МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ЦЕНТР СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ

Т.М. Оплачко, К.А. Турсунметов

ФИЗИКА

ЧАСТЬ I

МЕХАНИКА

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА
ТЕРМОДИНАМИКА

*Учебное пособие для академических лицеев и
профессиональных колледжей*

Пятое издание

Издательско-полиграфический творческий дом имени Чулпана
Ташкент − 2016

УДК 53(075)
ББК 22.3я723
О-61

Рекомендовано к изданию Советом по координации деятельности учебно-методических объединений высшего и среднего специального профессионального образования

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор **У. Абдурахманов,**
доктор физико-математических наук, профессор **Н. Зикриллаев,**
кандидат физико-математических наук, доцент **А.С. Нигманходжаев**

Данное пособие в двух частях соответствует учебной программе для учебных заведений среднего специального профессионального образования Республики Узбекистан. Содержит всю необходимую теоретическую базу в соответствии с требованиями, вытекающими из тестовых заданий ГЦТ, и может оказать существенную помощь при работе с тестами. Отличается лаконичностью, информативностью, структурностью, наглядностью, многоуровневостью, доходчивостью и современным дизайном. Обе части содержат около 600 контрольных вопросов и заданий, 900 тестов с ответами и более 500 иллюстраций. Учебное пособие «Физика» рекомендуется для учащихся академических лицеев и профессиональных колледжей при изучении, повторении, а также при самостоятельном изучении курса элементарной физики.

Предложения и пожелания просим направлять по электронному адресу: <kamiljan 47@yandex.ru>

ISBN 978-9943-05-866-8

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное пособие содержит конспекты лекций по физике по всем разделам и темам, предусмотренным программой для учебных заведений среднего специального профессионального образования Республики Узбекистан.

Оно включает необходимую теоретическую базу по элементарной физике в соответствии с требованиями тестовых заданий, разработанных ГЦТ Республики Узбекистан.

Настоящее пособие не дублирует существующие ныне учебники физики и не исключает работу с ними. Предлагаемый вариант конспектов позволяет творчески его варьировать как в сторону расширения любой темы, так и в сторону сокращения, создавая собственные сигналы и компакты.

Данное учебное пособие составлено по структуре опорных конспектов и на принципе «наглядная конструкция». Массив такого текста намеренно разделяется на отдельные части с целью более эффективного восприятия информации.

Авторы стремились избегать громоздких повествовательных изложений, тем не менее, все необходимые выводы формул приводятся полностью, логически завершенной цепочкой.

Создатели данного пособия стремились придать ему следующие качества: лаконичность, структурность, образность, многоуровневость, динамичность, доходчивость, а также придать им привлекательный вид, соответствующий требованиям современного дизайна.

Большой эффект в обучении даст наличие данного пособия у всех учащихся класса. Это позволит преподавателю экономить время при проведении лекции, объяснении темы и организации самостоятельной работы. Преподаватель может добиться понимания учебного материала на уроке, не требуя от учащихся составления конспекта. Сэкономленное время целесообразнее использовать для решения задач и закрепления знаний. В конце каждой главы приведены контрольные вопросы и тестовые задания с ответами, которые позволяют осуществлять оперативный контроль усвоения изучаемого материала в любых формах, а также окажут помощь при самостоятельном изучении курса физики.

Учебное пособие рекомендовано для учащихся учебных заведений среднего специального профессионального образования, абитуриентов и преподавателей при изучении и повторении курса физики и работы с тестовыми заданиями.

РАЗДЕЛ I. МЕХАНИКА

ВВЕДЕНИЕ

Физика – наука о неживой природе. Она отвечает естественному стремлению человека знать и понимать окружающий его мир. Это знание составляет важную часть культуры человека, его интеллекта. Все, что реально существует в мире, на Земле и вне Земли, называют материей. Материальны тела, вещества, звук, свет, радиоволны... «Реально существует» – значит существует независимо от нашего сознания и нашего знания.

Материя существует в двух формах: вещество и поле.

Основное свойство материи – её изменчивость или движение. Всевозможные изменения в материальном мире называют явлениями природы.

Физика (от греческого phisis – природа) изучает свойства материи, её изменения (явления природы), законы, которые описывают эти изменения, связи между явлениями.

Физика имеет практическое значение. На базе знаний физики идет развитие техники, прогресс человеческой цивилизации.

Механика – раздел физики, изучающий движение и взаимодействие макроскопических (то есть больших) тел. Механика – самый древний раздел физики, поэтому самый гармонично развитый и завершенный.

Mehanike – в переводе с греческого – наука о машинах, об искусстве их создания.

Аристотель, Архимед, Г. Галилей, Ибн Сина, Беруни, Аль Хорезми, заложили фундамент развития механики и физики как науки.

Цельное учение о механическом движении и взаимодействии тел создал английский ученый Исаак Ньютон. Поэтому классическая механика называется также механикой Ньютона. Для чего необходимы знания механики? Для познания окружающего мира: в основе любого явления в природе лежит движение; для понимания принципов устройства и работы любого механизма, от самого простого до самого сложного; для создания новых машин и развития техники.

Основные разделы механики:

Кинематика (от греч. «kenematos» – движение) – раздел механики, изучающий движение без указания его причин.

Динамика (от греч. «dynamis» – сила) – раздел механики, изучающий движение тел с учетом сил их взаимодействия.

Статика (от греч. «statics» – неподвижный) – раздел механики, изучающий условия равновесия твердых тел.

Глава I
ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ

§ 1. Основные понятия кинематики

Механическим движением называется изменение положения тела в пространстве относительно других тел с течением времени.

Основная задача механики – определить положение тела в пространстве в любой момент времени (Где? Когда?).

Два случая, когда достаточно описать движение одной точки тела: 1) поступательное движение; 2) материальная точка.

1. Поступательным называется движение тела, при котором все его точки движутся одинаково, описывают одинаковые траектории (рис.1.1).

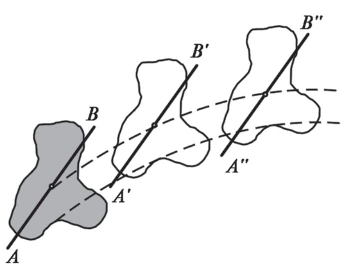


Рис. 1.1

Признак поступательного движения – когда прямая, соединяющая две любые точки тела, остается параллельной самой себе (рис. 1.1).

При поступательном движении тело не вращается и не поворачивается.

Примеры поступательного движения: ступени эскалатора метро, груз на подъемном кране, автомобиль на прямолинейном участке пути и т.д.

2. Материальной точкой называется тело, размерами которого в данных условиях можно пренебречь.

Расстояние >> размеров.

Пример: Самолет на рейсе Москва – Ташкент – материальная точка. Самолет, маневрирующий перед взлетом – не материальная точка.

Любое движение рассматривается относительно выбранной системы отсчета.

Система отсчета: 1) тело отсчета (начало координат),
2) система координат,
3) часы (или другой прибор отсчета времени).

Выбор тела отсчета произволен, например: дом, вагон, Земля.

Система координат: (рис. 1.2)

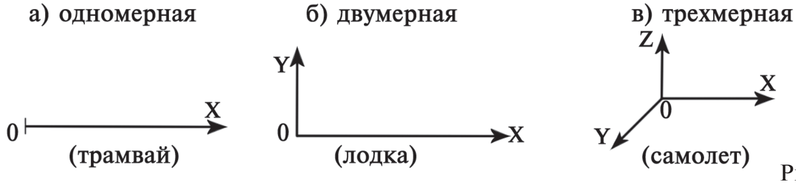


Рис. 1.2

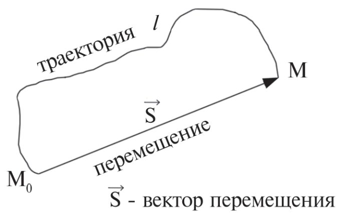


Рис. 1.3

Перемещение $\vec{S}$ – вектор, соединяющий начальное и конечное положения тела (рис.1.3).

Траектория – линия (след), вдоль которой движется тело.

Пройденный путь – длина траектории, по которой движется тело l (м).

§ 2. Действия над векторами

Все величины в физике делятся на скалярные и векторные. *Скалярная величина* не имеет направления и задается только численным значением (модулем). *Векторная величина* – характеризуется численным значением и направлением.

Скалярные величины: масса (m), время (t), объем (V), длина (l), плотность вещества (ρ) и др.

Векторные величины: скорость ($\vec{\upsilon}$), перемещение ($\vec{S}$), ускорение ($\vec{a}$), сила ($\vec{F}$), импульс ($\vec{p}$) и др.

Перенос векторов. Вектор можно переносить параллельно самому себе в любую точку (не изменяя величины) пространства.

Умножение вектора на скаляр. При умножении вектора на скаляр получается вектор, совпадающий по направлению с данным вектором. (Если скаляр отрицательный, то получим вектор, противоположно направленный данному).

Примеры: $\vec{S} = \vec{\upsilon}t$; $\vec{F} = m\vec{a}$; $\vec{p} = m\vec{\upsilon}$.

$\vec{S}$ и $\vec{\upsilon}$, $\vec{F}$ и $\vec{a}$, $\vec{p}$ и $\vec{\upsilon}$ – попарно совпадают по направлению.

Сложение векторов. $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$.

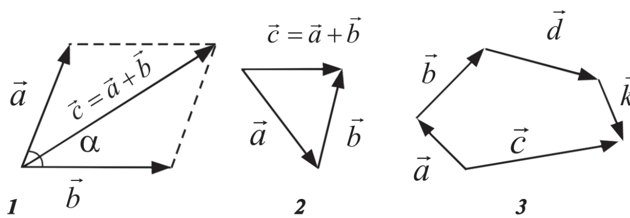


Рис. 1.4

Направление вектора $\vec{c}$ определяется по правилу параллелограмма (1) или треугольника (2), или многоугольника для нескольких векторов (3) (рис.1.4).

Правило сложения векторов подчиняется двум законам:

$\vec{c} = \vec{a} + \vec{b} = \vec{b} + \vec{a}$ (коммутативный закон);

$\vec{c} = (\vec{a} + \vec{b}) + \vec{d} = \vec{a} + (\vec{b} + \vec{d})$ (ассоциативный закон).

Численное значение вектора $\vec{c}$ (модуль) определяется по теореме косинусов.

Теорема косинусов $c = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab\cos\alpha}.$

Частные случаи:

а) если $\alpha = 0°$, $\cos 0° = 1$

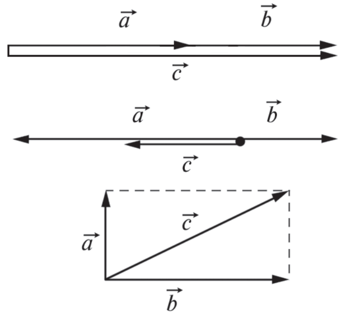
$c = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab} = \sqrt{(a+b)^2} = a + b.$

b) если $\alpha = 180°$, $\cos 180° = -1$

$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab} = \sqrt{(a-b)^2} = a - b.$

c) если $\alpha = 90°$, $\cos 90° = 0$

$c = \sqrt{a^2 + b^2}$ – теорема Пифагора.



Вычитание векторов $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$

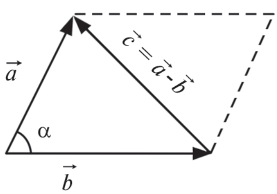


Рис. 1.5

Направление вектора $\vec{c}$ определяется по правилу параллелограмма (другая диагональ). Стрелка направлена от конца вычитаемого к концу уменьшаемого (рис.1.5).

Численное значение вектора $\vec{c}$ определяется по ***теореме косинусов*** (со знаком «минус»).

$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab\cos\alpha}.$

Скалярное произведение двух векторов. Скалярным произведением векторов называют скаляр, равный произведению модулей этих векторов на косинус угла между ними (рис. 1.6).

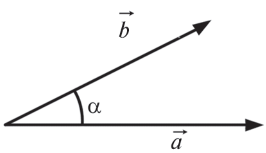


Рис. 1.6

$(\vec{a} \cdot \vec{b}) = ab\cos\alpha.$

Если $\alpha = \dfrac{\pi}{2}$, то $cos\alpha = 0$ и

$(\vec{a} \cdot \vec{b}) = ab\ \cos\dfrac{\pi}{2} = 0.$ *Скалярное произведение двух взаимно перпендикулярных векторов равно нулю.*

Векторное произведение двух векторов. *Векторным произведением двух векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ называют такой вектор $\vec{c}$, который перпендикулярен векторам $\vec{a}$ и $\vec{b}$, а модуль его равен площади параллелограмма, построенного на векторах $\vec{a}$ и $\vec{b}$.* Направление вектора $\vec{c}$ совпадает с поступательным движением острия буравчика, направление движения ручки буравчика совпадает с направлением перехода от вектора $\vec{a}$ к вектору $\vec{b}$ (рис. 1.7).

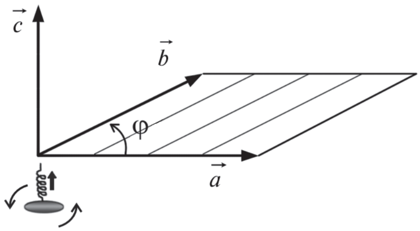


Рис. 1.7

$$\vec{c} = [\vec{a} \cdot \vec{b}].$$

Модуль вектора равен

$$c = ab \sin \varphi.$$

Проекции вектора на координатные оси:

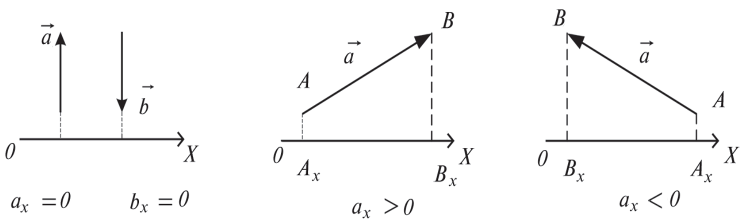


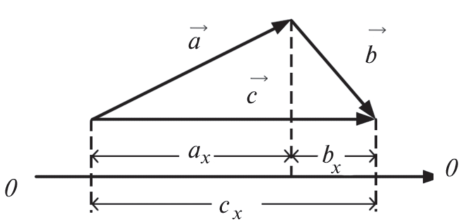
Рис. 1.8

Проекцией вектора $\vec{a}$ на ось x называется отрезок a_x между проекциями на эту ось начала и конца вектора (рис. 1.8).

Если вектор перпендикулярен оси, то его проекция равна нулю.

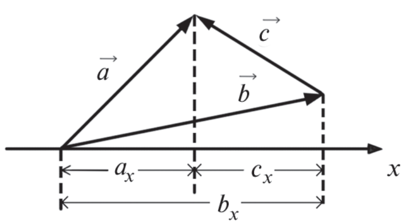
Длина отрезка A_xB_x, взятая со знаком плюс или минус, является проекцией вектора $\vec{a}$ на ось x. Проекция − это скаляр.

Проекция суммы векторов на координатную ось равна алгебраической сумме проекции складываемых векторов на ту же ось (рис. 1.9 и 1.10).



Если $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$, то $c_x = a_x + b_x$.

Рис. 1.9



Если $\vec{c} = \vec{a} - \vec{b}$, то $c_x = a_x - b_x$.

Рис. 1.10

§ 3. Прямолинейное равномерное движение

Прямолинейным равномерным движением *называется движение, при котором тело за любые равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения.*

Прямолинейное движение это движение, при котором траектория – прямая линия.

Скорость $\vec{\upsilon} = \dfrac{\vec{S}}{t}$ $\vec{\upsilon} = const.$

Скоростью равномерного прямолинейного движения называют постоянную векторную величину, равную отношению перемещения тела за любой промежуток времени к значению этого промежутка:

$$\upsilon_x = \frac{S_x}{t}, \quad S_x = \upsilon_x t.$$

Физический смысл скорости: она показывает как быстро изменяется координата в единицу времени. $\upsilon_x = \dfrac{x - x_0}{t} = \dfrac{\Delta x}{\Delta t}.$

Проекции вектора перемещения. Уравнение движения.

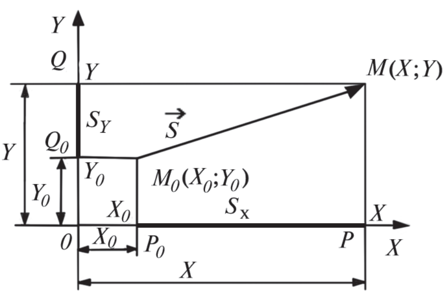


Рис. 1.11

Если тело (рис. 1.11) совершило перемещение $\vec{S}$ из точки $М_0$ (x_0, y_0), в точку М (x, y):

$S_x = x – x_0$ – проекция вектора перемещения на ось x.

$S_y = y – y_0$ – проекция вектора перемещения на ось y

$S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}.$

$$\left.\begin{aligned} x = x_0 + S_x \quad \text{или} \quad x = x_0 + \upsilon_x t \\ y = y_0 + S_y \quad \text{или} \quad y = y_0 + \upsilon_y t \end{aligned}\right\} \textit{Уравнения движения.}$$

Примеры:
$$\begin{cases} x = 2 + 3t; \quad x_0 = 2\,м; \quad \upsilon_x = 3\dfrac{м}{с}. \\ y = -1 + 10t; \quad y_0 = -1\,м; \quad \upsilon_y = 10\dfrac{м}{с}. \end{cases}$$

Графическое представление движения:

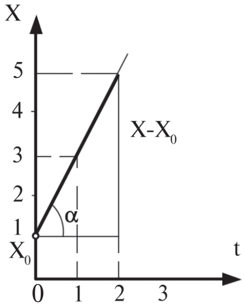


Рис. 1.12

Уравнение: $x = x_0 + \upsilon_x t$.
Пример: $x = 1+2t$.
Строим график движения $x\,(t)$ по точкам:

t (*с*)	0	1	2
x (*м*)	1	3	5

$$\upsilon = \frac{x - x_0}{t} = \frac{\Delta x}{\Delta t}; \quad \upsilon = tg\alpha.$$

Скорость характеризует крутизну зависимости $x\,(t)$ (рис. 1.12).

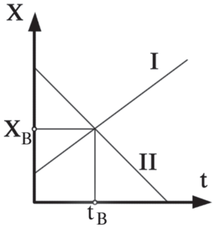


Рис. 1.13

Тело I движется вдоль направления оси x, $\upsilon_I > 0$.

Тело II движется против направления оси x, $\upsilon_{II} < 0$.

Пересечение графиков дает координату $x_в$ и время $t_в$ встречи тел (рис. 1.13).

По графику движения можно определить:

1) положение тела x в любое время t; 2) скорость; 3) начальную координату; 4) направление движения; 5) пройденный путь; 6) время и место встречи.

График скорости: (рис. 1.14).

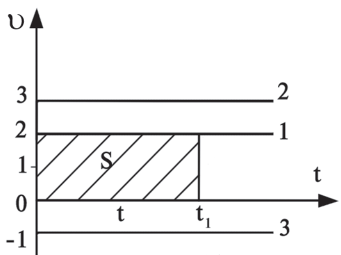


Рис. 1.14

$$\vec{\upsilon} = const; \quad \vec{S} = \vec{\upsilon}t.$$

По графику можно определить:
1) скорость;
2) направление движения;
3) пройденный путь.

Площадь фигуры под графиком численно равна пройденному пути

$$S_x = \upsilon_x t.$$

§ 4. Относительность движения

Кинематические характеристики движения, такие как ***траектория***, ***перемещение***, ***скорость***, в разных системах отсчета различны. Величины, зависящие от выбора системы отсчета, называют ***относительными***.

Пусть имеются две системы отсчета. Система XOY считается неподвижной, а система $X'O'Y'$ движется поступательно по отношению к системе XOY со скоростью $\vec{\upsilon}_0$. Например, система XOY связана с Землей, а система $X'O'Y'$ – с движущейся по рельсам платформой (рис. 1.15).

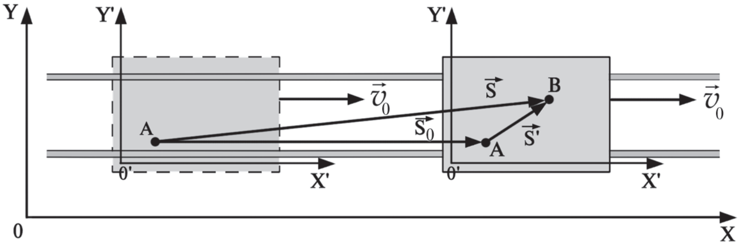


Рис. 1.15

Пусть человек перешел по платформе за некоторое время из точки A в точку B. Тогда его перемещение относительно платформы соответствует вектору $\vec{S}'$, а перемещение платформы относительно Земли соответствует вектору $\vec{S}_0$. Из рис. 1.15 видно, что перемещение человека относительно Земли будет соответствовать вектору $\vec{S}$, представляющему собой сумму векторов $\vec{S}_0$ и $\vec{S}'$

$\vec{S} = \vec{S}_0 + \vec{S}'.$

В случае, когда одна из систем отсчета движется относительно другой ***поступательно*** (как на рис. 1.15.) с постоянной скоростью $\vec{\upsilon}_0$, это выражение принимает вид: $\vec{S} = \vec{\upsilon}_0 \Delta t + \vec{S}'$.

