1) видно, что внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры и числа молекул и не зависит от объёма и давления газа.

Таким образом, изменение внутренней энергии идеального газа в термодинамическом процессе определяется изменением его температуры и не зависит от характера этого процесса:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} kN(T_2 - T_1) .$$

Есть два способа изменения внутренней энергии газа:

- 1) при совершении работы (сжатием или расширением газа);
- 2) при теплообмене (нагреванием или охлаждением газа).

Рассмотрим возможные варианты изменения внутренней энергии тела.

1. Тело (газ) расширяется. Он совершает работу над внешними телами. При этом внутренняя энергия тела уменьшается. Если работа совершается внешними силами над телом — сжимается газ. В этом случае внутренняя энергия тела увеличивается.

Для изолированной системы работа внешних сил равна:

$$A_{\text{вн}} = U_2 - U_1,$$

где U_2 и U_1 — это конечное и начальное значения внутренней энергии.

Процесс изменения внутренней энергии системы без теплообмена называется *адиабатным*.

В этом случае мерой изменения внутренней энергии является механическая работа.

2. *Теплообмен* — это процесс контакта двух тел с разными температурами. При теплообмене кинетическая энергия хаотического движения молекул тела с большей температурой переходит в кинетическую энергию хаотического движения молекул тела с меньшей температурой.

Происходит изменение внутренней энергии тел.

Меру изменения внутренней энергии при теплообмене называют *количеством теплоты* Q .

Единица теплоты в СИ — джоуль: $[Q] = 1 \text{ Дж}$.

$$Q = \Delta U = U_2 - U_1.$$

Изменение внутренней энергии тела равно количеству теплоты, которое тело получило или потеряло при теплообмене.

Во всех процессах энергия не исчезает и не возникает из ничего. Она превращается из одного вида в другие виды или переходит от одного тела к другому.

При совершении механической работы или при получении телом некоторого количества теплоты изменяется одна и та же величина — внутренняя энергия тела.

Обратите внимание!



1. Внутренней энергией тела называют сумму кинетической энергии теплового движения молекул и потенциальной энергии их взаимодействия. Внутренней энергией обладают все тела.

2. Внутренняя энергия зависит от состояния тела и изменяется при изменении его состояния. В данном состоянии тела внутренняя энергия тела не изменяется.

3. Внутренняя энергия тела изменяется при совершении работы или в процессе теплообмена.

4. В тепловых процессах работа является мерой превращения механической энергии системы в её внутреннюю энергию.

5. Мерой изменения внутренней энергии при теплообмене является количество теплоты Q .

6. Количество теплоты выражают в единицах энергии — джоулях.

Слова и словосочетания

термодинамика
изолированный
адиабатный
теплообмен

термодинамическая система
внутренняя энергия
количество теплоты
контакт

9.2. Удельная теплоёмкость

Удельная теплоёмкость c — это физическая величина, которая показывает изменение внутренней энергии 1 кг вещества при изменении температуры на 1 К:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}.$$

Единица удельной теплоёмкости в СИ — джоуль на килограмм-Кельвин: $[c] = 1 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Если термодинамической системе передаётся некоторое количество теплоты, то изменяется её состояние, или внутренняя энергия системы. Характеристикой такого состояния являются различные удельные теплоёмкости.

Для нагревания тела на определённую температуру нужно затратить разное количество теплоты, если тело нагревают при постоянном объёме или при постоянном давлении. Поэтому удельная теплоёмкость зависит от того, как изменяются при нагревании давление и объём. Теплоёмкость c_p при $p = \text{const}$ называется удельной теплоёмкостью при постоянном давлении, а c_v при $V = \text{const}$ — джоуль на килограмм-Кельвин удельной теплоёмкостью при постоянном объёме. Если нагревание тела происходит при постоянном объёме, то вся теплота идёт на увеличение его внутренней энергии. Если нагревание тела происходит при постоянном давлении, то количество теплоты тратится и на совершение работы, поэтому $c_p > c_v$.

Зная удельную теплоёмкость вещества в данном агрегатном состоянии, количество теплоты, необходимое для нагревания тела

массой m от температуры T_1 до температуры T_2 , можно определить по формуле:

$$Q = cm(T_2 - T_1).$$

Если тело охлаждается, то $T_1 > T_2$, поэтому количество теплоты, которое выделяется при охлаждении тела:

$$Q = cm(T_1 - T_2).$$

Обратите внимание!



1. Для нагревания тела необходимо затратить определенное количество теплоты. При этом внутренняя энергия тела увеличивается.
2. При охлаждении тела выделяется некоторое количество теплоты и его внутренняя энергия уменьшается.