Разделив обе части этого уравнения на Δt, получим:

$$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_0 + \vec{\upsilon}'.$$

Данное соотношение выражает *классический закон сложения скоростей* (Галилей).

Здесь $\vec{\upsilon}$ – скорость тела в «неподвижной» системе отсчета XOY, $\vec{\upsilon}$ – скорость тела в «движущейся» системе отсчета $X'O'Y'$. Скорости $\vec{\upsilon}$ и $\vec{\upsilon}'$ иногда условно называют абсолютной и относительной скоростями; скорость $\vec{\upsilon}_0$ называют переносной скоростью.

Абсолютная скорость тела $\vec{\upsilon}$ равна векторной сумме его относительной скорости $\vec{\upsilon}'$ и переносной скорости $\vec{\upsilon}_0$ подвижной системы отсчета.

При равномерном и прямолинейном движении систем отсчета друг относительно друга ускорения тела в этих двух системах одинаковы, т.е $\vec{a} = \vec{a}'$.

В общем случае, при движениях систем отсчета с ускорением друг относительно друга, ускорения тела в различных системах отсчета оказываются различными.

Скорость, перемещение и ускорение являются векторными величинами, поэтому действия с ними производятся по правилам сложения (вычитания) векторов с применением «правила параллелограмма» и «теоремы косинусов» (см. § 2).

§ 5. Прямолинейное неравномерное движение

Неравномерным *называется движение, при котором тело за любые равные промежутки времени совершает неодинаковые перемещения.*

Средняя скорость $\upsilon_{ср} = \dfrac{S}{t}$, где

S – все перемещение (путь); t – все время этого перемещения.

Мгновенная скорость – скорость тела в данный момент времени или в данной точке траектории.

Равноускоренное движение – движение тела, при котором его скорость за любые равные промежутки времени изменяется одинаково.

Ускорение – *векторная величина, равная отношению изменения скорости к промежутку времени, в течение которого это изменение произошло.*

Ускорение характеризует быстроту изменения скорости

$$\vec{a} = \frac{\vec{\upsilon} - \vec{\upsilon}_0}{t} = \frac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t}.$$

Единица измерения ускорения: 1 м/с^2 – это ускорение такого движения, при котором за 1 секунду скорость тела изменяется на 1 м/с.

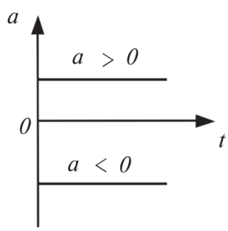


Рис. 1.16

График ускорения равноускоренного движения (a>0, a = *const*) (рис. 1.16).

График ускорения равнозамедленного движения (a<0, a = *const*).

При увеличении скорости, $\vec{a}$ по направлению совпадает с $\vec{\upsilon}$, при уменьшении – противоположно.

Графики скорости равнопеременного движения:

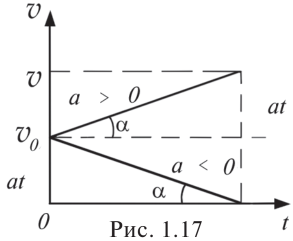


Рис. 1.17

График скорости равноускоренного движения a>0 (рис.1.17).

$$\upsilon = \upsilon_0 + at.$$

График скорости равнозамедленного движения a<0

$$\upsilon = \upsilon_0 - at.$$

$tg\alpha = \frac{at}{t} = a$ – чем больше ускорение, тем больше угол наклона.

По графику скорости можно найти:

1) скорость $\vec{\upsilon}$ в любой момент времени t, 2) ускорение $\vec{a}$,

3) перемещение $\vec{S}$, 4) направление скорости $\vec{\upsilon}$ и ускорения $\vec{a}$.

Уравнение движения (равноускоренного движения).

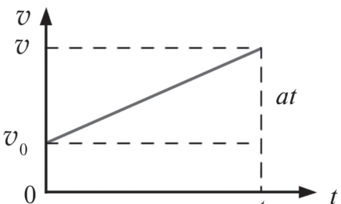


Рис. 1.18

Площадь фигуры под графиком (площадь прямоугольника + площадь треугольника) численно равна перемещению S (пути) (рис. 1.18).

Формула перемещения:

$$S = \upsilon_0 t + \frac{at^2}{2};$$

$x = x_0 + S_x \Rightarrow x = x_0 + \upsilon_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ – уравнение движения.

Графики пути:

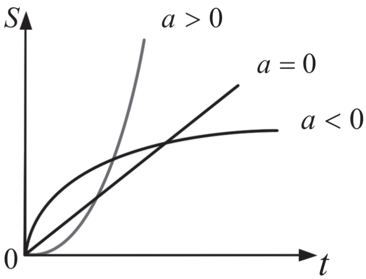


Рис. 1.19

График пути равноускоренного движения $a > 0$; $S = \upsilon_0 t + \frac{at^2}{2}$.

График пути равномерного движения $a = 0$; $S = \upsilon t$.

График пути равнозамедленного движения $a < 0$; $S = \upsilon_0 t - \frac{at^2}{2}$.

Связь перемещения и скорости движения: $S = \frac{\upsilon^2 - \upsilon_0^2}{2a}$.

Путь, пройденный за n-ю секунду при ускоренном движении определяется по формулам, приведенным в таблице.

Из таблицы видна закономерность: $S_1 : S_2 : S_3 : S_4 : = 1:3:5:7:...(2k+1)$, то есть – пути относятся как ряд нечетных чисел. Эта закономерность справедлива для любых равных промежутков времени при равноускоренном движении.

$S_n = \frac{a}{2}[n^2 - (n-1)^2]$	Путь пройденный за n-ю секунду.
$S_1 = \frac{a}{2}(1-0) = \frac{a}{2} \cdot 1$	Путь пройденный за 1-ю секунду.
$S_2 = \frac{a}{2}(2^2 - 1) = \frac{a}{2} \cdot 3$	Путь пройденный за 2-ю секунду.
$S_3 = \frac{a}{2}(3^2 - 2^2) = \frac{a}{2} \cdot 5$	Путь пройденный за 3-ю секунду.

Основные формулы равнопеременного движения:

$a > 0$		$a < 0$
$\upsilon_0 \neq 0$	$\upsilon_0 = 0$	$\upsilon_0 \neq 0$
$\upsilon_0 = \upsilon + at$	$\upsilon = at$	$\upsilon = \upsilon_0 - at$
$S = \upsilon_0 t + \frac{at^2}{2}$	$S = \frac{at^2}{2}$	$S = \upsilon_0 t - \frac{at^2}{2}$
$x = x_0 + \upsilon_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$	$x = x_0 + \frac{a_x t^2}{2}$	$x = x_0 + \upsilon_{0x} t - \frac{a_x t^2}{2}$
$2aS = \upsilon^2 - \upsilon_0^2$	$2aS = \upsilon^2$	$-2aS = \upsilon_0^2 - \upsilon^2$.

§ 6. Свободное падение тел

Свободным падением *называют падение тел в вакууме.*

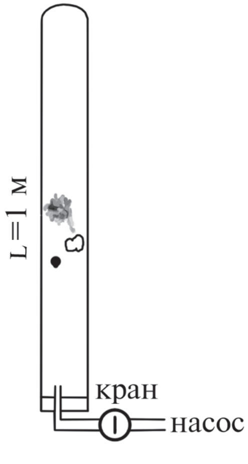


Рис. 1.20

Свободное падение – это движение под действием силы тяжести.

В конце XVI века Галилео Галилей изучил свободное падение. Он на опыте установил, что:

1) в вакууме ускорение для всех тел одинаково, $g = \text{const}$;

2) $g \approx 9{,}8$ м/с^2;

3) $\vec{g}$ направлено вертикально вниз;

4) свободное падение, это равноускоренное движение.

Свободное падение – это падение «свободное» от сопротивления воздуха, т.е. в вакууме (*рис.* 1.20).

Реально имеется сопротивление среды, и тела разной массы и объема упадут не одновременно.

От чего зависит значение g ?:

1) от географической широты ($g_{полюс} > g_{экватор}$. На широте города Севр g = 9,80665 м/с^2);

2) от высоты Н над Землей (g уменьшается с ростом Н);

3) от плотности Земли;

4) от планеты (на разных планетах g различно).

Движение тела, брошенного вертикально вверх (вниз):

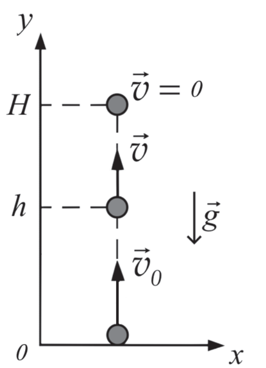


Рис. 1.21
Движение вверх

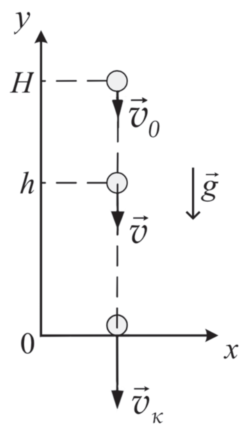


Рис. 1.22
Движение вниз

Основные формулы движения тела, брошенного вертикально вверх (вниз):

Вниз		Верх
$\upsilon_0 \neq 0$	$\upsilon_0 = 0$	$\upsilon_0 \neq 0$
$\upsilon = \upsilon_0 + gt$	$\upsilon = gt$	$\upsilon = \upsilon_0 - gt$
$H = \upsilon_0 t + \frac{gt^2}{2}$	$H = \frac{gt^2}{2}$	$H = \upsilon_0 t - \frac{gt^2}{2}$
$y = y_0 + \upsilon_{0y} t + \frac{gt^2}{2}$	$y = y_0 + \frac{gt^2}{2}$	$y = y_0 + \upsilon_{0y} t - \frac{gt^2}{2}$
$2gH = \upsilon^2 - \upsilon_0^2$	$2gH = \upsilon^2$	$2gH = \upsilon_0^2 - \upsilon^2$

Под действием силы тяжести тела движутся равноускоренно. Ускорение падающих вблизи поверхности Земли тел постоянно g = 9,80665 м/с^2 и направлено вертикально вниз. Траектория движения − вертикальная прямая (рис. 1.21 и 1.22).

Проекции векторов $\vec{v}$ и $\vec{g}$ на ось y положительны, если совпадают с направлением оси y и отрицательны, если противоположно направлены y.

Учитывая, что $a = g$ и $S = H$, получим основные формулы движения тела, брошенного вертикально вверх (вниз). (См. таб. стр. 15).

§ 7. Криволинейное движение

Криволинейное движение − движение, при котором траектория − кривая линия. Криволинейное движение это движение по дугам окружностей (рис 1.23).

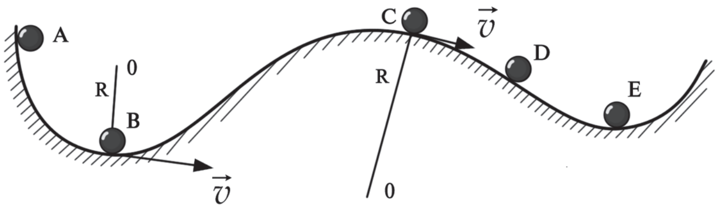


Рис. 1.23

Мгновенная скорость тела в любой точке криволинейной траектории направлена по касательной к траектории в этой точке.

Мгновенная скорость есть предел, к которому стремится средняя скорость тела, когда промежуток времени стремится к нулю (рис.1.24)

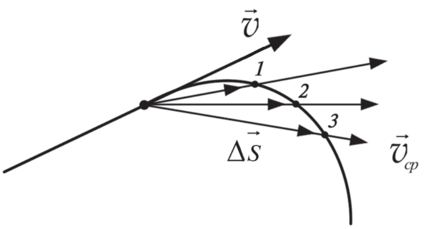


Рис. 1.24

$$\upsilon = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta S}{\Delta t}.$$

Заданная таким образом скорость совпадает с математическим определением первой производной. Следовательно, скорость есть первая производная пути по времени: $\upsilon = \dfrac{dS}{dt} = S'$.

Криволинейное движение − движение с ускорением. В случаях, когда скорость по модулю постоянна, она все равно изменяется, т. к. меняется направление вектора скорости.

Вывод формулы центростремительного ускорения.

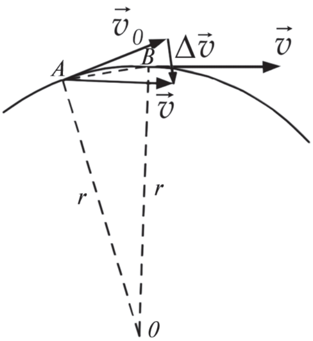


Рис. 1.25

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

$\vec{a}$ совпадает по направлению с $\overrightarrow{\Delta v}$ и направлено к центру закругления. Треугольники, построенные на векторах скоростей ($\vec{v}_0$, $\vec{v}$, $\overrightarrow{\Delta v}$) и на радиусах (ОАВ), подобны (рис.1.25).

Из подобия составим отношение:

$$\frac{\Delta v}{AB} = \frac{v}{r} \Rightarrow \quad \frac{\Delta v}{v\Delta t} = \frac{v}{r} \Rightarrow \quad \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2}{r} \Rightarrow$$

$a_n = \dfrac{v^2}{r}$ – центростремительное ускорение.

§ 8. Ускорение и его составляющие. Классификация движений

Движение может быть с переменным ускорением $a \neq const$.

Мгновенным ускорением тела в момент времени t будет предел среднего ускорения

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

Ускорение $\vec{a}$ есть векторная величина, равная первой производной скорости по времени.

Ускорение можно представить в виде геометрической суммы двух составляющих:

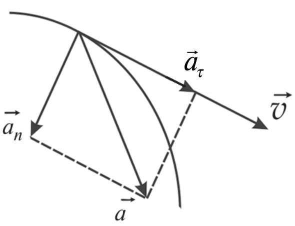


Рис. 1.26

$\vec{a}_\tau$ – тангенциальная составляющая,

$\vec{a}_n$ – нормальная составляющая (рис.1.26).

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n \Rightarrow \ a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}.$$

$\vec{a}_\tau$ – направлена по касательной к траектории, совпадает с направлением скорости $\vec{v}$ и определяет быстроту изменения скорости *по модулю.*

$\vec{a}_n$ – направлена к центру кривизны траектории, является центростремительным ускорением и характеризует изменение скорости *по направлению.*

Классификация движения *с учетом тангенциальной и нормальной составляющих ускорения:*

1) $a_\tau = 0$, $a_n = 0$ – прямолинейное равномерное движение;
2) $a_\tau = a = const$, $a_n = 0$ – прямолинейное равнопеременное движение;
3) $a_\tau = f(t)$, $a_n = 0$ – прямолинейное движение с переменным ускорением;
4) $a_\tau = 0$, $a_n = const$ – равномерное движение по окружности;
5) $a_\tau = 0$, $a_n = f(t)$ – равномерное криволинейное движение;
6) $a_\tau = const$, $a_n \neq 0$ – криволинейное равнопеременное движение;
7) $a_\tau = f(t)$, $a_n \neq 0$ – криволинейное движение с переменным ускорением.

§ 9. Движение тела, брошенного горизонтально

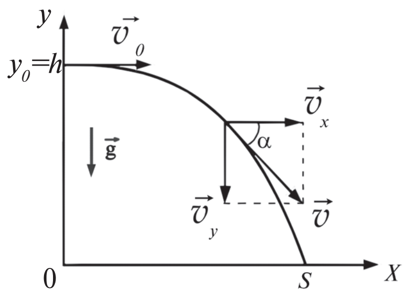


Рис. 1.27

Тело участвует в двух движениях:

1) вдоль оси x равномерное движение;

2) вдоль оси y – свободное падение.

Траектория движения – парабола. Скорость направлена по касательной к траектории в каждой точке. $\upsilon = \sqrt{\upsilon_x^2 + \upsilon_y^2}$, т.к. $\upsilon_y = gt$, $\upsilon_x = \upsilon_0$, то

$$\upsilon = \sqrt{\upsilon_0^2 + g^2 t^2}.$$

Уравнение траектории: подставив $t = \dfrac{x}{\upsilon_0}$ в $y = \dfrac{gt^2}{2}$, получим

$y = \dfrac{gx^2}{2\upsilon_0^2}$ – уравнение траектории. Квадратичная зависимость *y(x)* указывает, что траектория – парабола.

Угол наклона α скорости к горизонту: $tg\alpha = \dfrac{\upsilon_y}{\upsilon_x} = \dfrac{gt}{\upsilon_0}$.

Время полета: $h = \dfrac{gt^2}{2} \Rightarrow t = \sqrt{\dfrac{2h}{g}}$.

Дальность полета: $S = x = \upsilon_x t = \upsilon_0 \sqrt{\dfrac{2h}{g}}$.

§ 10. Движение тела, брошенного под углом к горизонту

Движение сложное, тело участвует в двух движениях:

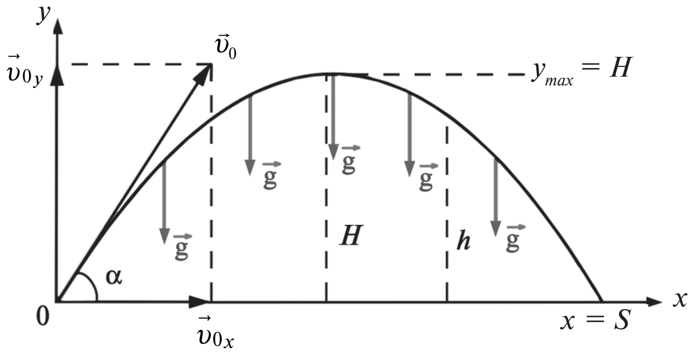


Рис. 1.28

1) вдоль оси x – равномерное движение;
2) вдоль оси y – движение тела, брошенного вертикально вверх;
Траектория движения – парабола (рис.1.28).

В момент бросания $t = 0$: $\begin{cases} v_{0x} = v_0 \cos\alpha, \\ v_{0y} = v_0 \sin\alpha. \end{cases}$

В любой момент времени t: $\begin{cases} v_x = v_{0x} = v_0 \cos\alpha, \\ v_y = v_{0y} - gt = v_0 \sin\alpha - gt, \end{cases}$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}.$$

Дальность полета: $S = x = v_x t = v_0 t \cos\alpha.$

Высота полета: $h = y = v_0 t \sin\alpha - \dfrac{gt^2}{2}.$

Найдем время всего полета:

В верхней точке траектории $v_y = 0$; $0 = v_{0y} - gt'$; $gt' = v_0 \sin\alpha$;

$t' = \dfrac{v_0 \sin\alpha}{g}$; $t' = \dfrac{t}{2}$, где t' – время движения вверх (или вниз), таким образом:

время полета: $t = \dfrac{2v_0 \sin\alpha}{g}$;

дальность полета: $S = v_0 t \cos\alpha = \dfrac{v_0 \cos\alpha 2v_0 \sin\alpha}{g} = \dfrac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$;

высота подъема: $H = \dfrac{\upsilon_{0y}^2}{2g} = \dfrac{(\upsilon_0 \sin\alpha)^2}{2g} = \dfrac{\upsilon_0^2 \sin^2\alpha}{2g}$.

Уравнение траектории y(x):

Составим уравнение траектории *y(x)* тела, брошенного под углом к горизонту, решая совместно уравнения *x(t)* и *y(t)*:

$$\begin{cases} x = \upsilon_0 t \cos\alpha, \\ y = \upsilon_0 t \sin\alpha - \dfrac{gt^2}{2}, \end{cases}$$

исключая $t = \dfrac{x}{\upsilon_0 \cos\alpha}$, получим уравнение траектории:

$$y = xtg\alpha - \frac{g}{2\upsilon_0^2 \cos^2\alpha} x^2.$$

Квадратичная зависимость *y (x)* показывает, что траекторией является парабола, знак минус перед x^2 – что ветви ее направлены вниз.

Радиус кривизны траектории:

Выведем формулу радиуса кривизны траектории для произвольной точки. Тело имеет ускорение $\vec{g}$, направленное вертикально вниз. Разобьем его на составляющие $\vec{a}_n$ и $\vec{a}_\tau$.