Слова и словосочетания

нагревание
охлаждение
затратить

теплоёмкость
удельная теплоёмкость
вскипятить

Упражнение 9.1

1. Что изучает термодинамика?
2. Что называют внутренней энергией системы?
3. Что называют термодинамической системой? Приведите примеры.
4. Что называют изолированной термодинамической системой?
5. Что называют термодинамическим равновесием?
6. Что называют термодинамическим процессом?
7. Какие существуют способы изменения внутренней энергии тела?
8. Что называется удельной теплоёмкостью тела?
9. Что такое количество теплоты?
10. Какое количество теплоты необходимо затратить, чтобы вскипятить 2 кг воды, взятой при 283 К в алюминиевом сосуде массой 0,3 кг? $c_{\text{воды}} = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $c_{\text{Al}} = 924 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.
11. Тело, удельная теплоёмкость которого 125 Дж/(кг·К), летит со скоростью 200 м/с. Как изменится температура тела, если вся его кинетическая энергия переходит во внутреннюю энергию тела?
12. Какое количество теплоты необходимо для нагревания воздуха в комнате на 10 °С?
Объём комнаты 500 м³, плотность воздуха $\rho = 1,3 \text{ кг}/\text{м}^3$, удельная теплоёмкость воздуха $c = 1,0 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

13. Тело, удельная теплоёмкость которого $c = 1,2 \cdot 10^2$ Дж/(кг·К), падает с высоты 2000 м и нагревается при ударе о землю. 50 % механической энергии тела превратилось во внутреннюю энергию тела. На сколько градусов увеличилась температура тела?

14. Свинцовая пуля, встретив препятствие, затормозила в нём и нагрелась на 160 К. Определить скорость пули в момент соприкосновения с препятствием, если на нагревание пули затрагивалось 26 % её механической энергии. Удельная теплоёмкость свинца $c_{\text{св}} = 1,2 \cdot 10^2$ Дж/(кг·К).

9.3. Законы термодинамики

Первый закон термодинамики

В середине XIX века экспериментально было установлено, что при совершении механической работы и при передаче системе эквивалентного этой работе количества теплоты происходит одинаковое изменение внутренней энергии этой системы.

Рассмотрим изменение внутренней энергии газа в термодинамическом процессе, когда над газом совершают работу и одновременно газ получает некоторое количество теплоты.

На первом этапе газ получает количество теплоты Q при постоянном объёме. Изменение его внутренней энергии равно: $\Delta U_1 = Q$.

На втором этапе адиабатный процесс ($Q = 0$). Над газом совершили работу. Работа внешних сил при адиабатном процессе идёт на увеличение внутренней энергии системы: $\Delta U_2 = A_{\text{вн}}$.

Полное изменение внутренней энергии ΔU при тепловом процессе:

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 = Q + A_{\text{вн}}. \quad (9.2)$$

Изменение внутренней энергии системы определяется количеством полученной ($Q > 0$) или отданной ($Q < 0$) теплоты и работой внешних сил $A_{\text{вн}}$. Работа внешних сил $A_{\text{вн}}$ положительная при сжатии и отрицательная при расширении.

В термодинамике это уравнение записывают так:

$$Q = \Delta U + A, \quad (9.3)$$

где A — работа, совершаемая системой против внешних сил ($A > 0$ при расширении, $A < 0$ при сжатии); ΔU — изменение внутренней энергии; Q — количество теплоты.

Уравнение (9.3) выражает первый закон термодинамики:

количество теплоты, сообщённое системе, идёт на изменение его внутренней энергии и на совершение работы.

Величина ΔU характеризует изменение состояния системы независимо от способа этого изменения. Величины Q и A характеризуют именно процесс изменения состояния.

Для разных изопроцессов величины Q и A будут разные: 1) изотермическое расширение ($T = \text{const}$, $\Delta U = 0$) $Q = A$; 2) изобарное расширение $Q = \Delta U + A$. Количество теплоты идёт на увеличение внутренней энергии газа и на совершение им работы; 3) изохорное нагревание $A = 0$, так как $V = \text{const}$. $Q = \Delta U$.

Энергия не возникает и не исчезает, а только превращается из одного вида в другой.

Первый закон термодинамики — это закон сохранения и превращения энергии.

Второй закон термодинамики

В природе термодинамические процессы всегда идут в одном направлении.

Например, процесс теплообмена идёт от более нагретых тел к менее нагретым, а обратный процесс не происходит. опыты показывают, что механическая энергия самопроизвольно переходит во внутреннюю.

Внутренняя энергия не может самопроизвольно переходить в механическую. Процессы, происходящие в термодинамических системах, имеют важное свойство — они необратимы.

Примеры необратимого процесса:

- 1) переход теплоты от горячего тела к холодному;
- 2) переход механической энергии во внутреннюю.

Механическая энергия переходит во внутреннюю, но внутренняя энергия никогда не переходит в механическую. Процесс теплообмена идёт от горячих тел к холодным, но не наоборот.

Поэтому был сформулирован второй закон термодинамики:

невозможен такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы превращение внутренней энергии тела в механическую.

Количество теплоты не может самопроизвольно переходить от тел с меньшей температурой к телам с большей температурой.