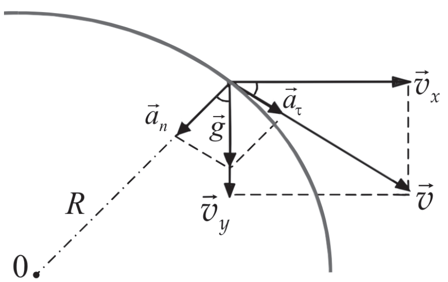


Рис. 1.29

Скорость в данной точке, направленную по касательной также геометрически разложим на составляющие $\vec{\upsilon}_x$ и $\vec{\upsilon}_y$ (рис. 1.29).

Треугольники, построенные на векторах ускорений и на векторах скоростей, подобны.

Из подобия составим отношение:

$\dfrac{a_n}{g} = \dfrac{\upsilon_x}{\upsilon}$; так как $a_n = \dfrac{\upsilon^2}{R}$, то получим $\dfrac{\upsilon^2}{Rg} = \dfrac{\upsilon_x}{\upsilon}$,

решим уравнение относительно *R*: $R = \dfrac{\upsilon^3}{\upsilon_x g}$.

В верхней точке траектории $\upsilon = \upsilon_x$, поэтому радиус кривизны в верхней точке равен: $R = \dfrac{\upsilon_x^2}{g}$.

§ 11. Движение по окружности

Основные величины и формулы

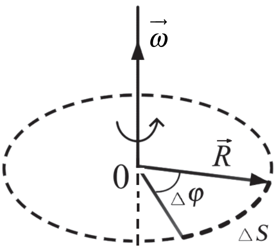


Рис. 1.30

Углом поворота радиуса-вектора называется физическая величина, измеряемая отношением длины дуги ΔS, пройденной вращающейся точкой к радиусу *R*. $\Delta\varphi = \dfrac{\Delta S}{R}$ (рис. 1.30).

φ измеряется в радианах – за 1 рад принимается такой центральный угол, длина дуги которого равняется *R*.

Полный угол $\varphi_0 = \dfrac{2\pi R}{R} = 2\pi$ или $\varphi_0 = 360°$, поэтому $1 рад = \dfrac{360°}{2\pi} \approx 57,3°$.

Угловая скорость *– это величина, равная углу поворота радиуса-вектора за единицу времени:* $\omega = \dfrac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ (или $\omega = \dfrac{d\varphi}{dt}$).

Угловая скорость это псевдовектор (направление зависит от направления вращения). Направление вектора угловой скорости задается правилом буравчика: вектор угловой скорости совпадает по направлению с поступательным движением острия буравчика, рукоятка которого вращается в направлении движения точки по окружности (рис. 1.30).

Угловая скорость измеряется в $\dfrac{град}{с}, \dfrac{рад}{с}, \dfrac{\pi}{с}$.

Периодом *называется время одного полного оборота T* (с).
Частотой *называется число оборотов в единицу времени* ν (*Гц*).

Если за время *t* тело совершает *N* оборотов, то $T = \dfrac{t}{N}$, а $\nu = \dfrac{N}{t}$.

Связь периода и частоты: $T = \dfrac{1}{\nu}$, $\nu = \dfrac{1}{T}$, $1 Гц = \dfrac{1}{с}$.

Циклическая или круговая частота ω:

Пусть тело совершило один полный оборот, тогда $\varphi = 2\pi$, $t = T$; подставим это в формулу угловой скорости $\omega = \dfrac{\varphi}{t} = \dfrac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$.

Линейная скорость: $\upsilon = \dfrac{\Delta S}{t} = \dfrac{2\pi R}{T} = 2\pi R\nu = \omega R$.

Связь линейной и угловой скоростей: $\upsilon = \omega R$.

Связь ускорения и угловой скорости:

$$\alpha_n = \frac{\upsilon^2}{R} = \frac{\omega^2 R^2}{R} = \omega^2 R \quad \text{или} \quad \alpha_n = \frac{\upsilon^2}{R} = \frac{\upsilon\omega R}{R} = \upsilon\omega.$$

Угловым ускорением *называется векторная величина, равная первой производной угловой скорости по времени:* $\varepsilon = \dfrac{d\omega}{dt}$.

Из этой формулы следует, что вектор углового ускорения направлен по оси вращения в сторону вектора элементарного приращения угловой скорости.

При ускоренном движении вектор ε параллелен вектору ω (рис. 1.31), при замедленном – антипараллелен (рис. 1.32).

Тангенциальная составляющая линейного ускорения

$$a_\tau = \frac{d\upsilon}{dt}, \quad \upsilon = \omega R \quad \text{и} \quad a_\tau = \frac{d(\omega R)}{dt} = R\frac{d\omega}{dt} = R\varepsilon.$$

Нормальная составляющая ускорения

$$a_n = \frac{\upsilon^2}{R} = \frac{\omega^2 R^2}{R} = \omega^2 R.$$

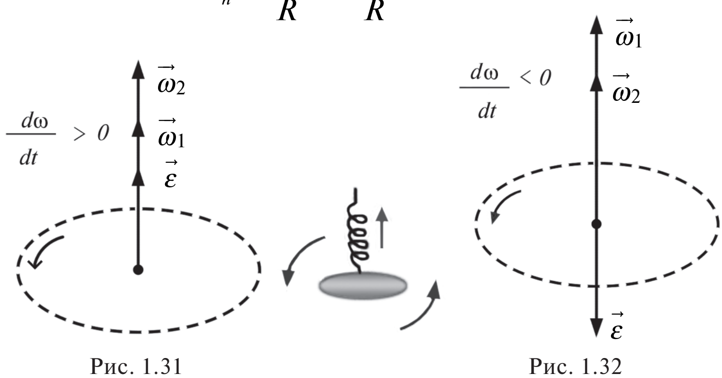


Рис. 1.31 Рис. 1.32

Таким образом, связь между *линейными* (длина пути S, пройденного точкой по дуге окружности радиуса R, линейная скорость υ, тангенциальное ускорение a_τ, нормальное ускорение a_n) и *угловыми* величинами (угол поворота φ, угловая скорость ω, угловое ускорение ε) выражается следующими формулами:

$$S = R\varphi, \quad \upsilon = R\omega, \quad a_\tau = R\varepsilon, \quad a_n = \omega^2 R.$$

В случае равнопеременного движения точки по окружности

$$\varepsilon = const.$$

Так как $d\omega = \varepsilon dt$, то $\omega = \omega_0 + \varepsilon t$,

где ω_0 — начальная угловая скорость.

Уравнение движения вращающегося тела: $\varphi = \omega_0 t + \dfrac{\varepsilon t^2}{2}$

(Так как $d\varphi = \omega dt$, то $\varphi = \int_0^t \omega dt = \int_0^t (\omega_0 + \varepsilon t)dt$ и $\varphi = \omega_0 t + \dfrac{\varepsilon t^2}{2}$).

Совместное движение нескольких окружностей.

На одной оси:

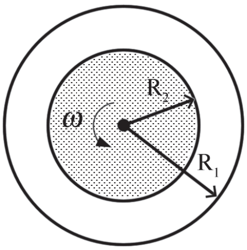


Рис. 1.33

Если две (и более) вращающиеся окружности (шкивы, блоки) имеют одну ось (один вал), то их угловые скорости одинаковые (рис. 1.33).

$$\omega_1 = \omega_2 \Rightarrow \quad \frac{\upsilon_1}{R_1} = \frac{\upsilon_2}{R_2} \Rightarrow \quad \frac{R_2}{R_1} = \frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}.$$

Линейные скорости прямо пропорциональны радиусам.

Ременная передача:

Если две окружности вращаются на одном ремне (или цепи), то линейные скорости одинаковые $\upsilon_1 = \upsilon_2$ (рис. 1.34, 1.35).

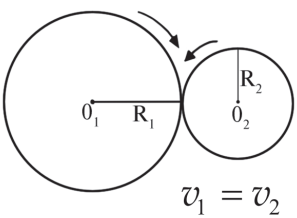


Рис. 1.34

Фрикционное сцепление

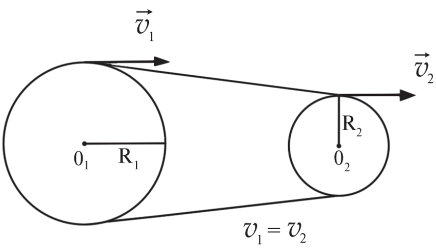


Рис. 1.35

Ременная передача

$$\omega_1 R_1 = \omega_2 R_2; \quad \Rightarrow \quad \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Угловые скорости обратно пропорциональны радиусам.

Зубчатая передача:

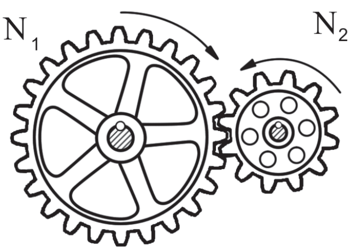


Рис. 1.36

Пусть N_1, N_2 – число зубцов на первой и второй шестернях (рис. 1.36).

Расстояние между зубцами обеих шестерен равны $d_1 = d_2$.

Так как $d_1 = \dfrac{2\pi R_1}{N_1}$ и $d_2 = \dfrac{2\pi R_2}{N_2}$,

то $$\frac{2\pi R_1}{N_1} = \frac{2\pi R_2}{N_2},$$

отсюда $\dfrac{N_2}{N_1} = \dfrac{R_2}{R_1}$. При зубчатой передаче $\upsilon_1 = \upsilon_2$ справедливы те же соотношения, что и при ременной передаче, поэтому

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{N_2}{N_1}.$$

Угловые скорости обратно пропорциональны числу зубцов.

Вопросы и задания

1. *Сформулируйте основные понятия кинематики (механическое движение, поступательное движение, материальная точка, система отсчета, перемещение).*
2. *Может ли перемещение быть: больше, меньше или равным пройденному пути? Быть равным нулю, если пройденный путь не равен нулю?*
3. *Как определяется численное значение результирующего вектора суммы (разности) векторов?*
4. *Какое движение называется прямолинейным равномерным (скорость, уравнение движения, график движения, график скорости)?*
5. *Какое движение называется прямолинейным неравномерным (средняя скорость, мгновенная скорость, ускорение, уравнение движения)?*
6. *Как относятся пути, пройденные в равные промежутки времени при свободном падении?*
7. *Как найти время, дальность и высоту полета тела, брошенного под углом к горизонту?*
8. *Дайте определения основных понятий, характеризующих движение тела по окружности (угол поворота, угловая скорость, линейная скорость, период, частота, циклическая частота).*

9. Приведите соотношения между периодом и частотой, частотой и циклической частой, линейной и угловой скоростями.

10. Приведите соотношения линейных и угловых скоростей при движении окружностей: на одной оси, на одном ремне и при зубчатой передаче.

11. Движения двух тел заданы уравнениями $x_1 = 8 + t^2$, $x_2 = 6t$. Описать движение каждого тела. Найти время и место встречи.

12. Движение тела задано уравнениями $x = 1 + 4t$, $y = 10–3t$. Найти скорость и вывести уравнение траектории.

Тестовые задания

1. (99/8-1). Воздушный шар поднимается относительно Земли на какую-то высоту и одновременно относится ветром на расстояние 600 м в горизонтальном направлении. Каков путь (в метрах), пройденный шаром, если его перемещение 1 км? Движение считать прямолинейным.

A) 600. B) 800. C) 1400. D)1000. E) 1600.

2. (03/1-16). Мяч падал на землю с высоты 3 м и был пойман после отскока на высоте 70 см. Определите путь и перемещение мяча.

A) 3,07 м; 2,03 м. B) 3 м; 70 см. C) 3,7 м; 0,7 м.
D) 3 м; 2,3 м. E) 3,7 м; 2,3 м.

3. (00/7-9). Определите скорость поезда (в м/с) длиной 120 м, который за 6 с обгоняет велосипедиста, движущегося со скоростью 9 км/ч параллельно поезду.

A) 20. B) 22. C) 25. D) 22,5. E) 24.

4. (00/5-9). В какой момент времени встретятся материальные точки, если их уравнения движения имеют вид $x_1=0{,}6+4t$ и $x_2=0{,}5+0{,}4t$?

A) 4. B) 5. C) 6. D) 9. E) они не встретятся.

5. (04/9-3). Из Ташкента в сторону Самарканда с интервалом 10 мин вышли два поезда со скоростью 63 км/ч. Какую скорость (в м/с) имел встречный поезд, если он повстречал эти поезда через 5 мин один после другого?

A) 18,5. B) 16. C) 16,5. D) 17,5. E) 18.

6. (99/8-5). Тело одновременно участвует в двух равномерных движениях. Скорость каждого движения равна 3 м/с. Угол между векторами скоростей этих движений равен 60°. Чему равна результирующая скорость движения (в м/с)?

A) $3\sqrt{3}$. B) 6. C) 1,5. D) 3. E) 0.

7. (00/2-14). Скорости двух составляющих движений, направленных под углом 45° друг к другу, равны 4 и 6 м/с. Определите скорость результирующего движения (в м/с).

A) 7,7. B) 9,3. C) 8,7. D) 12,8. E) 14.

8. (00/5-69). Эскалатор метро поднимает вверх человека за 45 с. Если эскалатор и человек движутся одновременно, то он поднимается за 15 с. За сколько секунд поднимается человек по неподвижному эскалатору?

A) 30. B) 22,5. C) 60. D) 15,5. E) 25.

9. (04/9-8). Уравнение движения тела имеет вид $s=30\,t-0{,}2\,t^2$(м). В какой момент времени (в секундах) остановится тело?

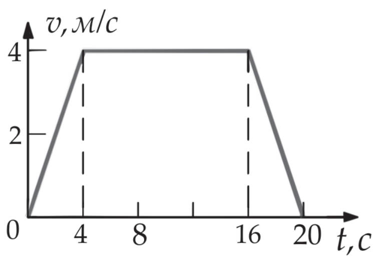
A) 6. B) 30. C) 50. D) 60. E) 75.

10. (02/11-9). По двум путям движутся в одну сторону товарный поезд длиной 360 м со скоростью 54 км/ч и пассажирский поезд длиной 140 м со скоростью 90 км/ч. За сколько секунд второй поезд обгонит первого?

A) 50. B) 22. C) 15. D) 12,5 E) 10.

11. (04/9-6). Используя график скорости лифта, определите высоту его подъема (в метрах).

A) 70. B) 56. C) 60. D) 64. E) 68.



12. (00/7-11). Машина при подъеме на перевал двигалась со скоростью 15 м/с, а при спуске — со скоростью 20 м/с. Какова средняя скорость машины (в м/с), если спуск в 2 раза длиннее, чем подъем?

A) 15. B) 16. C) 17,5. D) 18. E) 20.

13. (02/8-32). Автомобиль прошел 1/3 часть пути со скоростью υ_1, а остальную часть – со скоростью υ_2=50 км/ч. Чему равна υ_1 (в км/ч), если средняя скорость автомобиля на всем пути равна $\upsilon_{ср}$=37,5 км/ч?

A) 7,5. B) 30. C) 20. D) 27. E) 25.

14. (02/11-2). Два велосипедиста приближаются друг к другу двигаясь: первый равнозамедленно с начальной скоростью 10 м/с,

второй равноускоренно с начальной скоростью 2 м/с. Модули их ускорений одинаковы. Каково первоначальное расстояние между ними (в метрах), если они встретились через 80 с после начала движения?

A) 960. *B) 980.* *C) 1000.* *D) 1080.* *E) 1600.*

15. (98/6-1). Тело, движущееся без начальной скорости, за первую секунду прошло 3 м пути. Найдите путь, пройденный телом за вторую секунду.

A) 3 м. *B) 6 м.* *C) 18 м.* *D) 12 м* *E) 9 м.*

16. (98/4-1). Тело, свободно падающее с некоторой высоты, в конце первой 1/4 части пути имеет скорость v. Какую скорость оно имеет в конце пути?

A) 8v. *B) 4v.* *C) 3v.* *D) 2v.* *E) 1,5v.*

17. (99/7-3). На какой высоте (в метрах) будет тело, падающее свободно без начальной скорости с высоты 35 м, когда его скорость достигнет значения 20 м/с?

A) 20. *B) 25.* *C) 15.* *D) 10.* *E) 5.*

18. (01/9-15). Чему равняется скорость самолета (в м/с), летящего горизонтально на высоте 500 м, если тело, выпавшее из самолёта, достигало земли на расстоянии 1 км?

A) 120. *B) 100.* *C) 150.* *D) 200.* *E) 250.*

19. (04/1-8). Тело, двигаясь под углом 60° к горизонту, поднялось на высоту 300 м. Определите перемещение тела по горизонтали (в метрах).

A) 70. *B) 140.* *C) 173.* *D) 280.* *E) 346.*

20. (2-57). Определите дальность полета тела, брошенного горизонтально с высоты 80 м со скоростью 15 м/с (в метрах).

A) 80. *B) 40.* *C) 45.* *D) 60.* *E) 30.*

21. (01/9-5). Камень, брошенный с вышки горизонтально со скоростью 10 м/с, упал на землю под углом 45°. Определите скорость падения камня (в м/с).

A) 12. *B) 15.* *C) 16.* *D) 20.* *E) 14.*

22. 10(00/8-5). Тело брошено горизонтально с высоты 4 м. Какова скорость тела в момент падения, если дальность его полета 4 м (в м/с)?

A) 10. *B) 8.* *C) 4.* *D) 15.* *E) 20.*

23. (97). Тело брошено горизонтально со скоростью 50 м/с. Найти центростремительное ускорение через 4 с после начала движения тела. g=10 м/с.

A) 10,3 м/с² *B) 16,7 м/с²* *C) 25 м/с²* *D) 33,9 м/с²* *E) 7,8 м/с²*.

24. (97). Под каким углом к горизонту брошено тело, если высота подъема тела 3 м, радиус кривизны траектории в верхней точке 2 м?

A) 45°. *B) 75°.* *C) 60°.* *D) 80°.* *E) 30°.*

25. (99/1-5). Материальная точка при равномерном движении по окружности радиусом 2 м за 3,14 с прошла половину окружности. Определите линейную скорость точки (в м/с).

A) 2. *B) 3,14.* *C) 4.* *D) 6.* *E) 6,28.*

26. (99/8-17). Чему равняется модуль изменения скорости (в м/с) материальной точки, движущейся равномерно по окружности со скоростью 4 м/с в течение 3/4 периода вращения?

A) 0. *B) 1.* *C) 4.* *D)* $4\sqrt{2}$. *E) 12.*

27. (99/8-18). Через ремень передается движение от первого колеса ко второму. Первое колесо совершает 2400 оборотов в минуту. Определите частоту вращения (в $с^{-1}$) второго колеса. Радиусы колес равны соответственно 3 и 6 см.

A) 2. *B) 20.* *C) 10.* *D) 40.* *E) 60.*

28. (99/5-18). Через ремень передается движение от первого колеса ко второму. Угловая скорость второго колеса $100\pi с^{-1}$ Определите число оборотов в минуту первого колеса $R_1=2R_2$

A) 1500 *B) 750.* *C) 500.* *D) 1000.* *E) 10000.*

29. (96/10-4). Тело из состояния покоя двигалось с ускорением a в течении времени t, затем движение продолжалось с ускорением $2a$ в течении времени $2t$, затем в течение времени t тело двигалось с ускорением a. Чему равна средняя скорость движения этого тела?

A) 2 at. *B) 1,5 at.* *C) 3,5 at.* *D) 3 at.* *E) 2,5 at.*

Глава II
ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

§ 12. Основные понятия динамики

Раздел механики, изучающий законы взаимодействия тел, называется динамикой (от греч. dynamis – сила).

Динамика объясняет, при каких условиях тело движется так, а не иначе, когда тело движется равномерно и когда равноускоренно, когда тело движется прямолинейно и когда криволинейно.

Динамика рассматривает действие одних тел на другие как причину, определяющую характер движения тел. Взаимодействием тел принято называть взаимное влияние тел на движение каждого из них.

Сила *F (Н) – векторная физическая величина, характеризующая механическое действие одного тела на другое и являющаяся мерой этого действия.* Измеряется в ньютонах. Задается численным значением, направлением и точкой приложения.

Прибор для измерения силы – динамометр.

Инерция *– явление сохранения скорости движения тела при отсутствии внешних воздействий или при их компенсации.*

Инертность *– свойство тел сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения при отсутствии действия на него других тел.* При действии неуравновешенной системы сил инертность проявляется в том, что тело изменяет свое движение постепенно и тем медленнее, чем больше его масса.

Масса *m (кг) – мера инертности.* При одинаковом воздействии со стороны окружающих тел одно тело может быстро изменять свою скорость, а другое в тех же условиях – значительно медленнее. Второе из этих тел обладает большей инертностью и большей массой.