Обратите внимание!



1. Энергия не возникает и не исчезает, а только превращается из одного вида в другой.

2. Энергия является мерой превращения одной формы движения материи в другую.

Упражнение 9.2

1. Сформулировать первый закон термодинамики.
2. Какое основное свойство термодинамических процессов?
3. Привести примеры необратимого процесса.
4. Как в природе идут термодинамические процессы?
5. Сформулировать второй закон термодинамики.

9.4. Уравнение теплового баланса

Рассмотрим изолированную термодинамическую систему, в которой изменение внутренней энергии тел происходит только в процессе теплообмена: $\Delta U = Q$.

В такой термодинамической системе внутренняя энергия одних тел увеличивается, а других — уменьшается. Закон сохранения и превращения энергии в такой системе записывают в виде *уравнения теплового баланса*:

$$\sum_{i=1}^n Q_{i\text{отд}} = \sum_{j=1}^m Q_{j\text{получ}}$$

где n — количество тел, которые отдают теплоту; m — количество тел, которые получают теплоту.

Сформулируем уравнение теплового баланса:

количество теплоты, отданное телами, внутренняя энергия которых уменьшается, равно количеству теплоты, полученному телами, внутренняя энергия которых увеличивается.

Величину $Q_{\text{отд}}$ можно рассчитать по формуле $Q = cm(T_1 - T_2)$, а $Q_{\text{получ}}$ — по формуле $Q = cm(T_2 - T_1)$.

Уравнение теплового баланса при теплообмене выполняется в изолированной термодинамической системе. Прибор для измерения количества теплоты — *калориметр*. Калориметр состоит из металлического стакана, который находится в другом металлическом стакане так, что они не соприкасаются. Внутренний стакан стоит на теплоизоляторе.

Удельную теплоёмкость твёрдых тел определяют следующим способом: тело нагревают до определённой температуры, а затем помещают в калориметр с холодной водой. После теплового равновесия определяют общую температуру в калориметре.

В соответствии с уравнением теплового баланса количество теплоты, которое выделилось при охлаждении тела, равно количеству теплоты, которое получают калориметр и вода. Если m_1 — масса калориметра, c_1 — удельная теплоёмкость калориметра, m_2 — масса воды, c_2 — удельная теплоёмкость воды, t_1 — начальная температура воды и калориметра, m — масса тела, t и θ — начальная температура тела и общая температура в калориметре, то из уравнения

$$c_x m(t - \theta) = c_1 m_1(\theta - t_1) + c_2 m_2(\theta - t_1)$$

можно найти теплоёмкость:

$$c_x = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2)(\theta - t_1)}{m(t - \theta)}$$

Обратите внимание!



1. Процесс изменения внутренней энергии системы без совершения над ней работы внешними силами называют *теплопередачей*.

2. При теплопередаче одни тела отдают некоторое количество теплоты (при этом они *охлаждаются*), другие тела получают такое же количество теплоты (при этом они *нагреваются*).

Слова и словосочетания

охлаждение
нагревание
калориметр

тепловой баланс
теплопередача
латунь

Упражнение 9.3

1. Сформулировать уравнение теплового баланса.
2. В какой термодинамической системе выполняется уравнение теплового баланса?
3. В воду массой 5 кг, взятую при температуре 7 °С, погрузили железо, нагретое до 540 °С. Определить массу железа, если температура смеси стала равной 40 °С.
4. В калориметр массой 128 г, содержащий 240 г воды при температуре 8,4 °С, опущено металлическое тело массой 192 г. Удельная теплоёмкость тела $c_t = 463$ Дж/(кг·К). Тело нагрето до температуры 100 °С. Определить окончательную температуру, которая установится в калориметре, если его удельная теплоёмкость $c_k = 400$ Дж/(кг·К). Удельная теплоёмкость воды $c_v = 4200$ Дж/(кг·К).

5. В латунный калориметр массой 0,1 кг, содержащий 0,2 кг воды при температуре 20 °С, опущено металлическое тело массой 0,1 кг, нагретое до 100 °С. В калориметре установилась окончательная температура 24 °С. Определить удельную теплоёмкость вещества тела, если удельная теплоёмкость воды $c_v = 4200$ Дж/(кг·К), удельная теплоёмкость латуни $c_{\text{латунь}} = 38$ Дж/(кг·К).

6. Медный предмет массой 0,5 кг был нагрет до 100 °С. Затем его поместили в алюминиевый калориметр массой 0,06 кг, содержащий 0,4 кг воды при температуре 15 °С. Окончательно установилась температура 23,4 °С. Определить удельную теплоёмкость меди.

9.5. Удельная теплота сгорания

При трении и химических реакциях происходит нагревание тел. В химических реакциях в качестве источника теплоты чаще всего используется реакция горения.

Для горения необходимо топливо. Топливом могут быть многие вещества: уголь, нефть, дрова, горючие газы.

При сгорании разных видов топлива выделяется разное количество теплоты.

Количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании 1 кг топлива, называется *удельной теплотой сгорания топлива* q :

$$q = Q / m ,$$

где q — удельная теплота сгорания топлива, или теплотворная способность топлива.

Единица удельной теплоты сгорания топлива в СИ — джоуль на килограмм: $[q] = \text{Дж/кг}$.

Всегда при сгорании топлива в системе выделяется больше теплоты, чем используется в полезных целях. Поэтому определяют коэффициент полезного действия нагревателя.

Коэффициент полезного действия нагревателя — это отношение количества полезной теплоты $Q_{\text{п}}$ к количеству теплоты Q , выделенному при полном сгорании топлива:

$$\eta = \frac{Q_{\text{п}}}{Q} = \frac{cm_1\Delta T}{mq} ,$$

где η — коэффициент полезного действия; c — удельная теплоёмкость нагреваемого тела; m_1 — масса нагреваемого тела; ΔT — изменение температуры при нагревании; m — масса топлива; q — удельная теплота сгорания топлива.

Обычно коэффициент полезного действия выражается в процентах:

$$\eta = \frac{Q_{\text{п}}}{Q} \cdot 100 \%$$

Слова и словосочетания

химическая реакция	топливо
реакция горения	нагреватель
сгорание топлива	уголь
теплотворная способность	нефть

9.6. Плавление и кристаллизация

В термодинамике *фазой* называется совокупность однородных, одинаковых по своим свойствам частей системы. Например, вода, лёд, пар — это система трёх фаз одного вещества.

Переход вещества из одного фазового состояния в другое называется *фазовым превращением*. При фазовых превращениях происходит поглощение или выделение теплоты.

Плавлением называется процесс перехода вещества из твёрдого состояния в жидкое. В процессе плавления твёрдого кристаллического тела температура его не меняется, она остаётся постоянной до тех пор, пока полностью не расплавится всё тело.

Температура, при которой плавится данное вещество, называется его *температурой плавления*.

Температура плавления у всех веществ разная. Например, температура плавления алюминия — 933 К, железа — 1793 К, меди — 1357 К, льда — 273 К, ртути — -212 К.

При *нагревании* твёрдого тела увеличивается средняя скорость колебательного движения молекул и увеличивается расстояние, на которое удаляется молекула от положения равновесия. При этом силы притяжения между молекулами малы и не могут удерживать частицы в колебательном движении около положения равновесия. Кристаллическая решётка разрушается, вещество переходит в жидкое состояние.

При увеличении расстояния между молекулами увеличивается их средняя потенциальная энергия, следовательно, увеличивается внутренняя энергия тела. Увеличение внутренней энергии происходит за счёт передаваемого телу количества теплоты. Средняя кинетическая энергия молекул при плавлении не изменяется — температура тела остаётся постоянной.

На плавление тела расходуется определённое количество теплоты, оно идёт на увеличение внутренней энергии. Внутренняя энер-

гия жидкости, образовавшейся при плавлении твёрдого тела (при температуре плавления), больше, чем внутренняя энергия твёрдого тела при той же температуре.

Процесс превращения вещества из жидкой фазы в твёрдую называется **кристаллизацией** или отвердеванием.

Установлено, что для каждого кристаллического вещества существует определённая температура плавления (при определённом давлении), равная температуре кристаллизации.

При кристаллизации температура остаётся постоянной, пока вся жидкость не превратится в кристаллическое твёрдое тело. При этом выделяется определённое количество теплоты.

При *охлаждении* жидкости уменьшается средняя скорость движения молекул и расстояния между молекулами уменьшаются. При этом увеличиваются силы притяжения между молекулами. При температуре кристаллизации силы притяжения настолько возрастают, что становятся достаточными, чтобы удерживать частицы в определённом порядке. Образуется кристаллическая решётка кристалла. Внутренняя энергия тела уменьшается, так как уменьшается средняя потенциальная энергия молекул. Средняя кинетическая энергия молекул при кристаллизации не изменяется (температура тела остаётся постоянной).

Точка плавления — это температура плавления при нормальном давлении. Для того, чтобы изменить внутреннюю энергию тела, необходимо определённое количество теплоты.

Удельная теплота плавления λ — это количество теплоты, необходимое для перехода единицы массы вещества из твёрдого состояния в жидкое при температуре плавления. Удельная теплота плавления зависит от природы вещества и от внешнего давления.

Если тело массой m при температуре плавления получило количество теплоты Q и полностью расплавилось, то удельная теплота плавления равна:

$$\lambda = \frac{Q}{m}.$$

Единица удельной теплоты плавления в СИ — джоуль на килограмм: $[\lambda] = 1 \text{ Дж/кг}$. Зная удельную теплоту плавления вещества, можно определить количество теплоты, необходимое для плавления тела массой m :

$$Q = \lambda m.$$

Удельная теплота кристаллизации равна удельной теплоте плавления. Превращение твёрдого тела в жидкость или газ является

фазовым переходом первого рода. Аморфные тела не имеют определённой точки плавления и кристаллизации.