Инерциальные системы отсчета *– это системы отсчета, относительно которых тела находятся в покое, либо движутся прямолинейно и равномерно, если на них не действуют другие тела или действия других тел скомпенсировано.* В инерциальных системах отсчета характер движения наиболее простой. Инерциальных систем бесчисленное множество, они движутся относительно друг друга прямолинейно и равномерно. Все инерциальные системы отсчета равноправны.

§ 13. Законы Ньютона

Первый закон Ньютона – *Закон инерции.*

Существуют такие системы отсчета, относительно которых тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если на него не действуют другие тела (или действия других тел компенсируются).

Если, $\sum \vec{F} = 0$, то $\vec{\upsilon} = const$ или $\vec{\upsilon} = 0$, $\vec{a} = 0$.

Первый закон Ньютона является законом инерции, так как формулирует условие, при котором тело сохраняет свою скорость или состояние покоя.

Второй закон Ньютона.

Второй закон Ньютона – это фундаментальный закон природы; он является обобщением опытных фактов:

1. Если на тела разной массы подействовать одинаковой силой, то ускорения, приобретаемые телами, оказываются обратно пропорциональны их массам: $\vec{a} \sim \frac{1}{m}$ при $F = const.$

2. Если силами разной величины подействовать на одно и то же тело, то ускорения тела оказываются прямо пропорциональными приложенным силам: $\vec{a} \sim \vec{F}$ при $m = const.$

Обобщая наблюдения, Ньютон сформулировал основной закон динамики:

Сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на сообщаемое этой силой ускорение:

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

Если $\sum \vec{F} \neq 0$, то $\vec{\upsilon} \neq const$, $\vec{a} \neq 0$, значит $\vec{F} = m\vec{a}.$

Если на тело действует сила (или результирующая всех сил не равная нулю), то тело движется ускоренно. Величина этого ускорения пропорциональна действующей силе и обратно пропорциональна массе тела:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

Если на тело одновременно действуют несколько сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_3$, то под силой $\vec{F}$ в формуле, выражающей второй закон Ньютона, понимают равнодействующую всех сил:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3.$$

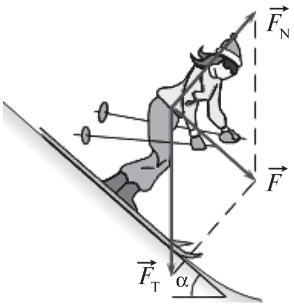


Рис. 2.1

Равнодействующую сил находят по правилам сложения векторов с применением «правила параллелограмма» и «теоремы косинусов» (см. § 2).

Пример: (рис. 2.1).

$\vec{F}_T$ – сила тяжести.

$\vec{F}_N$ – сила реакции опоры.

$\vec{F}$ – равнодействующая, вызывающая ускорение лыжника на гладкой горке.

Третий закон Ньютона.

Силы, с которыми тела действуют друг на друга, всегда равны по модулю и направлены по одной прямой в противоположные стороны:

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

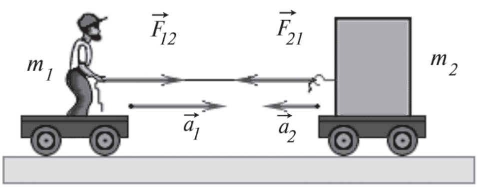


Рис. 2.2

Если два тела взаимодействуют друг с другом, то в результате изменяется скорость обоих тел, оба тела приобретают ускорения.

Отношение ускорений оказывается постоянным при любых воздействиях. (рис. 2.2).

Сообщаемые обоим телам ускорения обратно пропорциональны

массам тел: $\vec{a} = \frac{m_2}{m_1} a_2 \Rightarrow \vec{a}_1 m_2 = -\vec{a}_2 m_2 \Rightarrow \vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$

Знак «минус» означает, что ускорения взаимодействующих тел направлены в противоположные стороны.

Определение массы тела методом взаимодействия с эталоном массы.

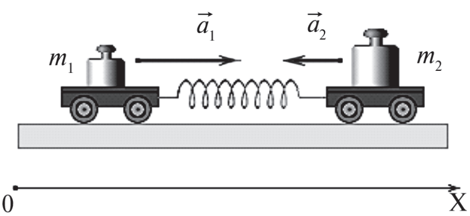


Рис. 2.3

Неизвестную массу тела можно найти, измерив ускорения двух взаимодействующих тел. Масса другого тела (эталон) известна (рис. 2.3).

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_1}{a_2} \Rightarrow m_1 = \frac{a_2}{a_1} m_2.$$

Законы Ньютона неизменны во всех инерциальных системах отсчета и записываются одинаково.

При переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую *время, масса, ускорение* и *сила* остаются неизменными.

Траектория, скорость, перемещение различны в разных инерциальных системах отсчета.

Три закона динамики, сформулированные Ньютоном, лежат в основе классической механики. Выводы классической механики справедливы только при движении тел с малыми скоростями, значительно меньшими скорости света c, то есть $\upsilon \ll c$.

Силы в природе. Фундаментальные, то есть, основные силы в физике: 1. Электромагнитные силы. 2. Гравитационные силы.

В механике все многообразие сил делят на три вида:

1. Силы упругости. 2. Силы трения. 3. Силы тяготения.

Силы упругости и силы трения по природе являются электромагнитными силами. Силы тяготения являются гравитационными.

§ 14. Сила упругости

Все тела «связаны» с другими телами: опоры, подвесы и т.п. Действуя на «связь», тела вызывают ее изгиб, растяжение, сжатие, кручение, то есть деформируют ее.

Деформацией *называется изменение формы и объема тела под действием внешних сил.*

Деформация является *упругой*, если после снятия нагрузки тело полностью восстанавливает первоначальную форму и объем.

Деформация является *пластической (остаточной)*, если после снятия нагрузки тело полностью не восстанавливает первоначальную форму и объем.

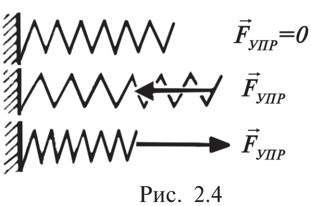


Рис. 2.4

Силы межмолекулярного взаимодействия (притяжения или отталкивания) приводят к возникновению в деформированном теле силы, стремящейся вернуть телу прежние форму и объем.

Эту силу реакции связи называют силой упругости (рис. 2.4).

При упругой деформации сила упругости подчиняется закону Гука.

Закон Гука

Сила упругости пропорциональна абсолютной деформации и направлена противоположно деформирующей силе:

$$F = -kx,$$

где $x(м)$ − абсолютная деформация тела или смещение.

k − коэффициент пропорциональности, жесткость.

Знак «минус» в законе Гука говорит о том, что сила упругости противоположна смещению.

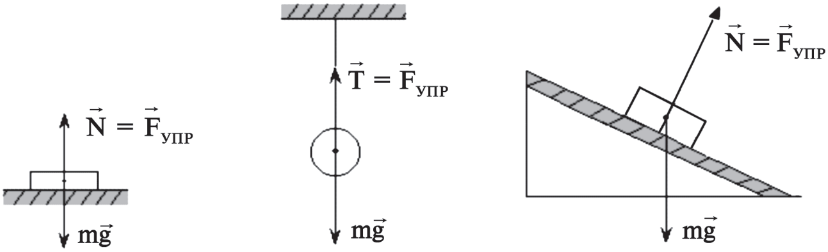


Рис. 2.5

Реакция «связи» или реакция опоры всегда направлена по нормали к поверхности соприкасающихся тел в точке их касания.

Силы реакции опоры $\vec{N}$ и натяжения нити $\vec{T}$ являются силами упругости (рис. 2.5).

Последовательное и параллельное соединение пружин

Последовательное **Параллельное**

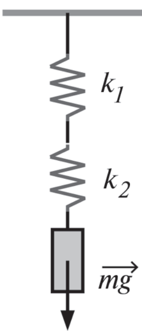


Рис. 2.6 *а*

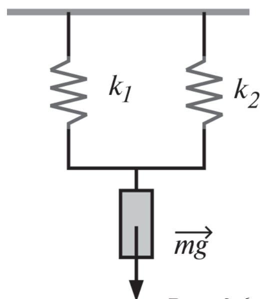


Рис. 2.6 *б*

$$mg = -k_1x_1 \Rightarrow x_1 = -\frac{mg}{k_1};$$

$$mg = -k_2x_2 \Rightarrow x_2 = -\frac{mg}{k_2};$$

$$mg = -kx \qquad x = x_1 + x_2;$$

$$mg = -k(x_1 + x_2);$$

$$mg = k\left(\frac{mg}{k_1} + \frac{mg}{k_2}\right); \qquad \frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2};$$

$$x_1 = x_2 = x;$$

$$mg = F_1 + F_2;$$

$$kx = k_1x + k_2x;$$

$$k = k_1 + k_2.$$

Для измерения сил используют градуированные пружины, называемые динамометрами.

Схематическое изображение динамометра. Сила измеряется по растяжению пружины динамометра (рис. 2.7). При равновесии $\vec{F} = -\vec{F}_{упр}$.

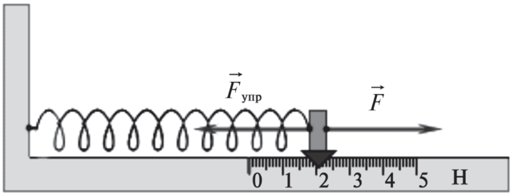


Рис. 2.7

§ 15. Силы трения

Трение – один из видов взаимодействия тел. Оно возникает при соприкосновении двух тел.

Трение, как и все другие виды взаимодействия, подчиняется третьему закону Ньютона.

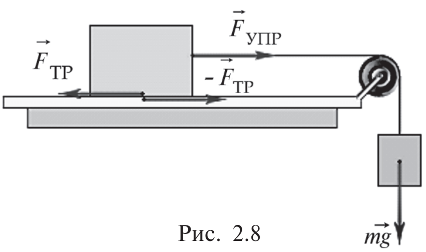


Рис. 2.8

Если на одно из тел действует сила трения, то такая же по модулю, но направленная в противоположную сторону сила действует и на второе тело.

Сила трения направлена в сторону, противоположную движению (рис. 2.8).

Причины трения:

1) шероховатость поверхности;

2) силы взаимодействия между молекулами.

Силами сухого трения называют силы, возникающие при соприкосновении двух твердых тел при отсутствии между ними жидкой или газообразной прослойки.

Трение покоя – трение, возникающее между неподвижными относительно друг друга поверхностями. Сила трения покоя всегда равна по модулю и направлена противоположно силе, приложенной к телу параллельно поверхности соприкосновения (рис. 2.9).

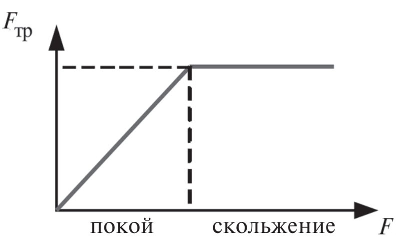


Рис. 2.9

Увеличивая приложенную силу, увеличиваем силу трения, пока тело не начинает скользить. При равномерном движении приложенная *сила равна силе трения скольжения*, а сила трения скольжения равна максимальной силе трения покоя.

$$F_{ТР\,(СКОЛЬЖ)} = F_{ТРmax\,(ПОКОЯ)}.$$

При скольжении сила трения направлена по касательной к соприкасающимся поверхностям в сторону, противоположную относительной скорости движения (рис. 2.10).

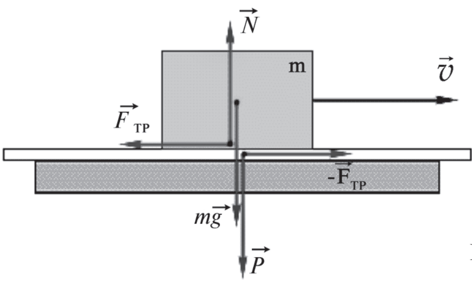


Рис. 2.10

$\vec{N}$ – сила реакции опоры,

$\vec{P}$ – вес тела, $\vec{P} = -\vec{N}$.

$F_{TP} = \mu N$ – сила трения при скольжении.

Сила трения зависит от N – силы реакции опоры (равной силе нормального давления) и от μ – коэффициента трения трущихся поверхностей. Коэффициент трения μ – безразмерная величина, (всегда $\mu < 1$).

Коэффициент трения зависит от материалов соприкасающихся тел и от качества обработки поверхностей.

Трение качения меньше трения скольжения (в 100–200 раз), поэтому для уменьшения трения применяют шариковые и роликовые подшипники.

Также для уменьшения трения применяют смазку, так как трение в слое жидкости значительно меньше сухого трения.

Примеры нахождения силы трения: (рис. 2.11).

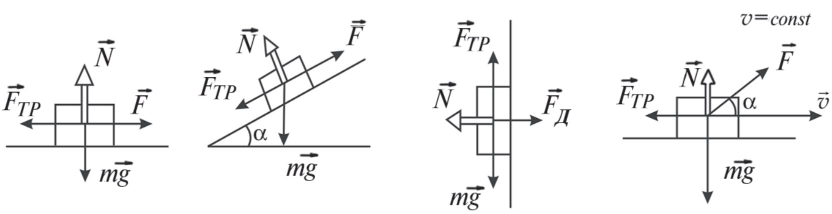


Рис. 2.11

$F_{TP} = \mu mg$	$N = mg\cos\alpha$ $F_{TR} = \mu mg\cos\alpha$	$F_{TR} = \mu F_Д$	$N = mg - F\sin\alpha$ $F_{TR} = \mu\,(mg - F\sin\alpha)$

Рассмотрим примеры, когда сила трения «якобы» совпадает с направлением движения:

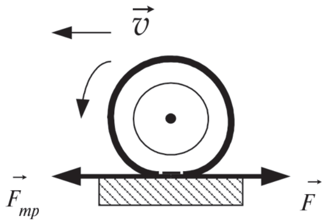


Рис. 2.12

Пример 1 (рис. 2.12).

По рисунку видно, что сила трения $F_{тр}$ совпадает с направлением движения автомобиля, но противоположна движению колеса.

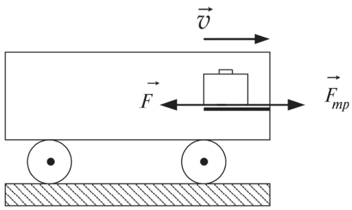


Рис. 2.13

Пример 2 (рис. 2.13).

Чемодан на полке ускоренно движущегося вагона. Чемодан не падает, удерживаемый силой трения. $F_{тр}$ совпадает с направлением движения вагона и противоположна движению чемодана.

$F = ma$ − сила инерции.

Сила вязкого трения возникает при движении твердого тела в *жидкости или газе*. Сила вязкого трения значительно меньше силы сухого трения. Она также направлена в сторону, противоположную относительной скорости тела. *При вязком трении нет трения покоя.*

При движении тела в жидкости или газе кроме силы вязкого трения возникает сила сопротивления среды, вызванная разностью давлений на передней и задней частях движущегося тела.

Сила сопротивления среды так же, как и сила вязкого трения играет тормозящую роль (направлена противоположно движению), поэтому обе силы рассматриваются в динамике совместно и называются $F_{сопр}$ или $F_{ТР}$.

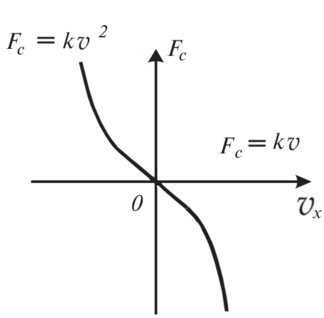


Рис. 2.14

При больших скоростях сила сопротивления значительно превосходит силу вязкого трения. При небольших скоростях сила сопротивления растет линейно со скоростью. $F_{сопр} = -kv$ (рис. 2.14).

При больших скоростях линейный закон переходит в квадратичный:

$$F_{сопр} = -kv^2.$$

Коэффициент k зависит от формы, размеров, состояния поверхности движущегося тела и от свойств среды.

§ 16. Сила тяготения

Закон всемирного тяготения (Исаака Ньютона).

Все тела притягиваются друг к другу с силой, пропорциональной произведению масс этих двух тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними (рис. 2.15).

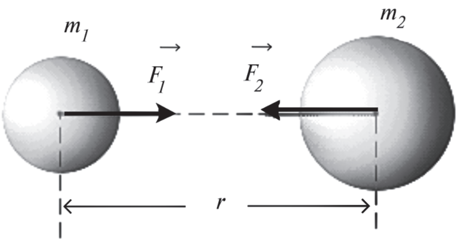


Рис. 2.15

$$F \sim m_1 m_2 \quad \text{и} \quad F \sim \frac{1}{r^2},$$

отсюда $F = \gamma \dfrac{m_1 m_2}{r^2}$.

Гравитационная постоянная:

$$G = \gamma = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{Н \cdot м}{кг^2},$$

Если $m_1 = m_2 = 1$ кг, $r = 1$ *м*, то $F = \gamma = 6{,}67 \cdot 10^{-11} Н$.

Гравитационная постоянная γ показывает, с какой силой ($6.67 \cdot 10^{-11}$ Н) притягиваются два тела массами по 1 кг на расстоянии 1 м.

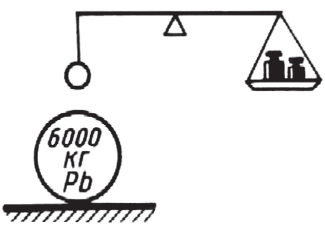


Рис. 2.16

Значение γ впервые определил Кавендиш экспериментально (рис. 2.16). Этот закон справедлив для всех тел во Вселенной.

Взаимодействие осуществляется при помощи гравитационного поля. Оно распространяется в пространстве со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ *м/с*.

Сила тяжести – одно из проявлений силы всемирного тяготения. Если $M_З$ – масса Земли, $R_З$ – ее радиус, m – масса данного тела,

то сила тяжести тела равна: $F = \gamma \dfrac{M_З}{R_З^2} m = gm$,

где g – ускорение свободного падения у поверхности Земли:

$$g = \gamma \frac{M_З}{R_З^2}.$$

Сила тяжести направлена к центру Земли. В отсутствие других сил тело свободно падает на Землю с ускорением свободного падения. Среднее значение ускорения свободного падения для различных точек поверхности Земли равно 9,81 м/с^2.

Определение $\boldsymbol{g}_Л$ – ускорения свободного падения Луны.

Собственное гравитационное поле Луны создает ускорение свободного падения $g_Л$ на ее поверхности. Масса Луны в 81 раз меньше массы Земли, а ее радиус приблизительно в 3,7 раза меньше радиуса Земли. Поэтому ускорение $g_Л$ определится выражением:

$$g_Л = \gamma \frac{M_Л}{R_Л^2} = \gamma \frac{M_З 3,7^2}{T_З^2 81} = 0,17g \approx 1,67\ м/с^2.$$

Вычисление массы Земли $M_З$:

Зная ускорение свободного падения и радиус Земли ($R_З = 6,38 \cdot 10^6$ м), можно вычислить массу Земли $M_З$:

$$M_З = \frac{gR_З^2}{\gamma} = 5,98 \cdot 10^{24}\,кг.$$

При удалении от поверхности Земли сила земного тяготения и ускорение свободного падения изменяются обратно пропорционально квадрату расстояния r до центра Земли.

$$g_h = \frac{R^2}{(R+h)^2} g\text{, где } R + h = r.$$

Рисунок иллюстрирует изменение силы тяготения, действующей на космонавта в космическом корабле при его удалении от Земли (рис. 2.17).

Сила, с которой космонавт притягивается к Земле вблизи ее поверхности, принята равной 700Н.

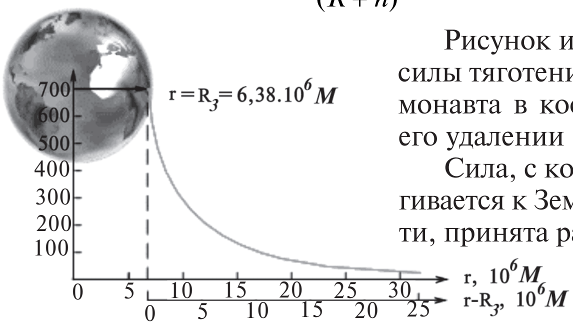


Рис. 2.17

Масса является количественной характеристикой гравитационного взаимодействия $F \sim m_1 m_2$, в этом случае масса называется *гравитационной*. Физическая величина, характеризующая инертность тела, называется *инертной* массой. Из опытов следует, что инертная и гравитационная массы одного и того же тела равны.

§ 17. Искусственные спутники Земли

Если тело с некоторой высоты h бросить горизонтально, то под действием силы тяжести оно упадет на Землю, двигаясь по параболе. Если величину горизонтальной скорости увеличивать, то дальность полета увеличивается (рис. 2.18, 2.19).