Слова и словосочетания

превращение	химическая реакция
самопроизвольно	реакция горения
топливо	тепловой баланс
горение	теплота сгорания
калориметр	теплотворная способность
нагреватель	нефть
уголь	дрова
фаза	фазовое превращение
плавление	температура плавления
кристаллизация	точка плавления
охлаждение	теплота плавления
пар	парообразование
испарение	возгонка
кипение	теплота парообразования
конденсация	насыщенный пар

Упражнение 9.4

1. Что называется удельной теплотой сгорания топлива?
2. Как называется прибор для измерения количества теплоты?
3. Что называется коэффициентом полезного действия нагревателя?
4. Что в термодинамике называется фазой?
5. Что такое фазовое превращение?
6. Какой процесс называется плавлением?
7. Какая температура называется температурой плавления?
8. Что происходит при нагревании твёрдого тела?
9. Какой процесс называется кристаллизацией?
10. Что происходит при охлаждении жидкости?
11. Что называется удельной теплотой плавления?
12. Назвать единицу удельной теплоты плавления.
13. На спиртовке нагрели 180 г воды от 14 до 91 °С и сожгли при этом 6 г спирта. Определить коэффициент полезного действия спиртовки.
14. Сколько меди можно расплавить в печи с КПД 35 %, сжигая 2,2 т угля, если начальная температура меди 13 °С?
15. Какое количество теплоты выделяется при замерзании 10 кг воды, взятой при 0 °С? 3360 кДж

9.7. Парообразование

Парообразование — это процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное.

Парообразование, протекающее при любой температуре, называется *испарением*. Испарение происходит только с поверхности жидкости. Испарение происходит потому, что в результате хаотического движения молекул всегда имеются отдельные молекулы, скорость которых в данный момент больше скорости других молекул жидкости. Поэтому кинетическая энергия этих молекул больше среднего значения кинетической энергии молекул жидкости. Энергия этих «быстрых» молекул достаточна для преодоления сил притяжения поверхностного слоя жидкости. Молекулы вылетают из жидкости и образуют пар.

Твёрдые тела тоже испаряются. Парообразование из твёрдой фазы называется *возгонкой*.

При испарении жидкость охлаждается, её температура понижается, так как испаряются молекулы с большей скоростью и средняя кинетическая энергия молекул жидкости уменьшается.

Скорость испарения зависит от:

- 1) рода жидкости;
- 2) температуры — чем выше температура, тем больше «быстрых» молекул в жидкости;
- 3) площади поверхности — чем больше поверхность, тем больше молекул может вылететь из жидкости за 1 с;
- 4) давления воздуха над поверхностью — чем больше внешнее давление, тем больше возможность возвращения в жидкость испарившихся молекул и меньше скорость испарения.

Переход из жидкой фазы в газообразную происходит и при кипении.

Кипение — это парообразование, которое происходит как с поверхности, так и внутри жидкости.

Процесс кипения протекает при нагревании жидкости до определённой температуры. Температура, при которой кипит жидкость, остаётся постоянной и называется *температурой кипения*. Эта температура остаётся постоянной до тех пор, пока вся жидкость не превратится в пар.

Температура кипения зависит от рода жидкости и от внешнего давления. При низком давлении закипает совсем холодная вода.

С повышением внешнего давления температура кипения увеличивается, при понижении давления — уменьшается.

Количество теплоты, которую получает жидкость во время кипения, идёт на увеличение внутренней энергии молекул. Внутренняя энергия пара, образовавшегося из жидкости при температуре

кипения, больше, чем внутренняя энергия жидкости при такой же температуре.

При переходе жидкости в пар увеличивается средняя потенциальная энергия молекул, так как увеличивается расстояние между молекулами.

Средняя кинетическая энергия молекул не изменяется, так как температура жидкости и пара при кипении одинаковая и остаётся во время кипения постоянной.

При кипении *поглощается* определённое количество теплоты.

Количество теплоты, необходимое для перевода единицы массы вещества из жидкого состояния в пар при температуре кипения, называется *удельной теплотой парообразования* r .

Если жидкость массой m при нагревании до температуры кипения получила количество теплоты Q и полностью перешла в пар, то удельная теплота парообразования равна:

$$r = \frac{Q}{m}.$$

Единица удельной теплоты парообразования в СИ — джоуль на килограмм: $[r] = \text{Дж/кг}$.

Удельная теплота парообразования зависит от рода жидкости и температуры кипения. С повышением температуры кипения жидкости удельная теплота парообразования уменьшается. Это объясняется тем, что при повышении температуры кипения увеличивается средняя кинетическая энергия молекул и увеличивается среднее расстояние между ними (жидкость расширяется), силы взаимодействия между молекулами ослабевают, молекулам легче преодолеть силы притяжения поверхностного слоя.