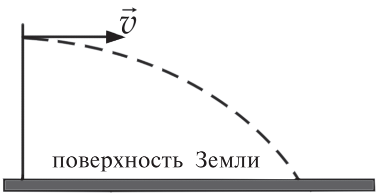


Рис. 2.18

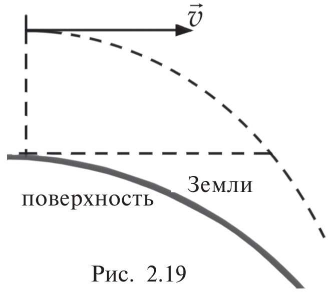


Рис. 2.19

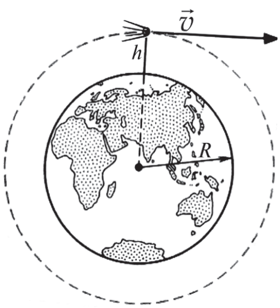


Рис. 2.20

При достаточно большой скорости поверхность Земли уже нельзя считать горизонтальной, так как Земля круглая.

Можно подобрать такую скорость, при которой тело, падая на Землю, никогда на нее не упадет (рис. 2.15). Эта скорость является *первой космической скоростью*.

Тело будет вращаться вокруг Земли, то есть станет ее искусственным спутником.

Вывод формулы ***первой космической скорости:***

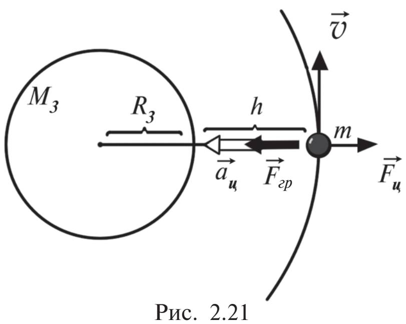


Рис. 2.21

$$F_ц = F_{гр} \Rightarrow \frac{m\upsilon^2}{R+h} = \frac{\gamma m M}{(R+h)^2};$$

$$\upsilon^2 = \gamma \frac{M_З}{(R_З+h)}; \ \upsilon_I = \sqrt{\frac{\gamma M_З}{(R_З+h)}};$$

вблизи Земли $h = 0$;

$$\upsilon_I = \sqrt{\frac{\gamma M_2}{R}} \qquad (1)$$

Эта формула применяется для расчета первой космической скорости на любой планете.

Формула первой космической скорости на околоземной орбите (h=0):

$$mg = \gamma \frac{mM_З}{R_З^2} \Rightarrow \gamma M_З = R_З^2 g. \qquad (2)$$

Подставим (2) в (1) $\rightarrow$ $\upsilon_1 = \sqrt{\frac{gR_З^2}{R_З}} = \sqrt{gR_З}$; υ_1= 7,93 км/с ≈ 8 км/с.

Период вращения спутника: $T = \dfrac{2\pi R}{\upsilon} = \dfrac{2\pi}{\sqrt{\gamma M}} R\sqrt{R}; \quad \Rightarrow T \sim R\sqrt{R}.$

Вторая космическая скорость:

Тело должно обладать кинетической энергией, достаточной для преодоления энергии тяготения Земли.

$$\frac{m\upsilon^2}{2} = \frac{\gamma m M}{R}, \quad \upsilon_{II} = \sqrt{2}\sqrt{\frac{\gamma M}{R}} = \sqrt{2}\cdot\upsilon_1, \quad \upsilon_{II} \approx 11{,}2 \text{ км/с}.$$

Траектория спутника в зависимости от скорости:

$\upsilon = \upsilon_I \approx 8$ км/с – тело является спутником Земли и движется по круговой орбите.

$\upsilon_I < \upsilon < \upsilon_{II}$ – траекторией движения тела является эллипс.

$\upsilon = \upsilon_{II} = 11{,}2$ км/с – тело, двигаясь по параболе, покидает Землю.

$\upsilon > \upsilon_{II}$ – траектория гипербола, тело становится спутником Солнца.

$\upsilon < \upsilon_{III} = 16{,}7$ км/с – покинув Землю, остается спутником Солнца.

$\upsilon \geq \upsilon_{III} = 16{,}7$ км/с – тело покидает Солнечную Систему.

§ 18. Вес тела

Вес		**Сила тяжести**
Вес тела – это сила, с которой тело давит на опору или растягивает подвес.	определение	Силой тяжести называется сила, с которой тела притягиваются к Земле (или к другому небесному телу), вследствие силы тяготения.
$\vec{P}$	обозначение	$m\vec{g}$
Сила упругости	происхождение	Гравитационная сила
Опора или подвес	точка приложения	Центр тяжести тела

Вес тела в разных условиях движения:

1. Опора покоится или движется равномерно.

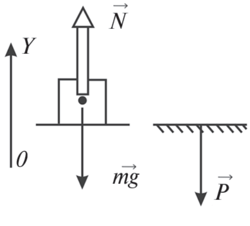


Рис. 2.22

$$P = N \Rightarrow N = mg, \quad P = mg.$$

Вес равен силе тяжести.

2. Опора движется с ускорением, направленным вверх.

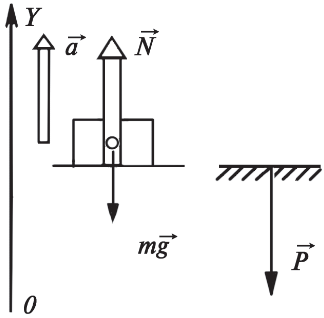


Рис. 2.23

$$ma = N - mg,$$
$$N = m\,(a + g),$$
$$P = m\,(a + g),$$
$$P > mg,$$

Вес больше силы тяжести.

$$n = \frac{P}{mg} \text{ — } \textit{перегрузка.}$$

Перегрузка n — величина, показывающая во сколько раз вес больше силы тяжести.

3. Опора движется с ускорением, направленным вниз.

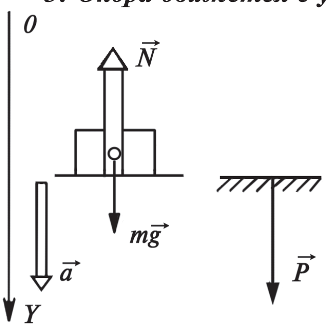


Рис. 2.24

$$ma = mg - N,$$
$$N = m\,(g - a),$$
$$P = m\,(g - a),$$
$$P < mg.$$

Вес меньше силы тяжести.

Если $a = g$,

то $P = 0$ — *невесомость.*

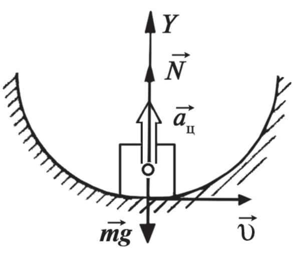
§ 19. Динамика движения по окружности

Для всех приведенных ниже случаев:

$$\vec{F}_R = m\vec{a}_ц, \qquad a_ц = \frac{\upsilon^2}{r}, \qquad ma_ц = \frac{m\upsilon^2}{r},$$

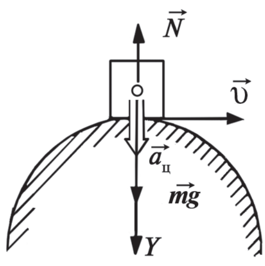
$\vec{F}_R$ — равнодействующая нескольких сил.

Вогнутый и выпуклый мосты



$$\frac{m\upsilon^2}{r} = N - mg,$$

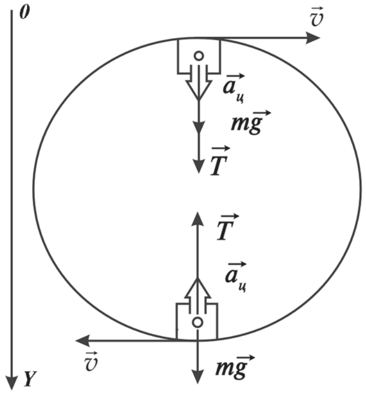
Рис. 2.25



$$\frac{m\upsilon^2}{r} = mg - N.$$

Рис. 2.26

Тело на веревке.

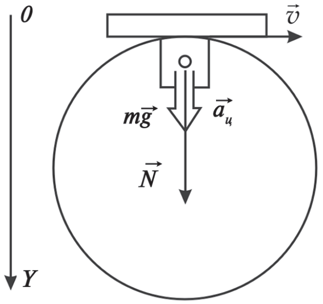


В верхней точке: $\frac{m\upsilon^2}{r} = T + mg.$

В нижней точке: $\frac{m\upsilon^2}{r} = T - mg.$

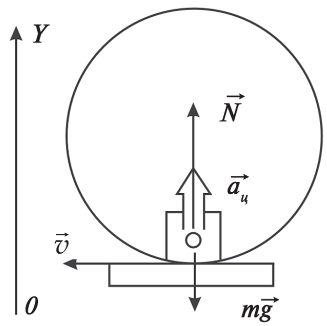
Рис. 2.27

«Мертвая» петля (петля Нестерова).



$$\frac{m\upsilon^2}{r} = N + mg.$$

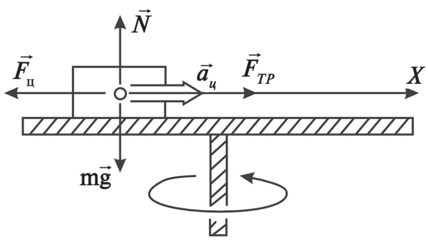
Рис. 2.28



$$\frac{m\upsilon^2}{r} = N - mg.$$

Рис. 2.29

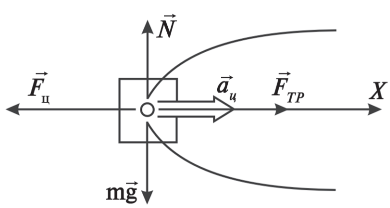
Тело на вращающемся диске.
Конический маятник.



$$\frac{m\upsilon^2}{r} = \mu mg.$$

Рис. 2.30

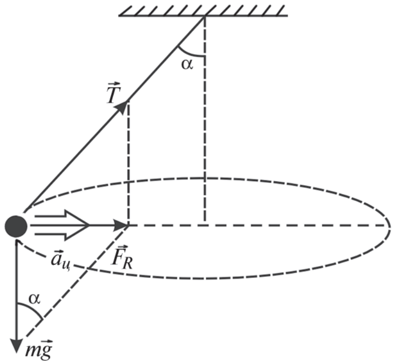
Автомобиль на повороте.
Конькобежец на повороте.



$$\frac{m\upsilon^2}{r} = \mu mg.$$

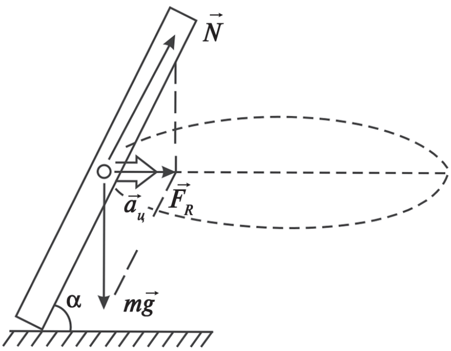
Рис. 2.31

Вагон на повороте. ***Шар во вращающемся конусе.***



$$\frac{m\upsilon^2}{r} = mg \cdot tg\alpha.$$

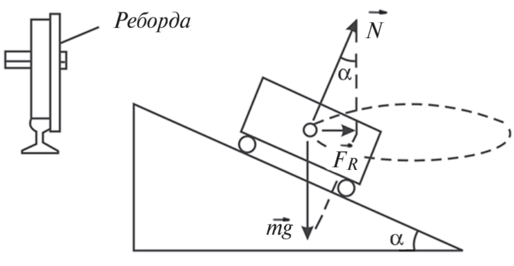
Рис. 2.32



$$\frac{m\upsilon^2}{r} = mg \cdot ctg\alpha.$$

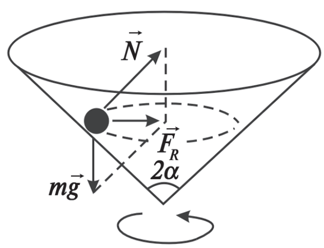
Рис. 2.33

§ 20. Динамика движения тела вдоль наклонной плоскости



$$\frac{m\upsilon^2}{r} = mg \cdot tg\alpha.$$

Рис. 2.34



$$\frac{m\upsilon^2}{r} = mg \cdot ctg\alpha.$$

Рис. 2.35

Тело движется вниз вдоль наклонной плоскости (рис.2.36).

Силу тяжести $\overrightarrow{mg}$ разобьем на две составляющие: $F_{ск}$ и $F_{нд}$.

$\vec{F}_{ск}$ – сила скатывающая,

$\vec{F}_{нд}$ – сила нормального давления.

$\vec{N}$ – сила реакции опоры.

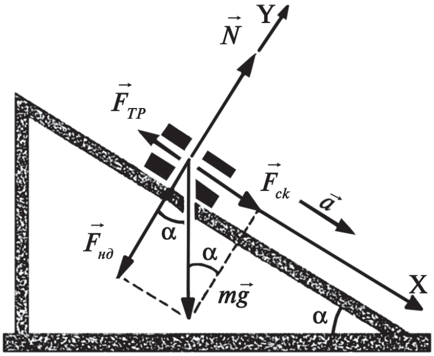


Рис. 2.36

$\vec{N} = -F_{нд}$ – по третьему закону Ньютона.

Из геометрических построений видно, что

$$\begin{cases} F_{ск} = mg\sin\alpha, \\ F_{тр} = \mu N = \mu mg\cos\alpha. \end{cases}$$

a) Если $F_{ск} < F_{тр}$ – тело покоится:

$mg\sin\alpha < \mu mg\cos\alpha$ и $tg\alpha < \mu$;

b) Если $F_{ск} = F_{тр}$ – тело движется равномерно либо покоится:

$mg\sin\alpha = \mu mg\cos\alpha$ и $tg\alpha = \mu$;

c) Если $F_{ск} > F_{тр}$ – тело движется ускоренно:

$mg\sin\alpha > \mu mg\cos\alpha$ и $tg\alpha > \mu$.

Динамическое уравнение движения в последнем случае имеет вид:

$$ma = F_{ск} – F_{тр};$$

$$ma = mg\sin\alpha - \mu\, mg\cos\alpha \Rightarrow a = g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha).$$

Пример. Составим динамическое уравнение движения тела m по наклонной плоскости при наличии внешней силы $\vec{F}$, действующей на тело горизонтально (рис. 2.37).

Разложим силу $\vec{F}$ на две составляющие:

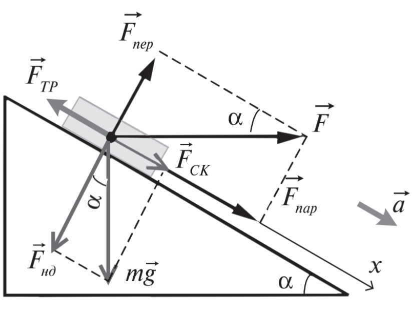


Рис. 2.37

$\vec{F}_{пар}$ – вдоль наклонной плоскости, и $\vec{F}_{пер}$ – перпендикулярную ей.

$\vec{F}_{пар} = F\cos\alpha$, $\vec{F}_{пер} = F\sin\alpha$.

В проекции на ось x имеем:

$ma = F_{ск} + \vec{F}_{пар} - F_{TP}$, так как $F_{TP} = \mu(F_{нд} - F_{пер}) = \mu(mg\cos\alpha - F\sin\alpha)$, получим:

$$ma = mg\sin + F\cos\alpha - \mu\, mg\cos\alpha + \mu\, F\sin\alpha.$$

§ 21. Динамика движения связанных тел

При движении тел, связанных нитью, считается:
а) блок невесомым;
б) нить невесомой и нерастяжимой;
в) силы натяжения, приложенные к связанным телам, равны;
г) тела движутся с одинаковым ускорением.

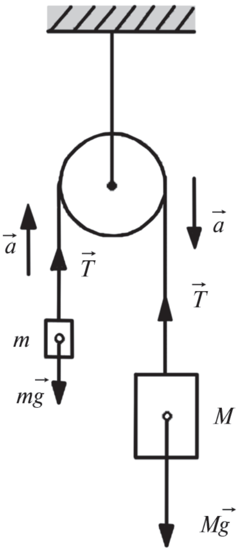


Рис. 2.38

Динамические уравнения можно составить для каждого тела отдельно и для всей системы в целом.

Пример 1. Два тела связаны нитью, перекинутой через неподвижный блок. Так как $M > m$, система приходит в движение с ускорением $\vec{a}$ в сторону большего тела (рис. 2.37).

Составляем динамические уравнения для каждого тела:

$$+\begin{cases} Ma = Mg - T \\ ma = T - mg \end{cases}$$
$$\overline{(M+m)a = (M-m)g},$$

$$a = \frac{M-m}{M+m}g,$$

$$T = \frac{2Mm}{M+m}g.$$

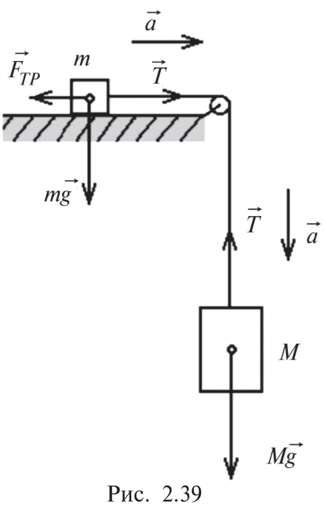


Рис. 2.39

Пример 2. Пусть тело M подвешено на нити, перекинутой через блок, а тело m движется вдоль плоскости с коэффициентом трения μ (рис. 2.40).

Составляем динамическое уравнение для каждого тела системы:

$$+\begin{cases} Ma = Mg - T \\ ma = T - F_{TP} \end{cases}$$
$$\overline{(M+m)a = Mg - F_{TP}},$$

$$a = \frac{M - \mu m}{M+m}g.$$

Вопросы и задания

1. Что такое масса? Назовите способы измерения массы.

2. Что такое сила и какие ее параметры? Прибор для измерения силы?

3. В чем суть явления инерции? Что такое инертность тела?

4. Сформулируйте первый закон Ньютона. Почему первый закон Ньютона называют законом инерции?

5. Сформулируйте второй закон Ньютона. Верно ли утверждение: силы есть, а ускорения нет?

6. Сформулируйте третий закон Ньютона. Почему силы, с которыми взаимодействуют два тела, не уравновешиваются?

7. Когда возникают силы упругости? Какому закону подчиняются силы упругости при упругой деформации?

8. Назовите причины возникновения силы трения. Приведите формулу силы трения скольжения.

9. Назовите способы уменьшения и способы увеличения силы трения.

10. Сформулируйте закон всемирного тяготения. Какой физический смысл имеет гравитационная постоянная?

13. Как вычисляется ускорение свободного падения для любой планеты?

14. Как вычислить массу Земли (или другой планеты)?

15. Выведите формулу первой космической скорости.

16. Выведите формулу второй космической скорости.

17. Как определяется вес тела, движущегося с ускорением, направленным вверх (вниз)? Когда наступает невесомость или перегрузка?

18. Составьте уравнение динамики тела на веревке, движущегося по окружности в вертикальной плоскости в верхней и нижней точках траектории.

Тестовые задания

1. (04/9-12). Тело массой 5 кг падает с ускорением 8 м/с^2. Какова сила сопротивления воздуха движению тела в ньютонах?

A) 40. B) 10. C) 8. D) 5. E) 3.

2. (99/77-9). Веревка выдерживает груз массой m. Груз какой массы она может поднимать вертикально вверх с ускорением g?

A) 1,5m. B) m. C) m/3. D) m/4. E) m/2.

3. (98/4-10). Вертикально падающее тело имеет ускорение 0,8 g. Найдите отношение силы сопротивления к силе тяжести.

A) 0,2. B) 0,4. C) 0,8. D) 1. E) 1,6.

4. (00/6-9). Какой груз (в кг) можно поднять с ускорением g/2 веревкой, выдерживающей максимальный груз 7,5 кг?

A) 7,5. B) 2,5. C) 3,75. D) 4,5. E) 5.

5. (99/8-31). Во время полета космонавт массой 70 кг ощущает перегрузку, равную 4. Найдите вес космонавта в этот момент.

A) 700 Н. B) 1400 Н. C) 4,2 кН. D) 2,8 кН.
E) 5,6 кН.

6. (04/1-12). Воздушный пузырь объемом 2 см^3 поднимается в воде с постоянной скоростью. Определите силу сопротивления воды (в ньютонах) движению пузыря.

A) 0,02. B) 0,05. C) 0,06. D) 0,08. E) 0,01.

7. (02/11). Определите силу (в ньютонах), сообщающую стальному шару радиусом 10 см ускорение 0,2 м/с^2. $\rho_{ст} = 7800$ кг/м^3.

A) 6,5. B) 3,9. C) 5. D) 7,8. E) 15,5.

8. (02/10-5). Автомобиль движется с ускорением 2 м/с^2. С какой силой (в ньютонах) давит пассажир массой 75 кг на спинку сиденья?

A) 37,5. B) 75. C) 150. D) 175. E) 750.

9. (04/). На динамометр подвешен груз массой 2 кг. Один раз динамометр подняли с ускорением 2 м/с^2, а другой раз опустили с таким же ускорением. Определите разность его показаний (в ньютонах) в этих двух случаях.

A) 10. B) 6. C) 8. D) 4. E) 12.

10. (04/). Три кирпича массой 4 кг каждый лежат друг на друге. Коэффициент трения между кирпичами равен 0,4. Какая минимальная сила (в ньютонах) потребуется для вытаскивания среднего кирпича?

A) 16. B) 24. C) 48. D) 56. E) 50.

11. (98/8-26). Сравните силу натяжения нити для случаев, когда тело массой *m* поднимают: 1) с ускорением (T_1); 2) равномерно (T_2); 3) замедленно (T_3).

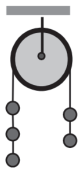
A) $T_1 < T_2 < T_3$. *B)* $T_1 > T_2 > T_3$. *C)* $T_1 > T_2 < T_3$.
D) $T = T_2 < T_3$. *E)* $T = T_2 = T_3$.

12. (03/9-31). Лифт движется вверх с ускорением $\vec{a}$. Из рук пассажира упала книга. С каким ускорением движется книга относительно лифта?

A) 0. B) $\vec{a}$. *C) g. D)* $g - \vec{a}$. *E)* $g + \vec{a}$.

13. (03/7-26). Космический корабль поднимается вертикально с ускорением 15 м/с^2. Определите вес (Н) космонавта массой 80 кг.

A) 800. B) 1000. C) 1200. D) 2000. E) 2400.



14. (99/8-23). Найдите ускорение (в м/с^2) системы, показанной на рисунке. Масса всех грузов одинакова. Трением пренебречь.

A) 1. B) 2. C) 3,3. D) 5. E) 10.

15. (99/8-34). Угол наклона плоскости 45°. С каким ускорением (в м/с^2) должно соскальзывать тело при отсутствии трения?

A) $\frac{5\sqrt{2}}{2}$. *B)* $\frac{\sqrt{2}}{2}$. *C)* $10\sqrt{2}$. *D)* $\sqrt{2}$. *E)* $5\sqrt{2}$.

16. (01/1-20). Пчела массой m летит прямолинейно и равномерно со скоростью $\vec{\upsilon}$, направленной горизонтально. Сила сопротивления $\vec{F}_c = k\vec{\upsilon}$ известная величина. Под каким углом к скорости пчелы направлена развиваемая ею сила тяги?

A) 0. B) $\frac{\pi}{2}$. *C)* $arctg\frac{k\upsilon}{mg}$. *D)* $arctg\frac{mg}{k\upsilon}$. *E)* $arctg\frac{k}{m}$.

17. (00/1-19). На плоскости, наклоненной к горизонту под углом α, покоится тело массой m. Чему равна сила трения, если коэффициент трения μ?

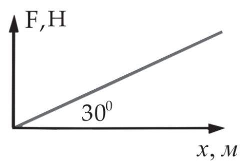
A) $mg\sin\alpha$. *B)* $\mu mg\cos\alpha$. *C)* μm. *D)* μmg. *E)* $\mu\, mg\sin\alpha$.

18. (02/11). При скольжении по наклонной плоскости с углом наклона 60° бруска массой 30 кг действует сила трения, равная 30 Н. Определите коэффициент трения между бруском и плоскостью.

A) 0,03. B) 0,05. C) 0,15. D) 0,2. E) 0,1.

19. (99/10-18). Какова жесткость системы двух одинаковых пружин, соединенных параллельно, по сравнению с системой таких же пружин, соединенных последовательно?

A) меньше в 2 раза. B) больше в 2 раза.
C) меньше в 4 раза.
D) больше в 4 раза. E) одинакова.



20. (99/8-28). Используя график, приведенный на рисунке, определите жесткость пружины (в Н/м).

A) $\frac{\sqrt{3}}{3}$. *B)* $\frac{\sqrt{3}}{2}$. *C) 0,5.* *D) 1.* *E)* $\sqrt{3}$.

21. Три одинаковые пружины с жесткостью *k* каждая соединены последовательно. Найти жесткость этой системы.

A) k. *B) k/2.* *C) k/3.* *D) 3 k.* *E) 2k.*

22. (03/10-22). Пружину длиной *l* и жесткостью *k* разделили на 2 куска с длинами $l_1=2l/3$ и $l_2=l/3$. Определите жесткость короткого куска.

A) 3k. *B) k/3.* *C) 3k/2.* *D) 2k/3.* *E) k.*

23. (98/8-12). На какой высоте сила тяжести тела будет в *n* раз меньше, чем на поверхности Земли? (R – радиус Земли.)

A) $R(\sqrt{n}-1)$. *B)* $R(n-1)$. *C)* $\frac{R}{n-1}$. *D)* $R\sqrt{n-1}$. *E)* $\frac{R}{\sqrt{n}-1}$.

24. (98/11-14). На поверхности Земли тело весит 1Н. С какой силой (в Н) притягивается это же тело к Земле на высоте, равной удвоенному значению радиуса Земли?

A) 3. *B) 1/9.* *C) 1/4.* *D) 1/6.* *E) 1/3.*

25. (02/9-15). На какой высоте от поверхности Земли (в км) сила притяжения к Земле уменьшится на 36%? Радиус Земли R =6400 км.

A) 868. *B) 1600.* *C) 3327.* *D) 3600.* *E) 4267.*

26. (98/2-11). В каком соотношении будут находиться силы давления автомобиля на выпуклую (F_1), вогнутую (F_2) и горизонтальную (F_3) части дороги при одной и той же скорости?

A) $F_1 = F_2 = F_3$. *B)* $F_1 > F_2 > F_3$. *C)* $F_2 > F_1 > F_3$.
D) $F_1 < F_3 < F_2$. *E)* $F_1 < F_2 < F_3$.

27.(00/6-7). При какой скорости мотоцикла (в м/с), проходящего через выпуклый мост с радиусом кривизны 40 м, в высшей точке моста его вес будет равен нулю?

A) 20. *B) 30.* *C) 35.* *D) 40.* *E) 80.*

28. (04/1-33). Ведёрко с водой, привязанное к нити, вращается в вертикальной плоскости. Радиус траектории 40 см. Какова должна быть наименьшая скорость ведёрка (в м/с), чтобы вода не выливалась?

A) 1,2. *B) 2.* *C) 3.* *D) 4.* *E) 4,4.*

Глава III
ЭЛЕМЕНТЫ СТАТИКИ

Статика – раздел механики, изучающий условия равновесия твердых тел. В состоянии равновесия тело может находиться в покое или двигаться прямолинейно и равномерно. Если состояние равновесия нарушается, то можно определить направление дальнейшего движения тела.

§ 22. Условия равновесия неподвижных тел

Твердые тела находятся в равновесии, если выполняются следующие два условия.

Условие 1. Чтобы не вращающееся тело находилось в равновесии, необходимо, чтобы равнодействующая всех сил, приложенных к телу, была равна нулю.

$$\sum_{i=1}^{n} F_i = 0; \qquad \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \ldots + \vec{F}_n = 0.$$

Равнодействующей силой $\vec{F}_R$ называется векторная сумма всех сил, действующих на тело.

Сложение сил производится по правилам сложения векторов:

а) по правилу треугольника (рис. 3.1 *а*);

б) по правилу параллелограмма (рис. 3.1 *б*);

в) методом сложения проекций векторов на оси координат (рис. 3.1 *в*).

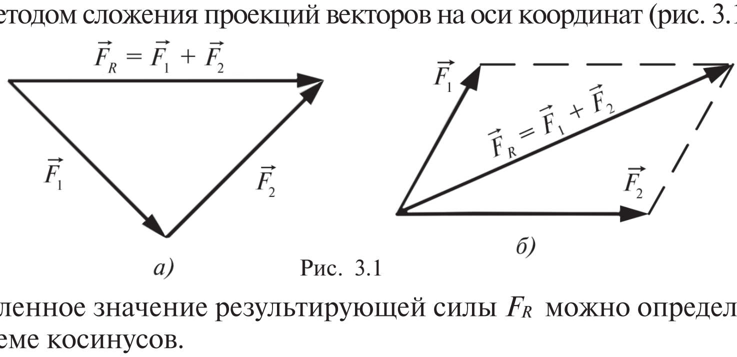


Рис. 3.1

Численное значение результирующей силы F_R можно определить по теореме косинусов.

$$F_R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha}\,.$$

Если: а) $\alpha = 0$; $\cos 0° = 1$; $F_R = F_1 + F_2$;

б) $\alpha = 180°$; $\cos 180° = -1$; $F_R = F_1 - F_2$.

в) $\alpha = 90°$; $\cos 90° = 0$; $F_R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$.

Обычно под силой, действующей на тело, подразумевают результирующую силу $\vec{F}_R$ и обозначают $\vec{F}$.

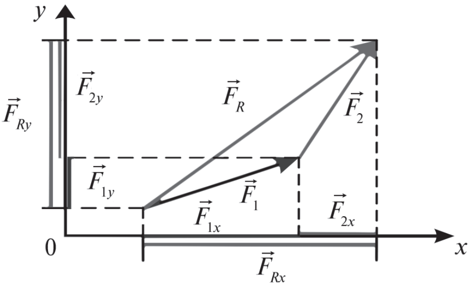


Рис. 3.1 *в*

$$\vec{F}_R = \vec{F}_1 + \vec{F}_2, \quad \vec{F}_{Rx} = \vec{F}_{1x} + \vec{F}_{2x},$$

$$\vec{F}_{Ry} = \vec{F}_{1y} + \vec{F}_{2y}, \quad F_R = \sqrt{F_{Rx}^2 + F_{Ry}^2}.$$

Если точки приложения векторов сил разные, то необходимо найти точку пересечения действия векторов и перенести вектора в эту точку параллельно самим себе (рис. 3.2 *а*).

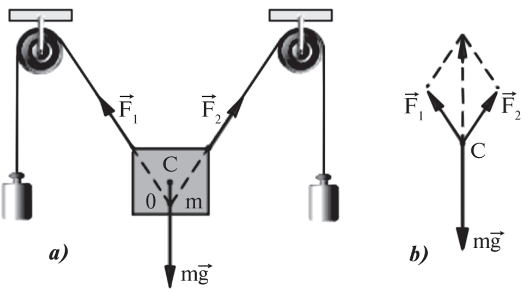


Рис. 3.2

Равновесие твердого тела под действием трех сил. При вычислении равнодействующей все силы приведены к одной точке С (рис. 3.2 *б*).

Если тело может вращаться относительно некоторой оси, то для его равновесия недостаточно равенства нулю равнодействующей всех сил.

Условие 2. Правило моментов: *тело, имеющее неподвижную ось вращения, находится в равновесии, если алгебраическая сумма моментов всех приложенных к телу сил относительно этой оси равна нулю:*

$$\sum_{i=1}^{n} M_i = 0 \quad \text{или} \quad F_1 l_1 + F_2 l_2 + \ldots + F_n l_n = 0.$$

Плечом силы *l (м)* называется длина перпендикуляра, проведенного от оси вращения *О* до линии действия силы (АВ) (рис. 3.3).

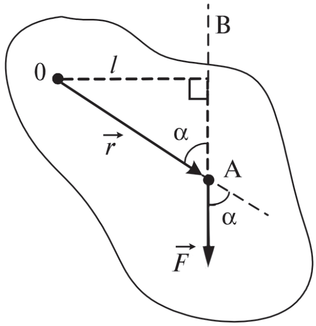


Рис. 3.3

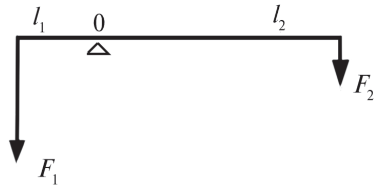


Рис. 3.4

Моментом силы называется произведение модуля силы на его плечо:

$$M = Fl = Fr\sin\alpha\ (Нм),$$

где: $\vec{r}$ – радиус-вектор, проведенный из оси вращения 0 в точку А приложения силы. α – угол между векторами $\vec{F}$ и $\vec{r}$.

Положительными считаются моменты тех сил, которые стремятся повернуть тело против часовой стрелки, отрицательными – моменты, которые стремятся повернуть тело по часовой стрелке.

Состояние равновесия называется *устойчивым*, если при малых отклонениях тела от этого состояния возникают силы или моменты сил, стремящиеся возвратить тело в равновесное состояние (рис. 3.5в).

При малом отклонении тела из состояния *неустойчивого* равновесия возникают силы или моменты сил, стремящиеся удалить тело от положения равновесия (рис. 3.5 б).

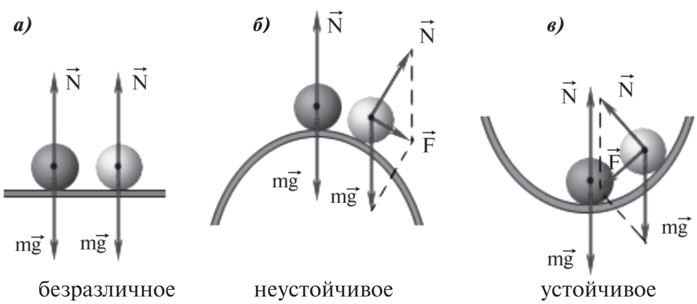
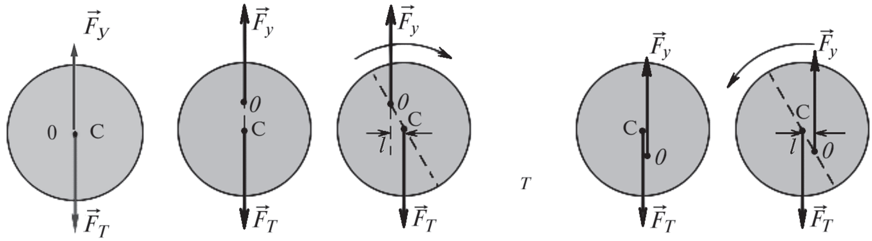


Рис. 3.5

Для тела, имеющего неподвижную ось вращения, возможны все три вида равновесия. *Безразличное* равновесие возникает, когда ось вращения проходит через центр масс. При устойчивом и неустойчивом равновесии центр масс находится на вертикальной прямой, проходящей через ось вращения. При этом, если центр масс с находится ниже оси вращения 0, состояние равновесия оказывается устойчивым. Если же центр масс расположен выше оси вращения – состояние равновесия неустойчиво (рис. 3.6).



безразличное устойчивое неустойчивое

Рис. 3.6

В положении устойчивого равновесия потенциальная энергия системы тел минимальна.

Равновесие тела на опоре:

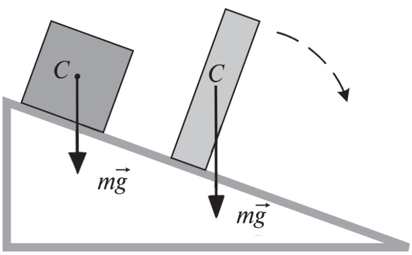


Рис. 3.7

Тело находится в равновесии, если вертикальная линия, проведенная через центр масс тела, проходит через ***площадь опоры,*** если же эта линия не пересекает площадь опоры, то тело опрокидывается (рис. 3.7).

§ 23. Простые механизмы

Простые механизмы: наклонная плоскость, клин, винт, рычаг, блок, домкрат, ворот.

Рычаг представляет собой стержень, который может вращаться вокруг неподвижной опоры (оси вращения O) (рис. 3.8).

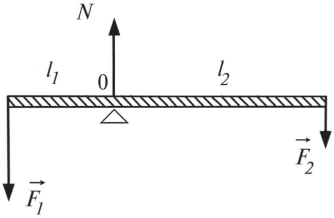


Рис. 3.8

1. $\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = 0, \qquad \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{N} = 0,$

$$N = F_1 + F_2.$$

2. $\sum_{i=1}^{n} M_i = 0, \qquad F_1 l_1 - F_2 l_2 = 0, \qquad F_1 l_1 = F_2 l_2.$

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}.$$

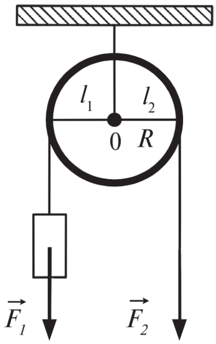


Рис. 3.9

Правило рычага: Рычаг находится в равновесии, когда силы, действующие на него, обратно пропорциональны плечам этих сил.

Блок – представляет собой колесо с желобом для веревки.

Неподвижный блок – блок, ось которого закреплена и при подъеме грузов не поднимается и не опускается (рис. 3.9).

Неподвижный блок можно рассматривать как равноплечный рычаг. O – ось вращения.

Плечи $l_1 = l_2 = R$, тогда правило моментов примет вид:

$$F_1 R = F_2 R \Rightarrow F_1 = F_2.$$

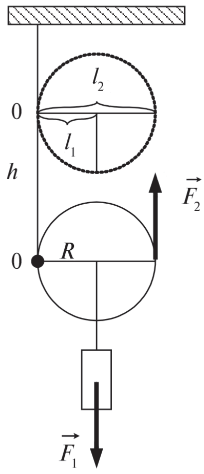


Рис. 3.10

Вывод: *Неподвижный блок не дает выигрыша в силе.* Применяется для изменения направления действия силы.

Подвижный блок – блок, ось которого поднимается и опускается вместе с грузом (рис. 3.10).

Подвижный блок можно рассматривать как неравноплечный рычаг. O – ось вращения. Плечи $l_1 = R$, $l_2 = 2R$, тогда правило моментов примет вид: $F_1 R = F_2 \cdot 2R \Rightarrow F_2 = \dfrac{F_1}{2}$.

Вывод: *Подвижный блок дает выигрыш в силе в два раза. Выигрывая в силе, проигрываем в расстоянии во столько же раз* («Золотое правило» механики).

Длина перебранной веревки L в два раза больше высоты h подъема груза $L = 2h$. Скорость движения веревки υ_2 в два раза больше скорости υ_1 груза $\upsilon_2 = 2\upsilon_1$. Нет выигрыша в работе $A_1 = A_2$.

Полиспаст.

Полиспаст – это система, состоящая из *n* подвижных и *n* неподвижных блоков. Для уравновешивания силы P необходимо приложить силу F (рис. 3.11).

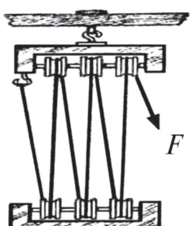


Рис. 3.11

$$F = \frac{P}{2n}.$$

Домкрат винтовой.

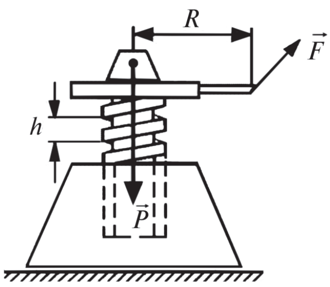


Рис. 3.12

При отсутствии трения сила P, действующая вдоль оси винта, уравнове-шивается силой F, приложенной к рукоятке

$$F = \frac{Ph}{2\pi R}.$$

R – расстояние от оси вращения до точки приложения силы,

h – шаг винта (рис. 3.12).

Следовательно винтовой домкрат дает выигрыш в силе в $\frac{P}{F} = \frac{2\pi R}{h}$ раз.

Для всех простых механизмов справедливо «Золотое правило» механики:

Ни один простой механизм не дает выигрыша в работе. Выигрывая в силе, проигрываем в расстоянии во столько же раз. Выигрывая в расстоянии, во столько же раз проигрываем в силе.

Вопросы и задания

1. Сформулируйте условия равновесия неподвижных тел.
2. Как найти направление и модуль результирующей силы?
3. Что называется плечом силы? Что называется моментом силы?
4. Сформулируйте правило моментов.
5. При каких условиях равновесие является устойчивым, неустойчивым, безразличным.
6. При каком условии тело на опоре не опрокидывается?
7. Сформулируйте правило равновесия рычага.
8. Какой выигрыш в силе дает неподвижный блок и подвижный блок?
9. Сформулируйте «Золотое правило» механики.

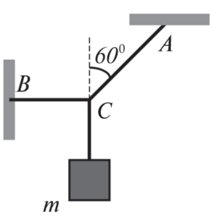
Тестовые задания

1. (04/1-30). Какова масса (в кг) лежащего на земле стержня, если его можно приподнять за один конец силой 12 Н?

A) 0,6. B) 1,2. C) 2,4. D) 4,8. E) 3,6.