Количество теплоты, необходимое для превращения массы m жидкости в пар равно: $Q = r \cdot m$.

Конденсация — это процесс перехода из газообразной фазы в жидкую.

При конденсации пара *выделяется* количество теплоты, равное теплоте парообразования. Удельная теплота парообразования равна удельной теплоте конденсации.

9.8. Насыщенный пар

Пусть в закрытом сосуде находится жидкость и её пар. При испарении жидкости возрастает концентрация и давление пара, уменьшается скорость испарения. Молекулы начинают возвращаться из пара в жидкость. В закрытом сосуде всегда одновремен-

но с процессом испарения происходит и процесс превращения пара в жидкость.

При определённом давлении (для данной температуры) количество молекул, которые вылетели из жидкости за 1 с равно количеству молекул, которые вернулись в жидкость.

Между жидкостью и паром установилось *динамическое равновесие*. Равновесие будет существовать, пока не изменится объём системы или температура.

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется *насыщенным паром*.

Насыщенный пар при данной температуре имеет определённые для данного вещества плотность и давление.

Насыщенный пар подчиняется всем газовым законам и уравнению состояния идеального газа.

Свойства насыщенного пара:

1) давление насыщенного пара зависит от рода жидкости и при данной температуре не изменяется;

2) давление насыщенного пара при постоянной температуре не зависит от объёма;

3) давление насыщенного пара зависит от температуры пара: с увеличением температуры давление насыщенного пара увеличивается, так как увеличивается скорость молекул и плотность.

Давление, создаваемое насыщенным паром, является наибольшим давлением, которое оказывают пары жидкости данного вещества при заданной температуре.

Упражнение 9.5

1. Какой процесс называется парообразованием?
2. Почему происходит испарение?
3. Какой процесс называется возгонкой?
4. От чего зависит скорость испарения?
5. Какой процесс называется кипением?
6. Какая температура называется температурой кипения?
7. Что такое удельная теплота парообразования?
8. Какой процесс называется конденсацией?
9. Что такое насыщенный пар?
10. Назвать свойства насыщенного пара.
11. Электронагреватель мощностью 600 Вт имеет КПД 50 %. За 1 час в нём нагрели 1,8 кг воды от некоторой начальной температуры до температуры кипения. Часть воды массой 0,2 кг испарилась при температуре кипения. Определить начальную температуру воды.

12. Горячую воду вылили в сосуд со льдом. Даны графики зависимости температуры от времени (рис. 9.1). Обозначить части графика. Объяснить процессы, которые соответствуют определённым частям графика. Составить уравнение теплового баланса.

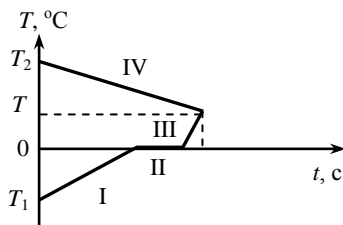


Рис. 9.1

13. В сосуд налили воду массой 10 кг при температуре 10 °С и положили кусок льда, охлаждённого до –50 °С. Температура образовавшегося льда оказалась равной –4 °С. Какое количество льда было положено в сосуд? Начертить график зависимости температуры от времени для отдельных тепловых процессов в теплообмене.

14. Три тела одинаковой массы из алюминия, меди, свинца с температурой 273 К положили в одинаковые сосуды с горячей водой, температура которой 373 К. Произошёл теплообмен.

В каком сосуде температура воды будет наименьшей?

$$c_{\text{воды}} = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$c_{\text{Al}} = 924 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$c_{\text{Pb}} = 0,13 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$c_{\text{Cu}} = 3,8 \cdot 10^2 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

15. В холодильнике из воды изготавливают лёд. За t_1 мин температура воды изменилась от 16 до 0 °С. Ещё через t_2 мин ($t_2 = 5t_1$) вода превратилась в лёд. Считаем, что теплота выделяется равномерно, тогда $Q_{\text{отв}} = 5Q_{\text{охл}}$. Определить удельную теплоту отвердения воды.

16. Пар при температуре кипения впустили в сосуд со льдом, температура которого 0 °С. Объяснить, какие процессы происходят в сосуде? Построить графики зависимости температуры от времени для этих процессов. Составить уравнение теплового баланса.

Обратите внимание!

Основные формулы и законы термодинамики приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Термодинамика. Основные формулы

Физическая величина, закон	Формула	Единица измерения
U — внутренняя энергия тела	$U = (E_{K_1} + E_{K_2} + \dots + E_{K_N})N$; N — число молекул	Дж
U — внутренняя энергия идеального газа	$U = E_{K_1} + E_{K_2} + \dots + E_{K_i} = \sum_{i=1}^N E_{K_i}$	Дж
ΔU — изменение внутренней энергии	$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2}kN(T_2 - T_1)$	Дж
Q — количество теплоты	$Q = \Delta U = U_2 - U_1$; $\Delta U = A$	Дж

Окончание табл. 9.1

Физическая величина, закон	Формула	Единица измерения
c — удельная теплоёмкость	$c = \frac{Q}{m\Delta T}$; $Q = cm(T_2 - T_1)$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
Первый закон термодинамики	$Q = \Delta U + A$	Дж
Уравнение теплового баланса	$\sum_{i=1}^n Q_{i\text{отд}} = \sum_{j=1}^m Q_{j\text{получ}}$	Дж
Удельная теплота сгорания	$q = Q/m$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
η — коэффициент полезного действия	$\eta = \frac{Q_{\text{полезн}}}{Q} \cdot 100\% = \frac{cm_1\Delta T}{mq} \cdot 100\%$	%
η — коэффициент полезного действия тепловой машины	$\eta = \frac{A}{Q} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$	%
Второй закон термодинамики	$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}$	%
σ — механическое напряжение	$\sigma = \frac{F}{S}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}$
ε — относительная деформация	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$	—
Закон Гука	$\sigma = E \cdot \varepsilon$	Па

Модуль Юнга	$E = \frac{1}{\alpha}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}$
Удельная теплота плавления	$\lambda = \frac{Q}{m}; Q = \lambda m$ $\lambda_{\text{плавл}} = \lambda_{\text{отверд}}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Удельная теплота парообразования	$r = \frac{Q}{m}; Q = r \cdot m$ $r_{\text{парообр}} = r_{\text{конд}}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Тепловое расширение: — линейное — объёмное	$l = l_0(1 + \alpha \Delta T);$ $V = V_0(1 + \beta \Delta T)$	м м



ОТВЕТЫ

- 1.2. **1.** $P_a = 2,5 \cdot 10^4 \text{ Н}; P_6 = 13250 \text{ Н}; P_B = 30750 \text{ Н}$. **2.** $v \approx 25,4 \text{ м/с}$.
3. $v = 7400 \text{ м/с}$. **4.** $v \approx 7,7 \cdot 10^3 \text{ м/с}; T = 5603 \text{ с}$. **5.** $P = 45 \text{ кН}$.
6. $P_B = 2814 \text{ Н}, P_H = 4186 \text{ Н}$.
- 1.3. **1.** $v_{\text{max}} \approx 18,7 \text{ м/с}$. **2.** $v = 3,8 \text{ м/с}; T \approx 1,4 \text{ с}$. **3.** $\alpha \approx 17^\circ$. **4.** $R = 0,55 \text{ м}$.
- 1.5. **6.** $v = 1,7 \text{ м/с}$. **7.** $v = 13,3 \text{ м/с}$. **8.** $v = 1 \text{ м/с}$. **9.** $v = 133,3 \text{ м/с}$.
10. $v = -0,5 \text{ м/с}$. **11.** $v = 1,25 \text{ м/с}$.
- 1.6. **5.** $v = 420 \text{ м/с}$.
- 2.1. **9.** $A = 5085 \text{ Дж}$.
- 2.3. **8.** $F_{\text{тяги}} = 30 \text{ кН}$. **9.** $t = 864 \text{ с}$.
- 2.4. **8.** $a \approx 0,1 \text{ м/с}^2$. **9.** $A = 1,3 \cdot 10^6 \text{ Дж}; \langle N \rangle = 6,5 \cdot 10^3 \text{ Вт}$.
10. $N = 15,3 \text{ кВт}$. **11.** $a = 0,25 \text{ м/с}^2$. **12.** $E_k = 100 \text{ Дж}$.
- 2.5. **5.** $v_0 = 14 \text{ м/с}$. **6.** $A = -36 \text{ Дж}$. **7.** $F_c = 2,1 \text{ кН}$. **8.** $T = 90 \text{ Н}$.
- 2.6. **6.** $v_1 = 0,4 \text{ м/с}; v = 1,5 \text{ м/с}$.
- 3.1. **8.** $F = 13,7 \text{ Н}$. **9.** $F \approx 87 \text{ Н}; T \approx 172 \text{ Н}$.
- 3.2. **5.** $\alpha = 45^\circ; P_1 = 416,7 \text{ Н}; P_2 = 66,7 \text{ Н}$. **6.** $P_A = 150 \text{ Н}; P_B = 450 \text{ Н}$.
- 4.1. **12.** $g = 9,86 \text{ м/с}^2$. **13.** $T = 0,628 \text{ с}$.
- 4.2. **5.** $A = 10 \text{ см}; v = 2,5 \text{ Гц}; T = 0,4 \text{ с}; x = 7,07 \text{ см}; \varphi = \frac{3\pi}{4}$.
6. $k = 98,6 \text{ Н/м}; v = 0,5 \text{ Гц}$. **7.** $x = 0,095 \text{ м}$.
- 4.3. **4.** $x = 0,059 \text{ м}; v = 0,25 \text{ м/с}; a = 0,57 \text{ м/с}^2$.
- 5.2. **5.** $F = 980 \text{ Н}$. **6.** $F = 100 \text{ кН}$.
- 5.3. **5.** $F = 66950 \cdot 10^3 \text{ Н}$. **6.** $\Delta h = 2,5 \text{ см}$.