2. (03/7-28). Груз массой m=10 кг подвешен на нитях AC и BC, как показано на рисунке. Определите силу натяжения нити AC (Н).

A) 100. B) 200. C) 10. D) 20. E) 50.



3. Часть какой длины (в см) надо отрезать от однородного стержня длиной 1 м, чтобы сдвинуть центр тяжести стержня на 10 см?

A) 10.   B) 20.   C) 40.   D) 90.   E) 5.

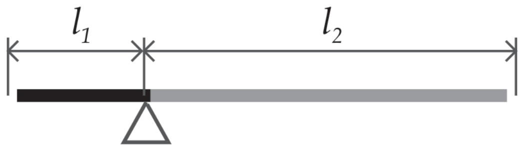
4. (04/1-3). Какова равнодействующая трех сил по 6Н каждая (в ньютонах), приложенных к одной точке тела и составляющих между собой угол 120° в одной плоскости?

A) 15; будет.   B) 12; будет.   C) 0; не будет.
D) 0; будет.   E) 12; не будет.

5. (02/12-38). Рычаг постоянного сечения, изображенный на рисунке, составной: плечо длиной l_1 сделано из олова, а плечо длиной l_2 из дерева. Какой должна быть длина l_2 (в см), чтобы рычаг был в равновесии, если

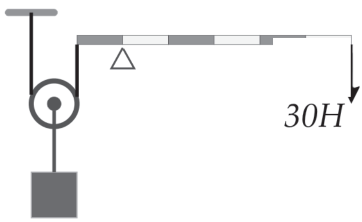
l_1 =20 см? Плотность олова равна 7,2, а дерева – 0,8 г/см^3.

A) 30.   B) 120.   C) 60.   D) 90.   E) 180.

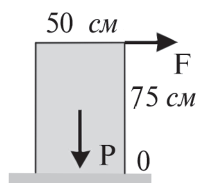


6. (03/3-55). Груз какого веса (в ньютонах) можно поднять с помощью установки, изображенной на рисунке? (Рычаг и блок невесомые.)

A) 30.   B) 150.   C) 3000.   D) 60.   E) 300.



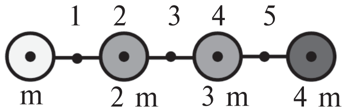
7. (98/3-19). Брусок массой 15 кг, шириной 50 см и высотой 75 см нужно опрокинуть через ребро О. Найдите модуль необходимой для этого минимальной силы F (в; Н).



A) 75.   B) 50.   C) 94.   D) 74.   E) 86.

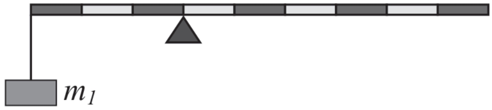
8. (98/8-51). В какой из точек нужно поставить опору, чтобы система тел находилась в состоянии равновесия?

A) 1.   B) 2.   C) 3.   D) 4.   E) 5.



9. (99/7-10). Какова должна быть масса груза m_1, чтобы однородная балка массой m, находилась в равновесии?

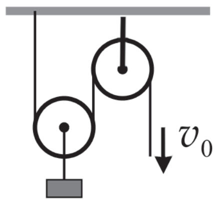
A) $\frac{m}{4}$. *B)* $\frac{m}{3}$. *C)* $\frac{2m}{3}$. *D)* $\frac{m}{6}$. *E)* $\frac{m}{2}$.



10. (98/11). На земле лежит однородный стержень, который надо приподнять за один конец. Сравните необходимую для этого силу F с силой тяжести стержня mg.

A) $F \le mg$. *B)* $F < mg$. *C)* $F = mg/2$. *D)* $F > mg$. *E)* $F = mg$.

11. (98/8-3). Груз подвешен с помощью двух блоков. С какой скоростью будет двигаться груз, если тянуть веревку со скоростью υ_0?



A) $\upsilon_0/2$. *B)* $2\upsilon_0$. *C)* $\upsilon_0\sqrt{2}$.

D) $\sqrt{2\upsilon_0}$. *E)* $3\upsilon_0$.

12. На наклонной плоскости с углом наклона α покоится однородный брусок, высота которого h. На каком расстоянии от центра тяжести бруска проходит сила реакции опоры?

A) $x = \frac{h}{2} tg\alpha$. *B)* $x = \frac{h}{2tg\alpha}$. *C)* $x = \frac{2h}{tg\alpha}$.

D) $x = \frac{h}{4} tg\alpha$. *E)* $x = \frac{h}{tg\alpha}$.

13. Две силы 10Н и 14Н, приложенные в одной точке, могут дать равнодействующую равную:

A) 2, 4, 10. *B)* 4, 17, 2,24. *C)* 10, 24, 26.
D) 3, 4, 10. *E)* 10, 20, 30.

14. (04/9-16). Камень массой 240 кг поднимают с помощью рычага. Какую силу надо приложить большему плечу длиной 2,4 м, если длина меньшего плеча 0,6 м?

A) 600 Н. *B)* 4,8 кН. *C)* 6 кН.
D) 1470 Н. *E)* 2,4 кН.

Глава IV
ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

§ 24. Закон сохранения импульса

Импульсом тела *(или* ***количеством движения****) называется векторная физическая величина, равная произведению массы тела на скорость его движения:* $\vec{p} = m\vec{\upsilon}$ *(кг·м/с).*

Импульсом силы *называется векторная физическая величина, равная произведению силы на время ее действия:* $\vec{F}\Delta t$ $(Н\ с)$.

Пусть тело под действием силы F за время Δt изменило свою скорость от υ_1 до υ_2. По II закону Ньютона:

$\vec{F} = m\vec{a}$ или $\vec{F} = m\dfrac{\vec{\upsilon}_2 - \vec{\upsilon}_1}{\Delta t}$, тогда

$\vec{F}\Delta t = m\vec{\upsilon}_2 - m\vec{\upsilon}_1$ или $\vec{F}\Delta t = \Delta(m\vec{\upsilon})$.

Импульс силы равен изменению импульса тела.

Закон сохранения импульса.

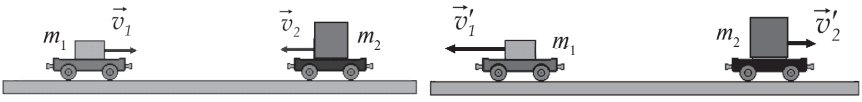


Рис. 4.1

Пусть два тела m_1 и m_2 соударяются. В результате их взаимодействия скорости и импульсы изменяются (рис. 4.1).

$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ – по III закону Ньютона.

$m_1\vec{a}_1 = -m_2\vec{a}_2$ – по II закону Ньютона.

$m_1\dfrac{\vec{\upsilon}_1' - \vec{\upsilon}_1}{t} = -m_2\dfrac{\vec{\upsilon}_2' - \vec{\upsilon}_2}{t}$, где t – время удара,

$\vec{\upsilon}_1$ – скорость I тела до удара, $\vec{\upsilon}_1'$ – скорость I тела после удара,

$\vec{\upsilon}_2$ – скорость II тела до удара, $\vec{\upsilon}_2'$ – скорость II тела после удара.

$m_1\vec{v}_1' - m_1\vec{v}_1 = -m_2\vec{v}_2' + m_2\vec{v}_2 \Rightarrow m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}_1' + m_2\vec{v}_2'$ – сумма импульсов тел до взаимодействия равна сумме импульсов тел после взаимодействия, то есть $\sum_i m_i\vec{v}_i = const.$

Векторная сумма импульсов тел, входящих в замкнутую систему, остается постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой.

Отдача при стрельбе. Снаряд и орудие – два взаимодействующих тела. В момент выстрела снаряд движется вперед, а ору-дие – откатывается назад (рис. 4.2).

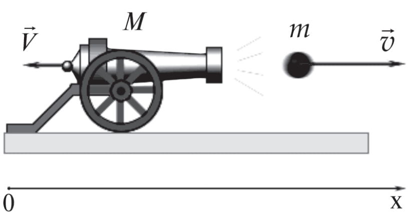


Рис. 4.2

$\vec{V}$ – скорость орудия.

$\vec{\upsilon}$ – скорость снаряда.

M – масса орудия.

m – масса снаряда.

На основании закона сохранения импульса можно записать:

$$M\vec{V} + m\vec{\upsilon} = 0 \Rightarrow \vec{V} = -\frac{m}{M}\vec{\upsilon}.$$

Скорость, которую приобретает орудие при отдаче, зависит только от скорости снаряда и отношения масс $\frac{m}{M}$.

Реактивное движение основано на законе сохранения импульса.

В ракете при сгорании топлива газы, нагретые до высокой температуры, выбрасываются из сопла с большой скоростью $\vec{v}_Г$ относительно ракеты. Начальная скорость ракеты равнялась нулю, то есть до взаимодействия сумма импульсов равна нулю (рис. 4.3).

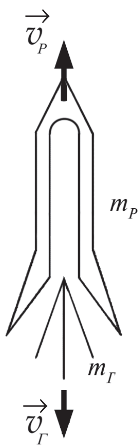


Рис. 4.3

Тогда для замкнутой системы «ракета+газы» можно записать закон сохранения импульса

$$0 = m_P\vec{v}_P + m_Г\vec{v}_Г, \quad \text{отсюда:} \quad \vec{v}_P = -\frac{m_Г\vec{v}_Г}{m_P}.$$

Полученная формула для скорости ракеты справедлива лишь при условии, что вся масса сгоревшего топлива выбрасывается из ракеты одновременно. На самом деле истечение происходит постепенно в течение всего времени ускоренного движения ракеты и конечная скорость $\vec{v}_P$ ракеты определяется по формуле Циолковского $\vec{\upsilon}_P = \vec{\upsilon}_\Gamma ln\frac{M_0}{M}$, где $\frac{M_0}{M}$ – отношение начальной и конечной масс ракеты.

§ 25. Механическая работа и мощность

Работой *A, совершаемой постоянной силой* $\vec{F}$, *называется физическая величина, равная произведению модулей силы и перемещения, умноженному на косинус угла* α *между векторами силы* $\vec{F}$ *и перемещения* $\vec{S}$: $A = FS\cos\alpha$ или $A = (\vec{F}\vec{S})$ – скалярное произведение векторов силы $\vec{F}$ и перемещения $\vec{S}$ (рис. 4.4).

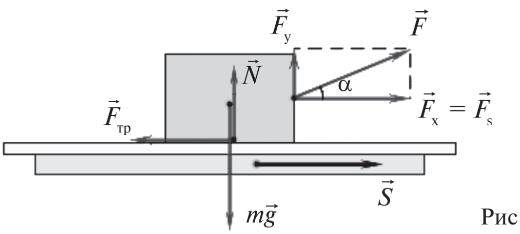
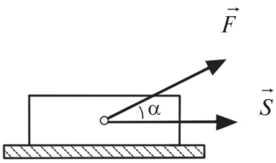


Рис. 4.4

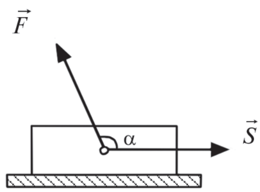
Работа A измеряется в системе СИ в джоулях, 1Дж = 1Н × 1 м. Работа это скалярная величина (нельзя указать направление работы).

Частные случаи вычисления работы:



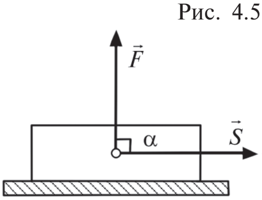
$A>0$; $cos\alpha>0$

Рис. 4.5



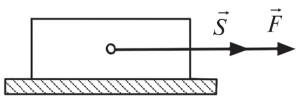
$A<0$; $cos\alpha<0$

Рис. 4.6



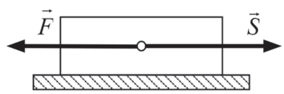
($A = 0$; $cos\ 90^\circ = 0$

Рис. 4.7



$A = FS$; $cos\ 0^\circ = 1$

Рис. 4.8



$A = -FS$; $cos\ 180^\circ = -1$

Рис. 4.9

Если проекция F_S силы $\vec{F}$ на направление перемещения $\vec{S}$ не остается постоянной, работу можно вычислить графически.

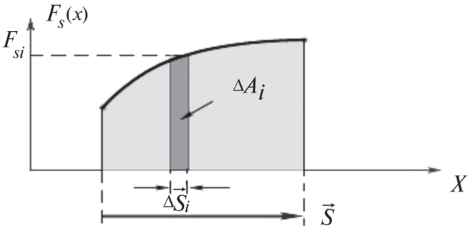


Рис. 4.10

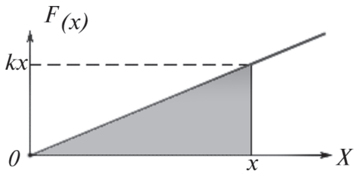


Рис. 4.11

Работа определяется по площади криволинейной фигуры под графиком Fs (x) (рис. 4.10).
Примером силы, модуль которой зависит от координаты, может служить упругая силы пружины, подчиняющаяся закону Гука. Зависимость модуля внешней силы от координаты x изображается на графике прямой линией $F = kx$ (рис. 4.11).
По площади треугольника на рисунке можно определить работу, совершенную внешней силой, приложенной к концу пружины: $A = \dfrac{kx^2}{2}$.

Работа упругой силы $\vec{F}_{упр}$ равна по модулю работе внешней силы $\vec{F}$ и противоположна ей по знаку.

Мощностью *называется работа силы, совершаемая в единицу времени.* Мощность N это физическая величина, равная отношению работы A к промежутку времени t, в течение которого совершена эта работа: $N = \dfrac{A}{t}$.

Единица мощности – ватт *(Вт)*. $Вт = \dfrac{Дж}{с}$.

Мощность – характеризует способность тела совершать работу в единицу времени. *1 кВт ч =1000 Вт 3600 с =3,6 · 10⁶ Дж.*

При равномерном движении: $N = \dfrac{FS}{t} = F\upsilon$.

Из формулы видно, что при постоянной мощности N двигателя сила F тем меньше, чем больше скорость υ. Вот почему, когда нужна наибольшая сила тяги (разгон, подъем в гору), водитель переключает двигатель на малую скорость – первую передачу.

§ 26. Кинетическая энергия

Рассматривая движение тела вдоль прямой линии под действием постоянной силы $\vec{F}$, можно записать работу силы как $A = FS$. При равноускоренном движении перемещение S выражается формулой $S = \dfrac{\upsilon^2 - \upsilon_0^2}{2a}$, а сила $F = ma$;

Отсюда следует, что $A = ma\dfrac{\upsilon^2 - \upsilon_0^2}{2a} = \dfrac{m\upsilon^2}{2} - \dfrac{m\upsilon_0^2}{2}$.

Кинетической энергией *называется физическая величина, равная половине произведения массы тела на квадрат скорости тела:*

$$E_k = \frac{m\upsilon^2}{2} \ (Дж).$$

Кинетическая энергия – энергия, которой обладает движущееся тело.

Теорема о кинетической энергии

Работа приложенной к телу равнодействующей силы равна изменению его кинетической энергии.

$$A = E_k - E_{k0} \quad или \quad A = \Delta E_k.$$

§ 27. Потенциальная энергия

Потенциальная энергия *определяется взаимным положением тел* (например, положением тела относительно поверхности Земли) *или их взаимодействием.*

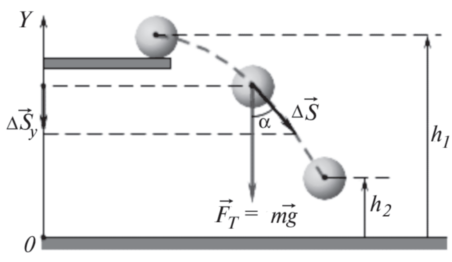


Рис. 4.12

Если тело переместилось из точки, расположенной на высоте h_1, в точку, расположенную на высоте h_2, то сила тяжести совершила работу (рис.4.12).

$$A = FS, \quad F = mg,$$
$$S = h_1 - h_2 = h$$
$$и \quad A = mg\,(h_1 - h_2) = mgh.$$

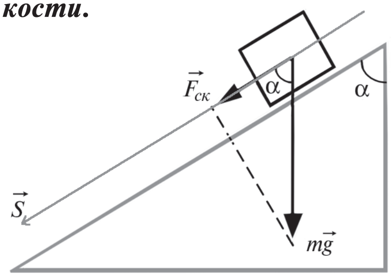
$mgh = E_p$ – потенциальная энергия – энергия тела, поднятого над землей. E_p измеряется в джоулях *(Дж)*:

$$A = E_{p1} - E_{p2} = -(E_{p2} - E_{p1}) = -\Delta E_p.$$

Работа равна изменению потенциальной энергии со знаком минус, т. е. работа равна убыли потенциальной энергии:

если A>0, то E_p – убывает; если A<0, то E_p – возрастает.

Работа силы тяжести при движении тела по наклонной плоскости.



$A = FS\cos\alpha = mgS\cos\alpha.$
$S\cos\alpha = h.$
$A = mgh.$
(рис. 4.13).

Рис. 4.13

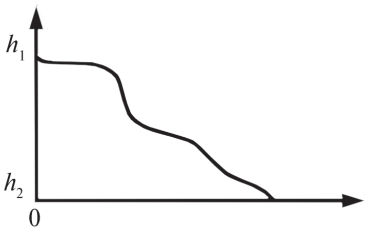


Рис. 4.14

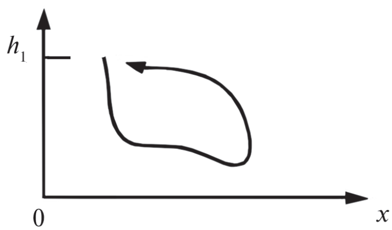


Рис. 4.15

Работа силы тяжести не зависит от формы траектории, а зависит только от разности высот ($h=h_1-h_2$) начальной и конечной точек (рис. 4.14).

На замкнутой траектории работа силы тяжести равна 0 (рис. 4.15).

$$A = mg\,(h_1-h_2) = 0.$$

Консервативными силами *называются силы, работа которых при перемещении тела не зависит от формы траектории, а зависит от начального и конечного положений.* Свойством консервативности обладают сила тяжести и сила упругости.

Поля консервативных сил называются потенциальными. Гравитационное и электростатическое поля – потенциальные поля.

Диссипативными силами *называются силы, работа которых при перемещении тела зависит от траектории.* Примером являются силы трения.

Потенциальная энергия поля тяготения

В поле тяготения Земли (на значительных расстояниях от нее) потенциальная энергия тела зависит от расстояния до центра Земли (закон всемирного тяготения). Формула, выражающая потенциальную энергию тела массой m на расстоянии r от центра Земли, имеет вид:

$$E_P = -\gamma\frac{Mm}{r}.$$

где M – масса Земли, γ – гравитационная постоянная.

Потенциальная энергия деформированного тела.

Растянутая (или сжатая) пружина способна совершить работу. Следовательно, такая пружина обладает запасом потенциальной энергии.

Если в начальном состоянии сжатие пружины было равно x_1, в новом состоянии x_2, то против силы упругости совершится работа, равная изменению потенциальной энергии, взятой с противоположным знаком (рис. 4.16):

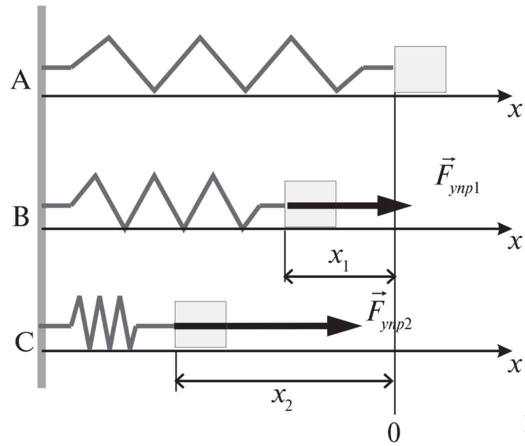


Рис. 4.16

$$A = F_{cp}(x_1 - x_2) = \frac{kx_1 + kx_2}{2}(x_1 - x_2) = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2} = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right).$$

$E = \dfrac{kx^2}{2}$ – потенциальная энергия деформированного тела.

$A = -(E_{p2} - E_{p1})$ или $A = -\Delta E_p$.