- 5.6. **8.** $F_c = 0,294 \text{ Н}$. **9.** $V = 1,86 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. **11.** $A = 7,84 \text{ Дж}$.
- 7.1. **11.** $m_{\text{H}_2\text{O}} \approx 3 \cdot 10^{-23} \text{ г}$; $N = 30 \cdot 10^{23}$ молекул.
- 8.1. **10.** $\langle E \rangle \approx 1,5 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$.
- 8.2. **10.** $T = 1092 \text{ К}$.
- 8.4. **1.** $T = 364 \text{ К}$. **2.** $V = 0,1 \text{ м}^3$. **3.** $N \approx 6 \cdot 10^{27}$ молекул.
4. $\rho \approx 0,081 \text{ кг/м}^3$.
- 8.5. **3.** $\rho \approx 0,5 \text{ кг/м}^3$.
- 9.1. **10.** $Q = 721 \text{ Дж}$. **11.** $\Delta T = 80 \text{ К}$. **12.** $Q = 18395 \cdot 10^4 \text{ Дж}$.
13. $\Delta T = 80 \text{ К}$. **14.** $v = 104 \text{ м/с}$.
- 9.3. **3.** $m \approx 3 \text{ кг}$. **5.** $c = 0,46 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$. **6.** $c_{\text{Cu}} = 3,8 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.
- 9.4. **13.** КПД = 36 %. **14.** $m \approx 3,2 \text{ т}$.
- 9.5. **11.** $T_0 = 288,3 \text{ К}$. **13.** $m = 40 \text{ кг}$.



СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ДИНАМИКА	5
1.1. Применение законов динамики к равномерному движению по окружности.....	5
1.2. Движение тела по окружности в вертикальной плоскости	6
1.3. Движение тела по окружности в горизонтальной плоскости	12
1.4. Импульс тела. Импульс силы. Второй закон Ньютона в общей форме.....	16
1.5. Закон сохранения импульса	17
1.6. Реактивное движение.....	20
2. МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА И ЭНЕРГИЯ	23
2.1. Механическая работа	23
2.2. Мощность. Коэффициент полезного действия механизмов	26
2.3. Механическая энергия	28
2.4. Виды механической энергии.....	30
2.4.1. Кинетическая энергия.....	30

2.4.2. Потенциальная энергия	31
2.5. Полная механическая энергия. Закон сохранения и превращения механической энергии	34
2.6. Центральный удар.....	37
3. СТАТИКА	39
3.1. Условия равновесия тел	39
3.2. Виды равновесия.....	41
4. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ	44
4.1. Колебательное движение. Характеристики колебательного движения.....	44
4.2. Уравнение смещения гармонических колебаний.....	48
4.3. Скорость и ускорение при гармонических колебаниях	50
4.4. Превращение энергии при механических колебаниях. Резонанс	52
5. МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ	55
5.1. Механические свойства жидкостей и газов.....	55
5.2. Передача давления жидкостями и газами.....	57
5.3. Давление жидкости на дно и стенки сосуда	60
5.4. Атмосферное давление	62
5.5. Давление внутри жидкости. Закон Архимеда	64
5.6. Плавание тел.....	66
6. АЭРОДИНАМИКА И ГИДРОДИНАМИКА	70
6.1. Уравнение неразрывности течения	70
6.2. Уравнение Бернулли.....	72
6.3. Подъёмная сила крыла и полёт самолёта.....	75
7. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА	80
7.1. Основные положения молекулярно-кинетической теории.....	80
7.2. Тепловое движение молекул в газах,	

твёрдых телах и жидкостях	87
7.3. Тепловое равновесие. Температура. Шкала температур Цельсия.....	89
7.4. Связь между температурой и средней кинетической энергией частиц	92
7.5. Тепловое расширение жидкостей и твёрдых тел.....	94
8. ОСНОВЫ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ	97
8.1. Идеальный газ	97
8.2. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа.....	98
8.3. Экспериментальные газовые законы. Изопрцессы	101
8.4. Уравнение состояния идеального газа	105
8.5. Уравнение состояния реального газа	107
8.6. Температура — мера средней кинетической энергии	108
8.7. Закон Дальтона	110
9. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ	113
9.1. Внутренняя энергия	113
9.2. Удельная теплоёмкость	116
9.3. Законы термодинамики	118
9.4. Уравнение теплового баланса	120
9.5. Удельная теплота сгорания	122
9.6. Плавление и кристаллизация	123
9.7. Парообразование	125
9.8. Насыщенный пар	127
ОТВЕТЫ	131