§ 28. Закон сохранения полной механической энергии

Если тела, составляющие *замкнутую механическую систему*, взаимодействуют между собой только силами тяготения и упругости, то работа этих сил равна изменению потенциальной энергии тел, взятому с противоположным знаком:

$$A = -(E_{p2} - E_{p1}).$$

По теореме о кинетической энергии эта работа равна изменению кинетической энергии тел $A = (E_{k2} - E_{k1})$, следовательно:

$$E_{k2} - E_{k1} = -E_{p2} + E_{p1} \quad \text{или} \quad E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}.$$

Сумма кинетической и потенциальной энергий тел, составляющих замкнутую систему и взаимодействующих между собой силами тяготения и силами упругости, остается неизменной.

$$mgh + \frac{m\upsilon^2}{2} = const. \qquad \frac{kx^2}{2} + \frac{m\upsilon^2}{2} = const.$$

Пример взаимного превращения энергии

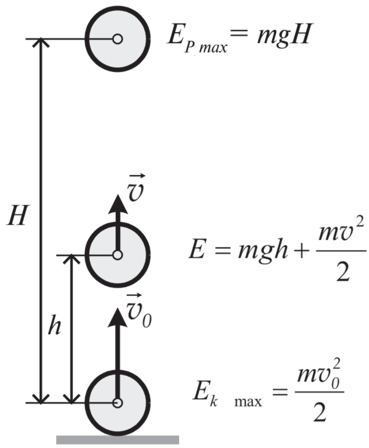


Рис. 4.17

Рассмотрим взаимные превращения кинетической и потенциальной энергии друг в друга на примере движения тела, брошенного вертикально вверх (рис. 4.17).

В момент броска тело массой m, брошенное со скоростью υ_0, обладает кинетической энергией

$$E_{k\ max} = \frac{m\upsilon_0^2}{2}.$$

При подъеме скорость тела уменьшается, убывает и его кинетическая энергия $E_k = \frac{m\upsilon^2}{2}$, одновременно возрастает его потенциальная энергия: $E_p = mgh$, где h – высота подъема тела.

На максимальной высоте H кинетическая энергия тела равна нулю, а потенциальная достигает максимального значения $E_{p\ max} = mgH$.

Максимальная высота подъема $H = \frac{\upsilon_0^2}{2g}$.

Подставив это значение в формулу потенциальной энергии, получим: $E_{P\ max} = mgH = mg\frac{\upsilon_0^2}{2g} = \frac{m\upsilon_0^2}{2}$.

Видим, что при подъеме тела, его кинетическая энергия преобразуется в потенциальную энергию, количественно оставаясь неизменной. При падении тела, его потенциальная энергия преобразуется в равную ей по модулю кинетическую энергию. В промежуточных точках траектории тело обладает и потенциальной и кинетической энергией, так что, сумма потенциальной и кинетической энергии остается постоянной для любой точки траектории и называется полной механической энергией:

$$E = E_K + E_P = const.$$

Пример применения закона сохранения энергии

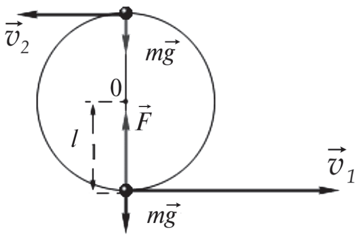


Рис. 4.18

Нахождение минимальной прочности легкой нерастяжимой нити, удерживающей тело массой m при его вращении в вертикальной плоскости (задача Х. Гюйгенса) (рис. 4.18).

$\vec{F}$ – сила натяжения нити в нижней точке траектории.

Закон сохранения энергии для тела в верхней и нижней точках траектории записывается в виде:

$$\frac{m\upsilon_1^2}{2} = \frac{m\upsilon_2^2}{2} + mg2l.$$

Обратим внимание на то, что сила $\vec{F}$ натяжения нити всегда перпендикулярна скорости тела; поэтому она не совершает работы.

При минимальной скорости вращения натяжение нити в верхней точке равно нулю и, следовательно, центростремительное ускорение телу в верхней точке сообщается только силой тяжести:

$$\frac{m\upsilon_2^2}{l} = mg.$$

Из этих соотношений следует: $\upsilon_{1\,\min}^2 = 5gl.$

Центростремительное ускорение в нижней точке создается силами $\vec{F}$ и $m\vec{g}$, направленными в противоположные стороны:

$$\frac{m\upsilon_1^2}{l} = F - mg.$$

Отсюда следует, что при минимальной скорости тела в верхней точке сила натяжения нити в нижней точке будет по модулю равна:

$$F = 6\ mg.$$

Закон сохранения и превращения энергии в реальных условиях В реальных условиях практически всегда на движущиеся тела наряду с силами тяготения, силами упругости и другими консервативными силами действуют силы трения или силы сопротивления среды.

Если между телами, составляющими замкнутую систему, действуют силы трения, то механическая энергия не сохраняется. Часть механической энергии превращается во внутреннюю энергию тел (нагревание).

При любых физических взаимодействиях энергия не возникает и не исчезает. Она лишь передается от одного тела к другому или превращается из одной формы в другую.

Коэффициент полезного действия КПД механизмов и машин:

$$\eta = \frac{A_{полезная}}{A_{затраченная}} \cdot 100\%, \qquad \eta < 100\%.$$

В любом механизме полезная работа всегда меньше полной затраченной работы, из-за неизбежных потерь энергии, вызванных прежде всего работой сил трения и сопротивления.

§ 29. Упругие и неупругие соударения

Абсолютно упругим ударом *называется столкновение, при котором сохраняется механическая энергия системы тел и выполняется закон сохранения импульса.*

Центральный абсолютно упругий удар

В общем случае массы m_1 и m_2 шаров неодинаковы, υ_1 – скорость первого шара, υ_2 – скорость второго шара до столкновения, u_1 и u_2 – скорости шаров после столкновения. Так как удар центральный, будем рассматривать модули величин (рис. 4.19, 4.20).

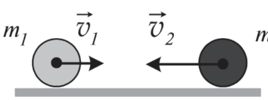


Рис. 4.19 До удара

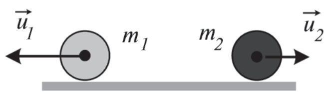


Рис. 4.20 После удара

Законы сохранения имеют вид:

$$m_1\upsilon_1 + m_2\upsilon_2 = m_1u_1 + m_2u_2, \tag{1}$$

$$\frac{m_1\upsilon_1^2}{2} + \frac{m_2\upsilon_2^2}{2} = \frac{m_1u_1^2}{2} + \frac{m_2u_2^2}{2}. \tag{2}$$

Произведя преобразования в данных выражениях (1), (2), получим:

$$m_1(\upsilon_1 - u_1) = m_2(u_2 - \upsilon_2), \tag{3}$$

$$m_1(\upsilon_1^2 - u_1^2) = m_2(u_2^2 - \upsilon_2^2), \tag{4}$$

откуда, поделив уравнение (4) на (3), получим:

$$\upsilon_1 + u_1 = \upsilon_2 + u_2. \tag{5}$$

Решая совместно уравнения (3), (4), (5),
можно найти скорости u_1 и u_2:

$$u_1 = \frac{(m_1 - m_2)\upsilon_1 + 2m_2\upsilon_2}{m_1 + m_2}, \tag{6}$$

$$u_2 = \frac{(m_2 - m_1)\upsilon_2 + 2m_1\upsilon_1}{m_1 + m_2}. \qquad (7)$$

Если $m_1 = m_2$, тогда выражения (6) и (7) будут иметь вид:

$u_1 = \upsilon_2$ и $u_2 = \upsilon_1$, то есть шары равной массы обмениваются скоростями. Если до взаимодействия один из шаров был неподвижен, то после удара он приобретет скорость второго шара, который после удара остановится.

Нецентральный абсолютно упругий удар при $m_1 = m_2$

Скорости тел (бильярдных шаров) до и после столкновения не направлены по одной прямой (рис. 4.21).

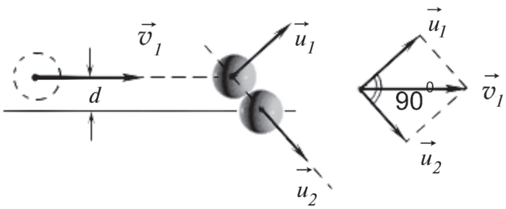


Рис. 4.21

После нецентрального соударения шары разлетаются под некоторым углом друг к другу.

При $m_1 = m_2 = m$ законы сохранения импульса и энергии принимают вид:

$$\vec{\upsilon}_1 = \vec{u}_1 + \vec{u}_2, \qquad \upsilon_1^2 = u_1^2 + u_2^2.$$

Первое из этих равенств означает, что векторы скоростей $\vec{\upsilon}_1$, $\vec{u}_1$ и $\vec{u}_2$ образуют треугольник (диаграмма импульсов), а второе – что для этого треугольника справедлива теорема Пифагора, т.е. он прямоугольный. Угол между катетами $\vec{u}_1$ и $\vec{u}_2$ равен 90°.

При ***абсолютно упругом ударе о стенку*** угол отражения равен углу падения (рис. 4.22).

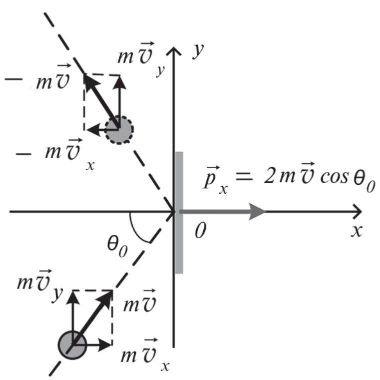


Рис. 4.22

При упругом ударе шарика о стенку изменение проекции импульса шарика на ось $0y$ равно нулю: $\Delta p_y = \Delta(m\upsilon_y) = 0$. Нормальная компонента импульса шарика (проекция на ось OX) $m\vec{\upsilon}_x$ изменяет знак так, что стенке передается импульс равный удвоенному значению нормальной проекции импульса шарика.

$$\vec{p}_x = 2m\vec{\upsilon}_x = 2m\vec{\upsilon}\cos\theta_0.$$

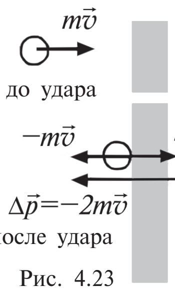


Рис. 4.23

При перпендикулярном (лобовом) абсолютно упругом ударе в стенку шар отражается и летит в противоположную сторону с тем же импульсом. Изменение импульса шара (и стенки) равно $|2m\upsilon|$ (рис. 4.23).

$$\Delta\vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1 = -m\vec{\upsilon} - m\vec{\upsilon} = -2m\vec{\upsilon}.$$

***Абсолютно неупругим ударом** называют такое ударное взаимодействие, при котором тела движутся дальше, как одно тело с одинаковой скоростью.*

При абсолютно неупругом ударе механическая энергия не сохраняется. Она частично переходит во внутреннюю энергию тел (нагревание).

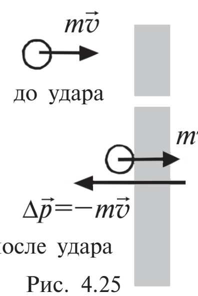


Рис. 4.25

При ***неупругом ударе о стенку*** изменение импульса равно $|\Delta\rho| = |m\upsilon|$, (рис. 4.25).

$$\Delta\vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1 = 0 - m\vec{\upsilon} = -m\vec{\upsilon}.$$

Примером абсолютно неупругого удара может служить попадание пули в ***баллистический маятник*** (рис. 4.24).

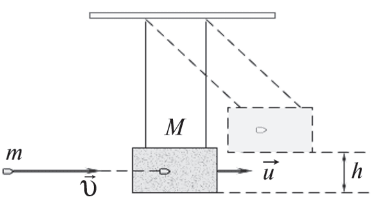


Рис. 4.24

Баллистический маятник представляет собой ящик с песком массой M, подвешенный на веревках. Пуля массой m, летящая горизонтально со скоростью $\vec{\upsilon}$, попадает в ящик с песком и застревает в нем.

По отклонению маятника можно определить скорость пули.

Обозначим скорость ящика с застрявшей в нем пулей через $\vec{u}$. Тогда по закону сохранения импульса:

$$m\upsilon = (M + m)u \;\Rightarrow\; u = \frac{m}{M + m}\upsilon.$$

При застревании пули в песке произошла потеря механической энергии: $\Delta E = \dfrac{m\upsilon^2}{2} - \dfrac{(M + m)u^2}{2} = \dfrac{M}{(M + m)}\dfrac{m\upsilon^2}{2}$.

Отношение $\frac{M}{(M+m)}$ – доля кинетической энергии пули, перешедшая во внутреннюю энергию системы: $\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{M}{M+m} = \frac{1}{1+\frac{m}{M}}$.

Эта формула применима не только к баллистическому маятнику, но и к любому неупругому соударению двух тел с разными массами.

При $m << M$, $\frac{\Delta E}{E_0} \to 1$, то есть почти вся кинетическая энергия пули переходит во внутреннюю энергию.

При $m = M$, $\frac{\Delta E}{E_0} \to \frac{1}{2}$ – во внутреннюю энергию переходит половина первоначальной кинетической энергии.

При ($m >> M$), $\frac{\Delta E}{E_0} \to 0$, то есть при неупругом соударении движущегося тела большой массы с неподвижным телом малой массы перехода во внутреннюю энергию практически нет.

Дальнейшее движение маятника можно рассчитать с помощью закона сохранения механической энергии:

$$\frac{(M+m)u^2}{2} = (M+m)gh, \qquad u^2 = 2gh,$$

где h – максимальная высота подъема маятника.

Из этих соотношений следует: $\upsilon = \frac{M+m}{m}\sqrt{2gh}$.

Измеряя на опыте высоту h подъема маятника, можно определить скорость пули υ.

Вопросы и задания

1. *Что называется импульсом тела и импульсом силы?*
2. *Запишите второй закон Ньютона в импульсной формулировке.*
3. *Выведите закон сохранения импульсов.*
4. *Объясните принцип реактивного движения. Как увеличить скорость ракеты?*
5. *По какой формуле вычисляется работа в механике? Сформулируйте определение единицы работы в СИ.*
6. *Когда работа бывает отрицательной, а когда положительной?*

7. При каком условии сила, приложенная к движущемуся телу, не совершает работы?
8. Что называется мощностью? В каких единицах измеряется мощность?
9. Что такое кинетическая энергия? Выведите теорему о кинетической энергии.
10. Какую энергию называют потенциальной энергией?
11. Как определяется потенциальная энергия деформированной пружины? Чему равна работа силы упругости?
12. Выведите формулу закона сохранения полной механической энергии.
13. Объясните закон сохранения энергии с учетом сил трения. Работа силы трения.
14. Что называется коэффициентом полезного действия? Почему КПД механизмов и машин $\eta < 1$?
15. Какой удар называется неупругим? Какой упругим?
16. Какие законы сохранения действуют при неупругом и упругом ударах?
17. Как изменяется скорость при упругом центральном ударе шаров одинаковой массы?
18. Тело массой 200 г равномерно вращается по окружности со скоростью 10 м/с. Найти изменение импульса через 1/2 периода, 1/3 периода, 1/4 периода, 1/6 периода.
19. Лодочный мотор мощностью 15 кВт развивает силу тяги 3000 Н. С какой наибольшей скоростью может двигаться лодка?
20. Тело массой 1 кг вращается на нити в вертикальной плоскости. На сколько отличаются силы натяжения нити в верхнем и нижнем положениях?

Тестовые задания

1. (99/10-33). Мяч массой 200 г, ударившись о стену перпендикулярно со скоростью 5 м/с, отскакивает назад с такой же скоростью. Определите модуль изменения импульса мяча (в кг·м/с).

A) 4. B) 2. C) 1. D) 3. E) 0,5.

2. (99/7-13). Два одинаковых шара, движущихся навстречу друг другу со скоростями 2υ и υ столкнулись абсолютно неупруго. Найти их скорость после столкновения.

A) υ. B) $\upsilon/3$. C) 2υ. D) $1,5\upsilon$. E) $\upsilon/2$.

3. (99/10-26). Движение тела массой 4 кг описывается уравнением $x = 20 + 8t + 3t^2$. На сколько к·гм/с изменится его импульс через 2 с?

A) 20. B) 32. C) 48. D) 80. E) 96.

4. (98/7-19). После пяти последовательных выстрелов из ружья охотника, стоящего в лодке, лодка остановилась. Масса охотника с лод-

кой 200 кг, масса одной пули 20 г, а скорость вылета пули 800 м/с. Оцените начальную скорость лодки.

A) 0,1 м/с. B) 0,2 м/с. C) 0,8 м/с. D) 0,4 м/с.
E) 1,6 м/с.

5. (00/2-25). Найдите импульс системы тел (кг·м/с). $m_1 = m_2 = 1$ кг, а $2\upsilon_1 = \upsilon_2 = 20$ м/с.

A) 10. B) 8. C) 2. D) 0. E) 20.

6. (00/1-20). На тело массой 2 кг в течение 5 с действует сила 2Н. Определите изменение импульса тела (кг · м/с)?

A) 0. B) 2. C) 4. D) 10. E) 8.

7. (02/9-12). Тело массой 0,2 кг падает с высоты 1 м с ускорением 8 м/с^2. Определите изменение импульса тела за время полета (в кг·м/с).

A) 8. B) 1,6. C) 1. D) 0,8. E) 0,2.

8. (00/1-27). Проекции импульса тела на координатные оси равны p_x=3 кг · м/с и p_y= 4 кг · м/с. Найдите импульс тела (кг · м/с).

A) 4. B) 5. C) 7. D) 12. E) 3.

9. (03/8-14). Масса пистолета в 100 раз больше массы пули. Какова скорость отдачи пистолета, если скорость пули равна υ?

A) 0. B) υ/2. C) υ. D) υ/100. E) 100 υ.

10. (03/5-18). Лодка массой 120 кг с рыбаком массой 80 кг покоится на поверхности озера. Когда рыбак перешел с кормы на нос лодки, она переместилась относительно воды на 1 м. Какова длина лодки (м)? Сопротивлением воды на движение лодки пренебречь.

A) 4. B) 2,5. C) 2. D) 1,5. E) 1,25.

11. (03/8-65). Какова реактивная сила (кН), действующая на ракету, если ежесекундно из нее выбрасывается 20 кг газов со скоростью 450 м/с (кН)?

A) 4,5. B) 6,5. C) 12. D) 22,5. E) 9.

12. (02/12-23). Молот массой 1 т падает свободно с высоты 1,8 м на наковальню. Продолжительность удара 0,01 с. Определите среднее значение силы удара (в кН), считая удар неупругим.

A) 3. B) 25. C) 60. D) 300. E) 600.

13. (98/4-25). Найдите кинетическую энергию тела массой 5 кг, свободно падающего с высоты 10 м без начальной скорости, в середине пути. g=10 м/с^2.

A) 10 Дж. B) 200 Дж. C) 100 Дж.
D) 20 Дж. E) 250 Дж.

14. (01/1-19). Тело обладает кинетической энергией $E_к$=100 Дж и импульсом p=20 кг · м/с. Чему равна масса тела (кг)?

A) 16. B) 8. C) 4. D) 2. E) 1.

15. (01/2-6). Тело движется со скоростью v и сталкивается с покоящимся телом такой же массы. Угол между направлениями векторов скоростей тел после абсолютно упругого удара равен ...

A) 0. B) 0÷90°. C) 90°. D) 180°. E) 0÷180°.

16. (99/7-4). На какую высоту (в метрах) поднимется тело, брошенное под углом к горизонту со скоростью 20 м/с, если его минимальная скорость во время полета равна 10 м/с? g=10 м/с^2.

A) 5. B) 25. C) 20. D) 15. E) 10.

17. (98.11). Пружина под действием силы 2 кН сжалась на 4 см. Какую работу надо совершить, чтобы эту пружину сжать на 12 см?

A) 360. B) 300. C) 200. D) 180. E) 400.

18. (98/10-30). Тело массой 10 кг падает с высоты 10 м. Какова сумма кинетической и потенциальной энергий тела в середине пути? g=10 м/с^2.

A) 100 Дж. B) 1000 Дж. C) 98 Дж. D) 500 Дж. E) 9,8 Дж.

19. (99/10-29). С какой начальной скоростью надо бросить вниз мяч с высоты h, чтобы он подпрыгнул на высоту 3h? Считать удар о землю абсолютно упругим

A) $\sqrt{2gh}$. *B)* $\sqrt{gh}$. *C)* $3\sqrt{gh}$. *D)* $2gh$. *E)* $2\sqrt{gh}$.

20. (01/1-30). Сила натяжения нити математического маятника длиной L при прохождении им положения равновесия равна 2 mg. С какой высоты над уровнем положения равновесия стартовал маятник?

A) L/2. B) L/4. C) L. D) 1,5L. E) 2L.

21 .(10-68). Тело падает свободно с высоты h. Какова его скорость в точке, где его потенциальная энергия равна кинетической?

A) $\sqrt{4gh}$. *B)* $\sqrt{2gh}$. *C)* $\sqrt{gh}$. *D)* $\sqrt{\frac{gh}{2}}$. *E)* $\sqrt{\frac{gh}{4}}$.

22. (8-18). Шар массой m, движущийся со скоростью v, сталкивается с таким же покоящимся шаром. Какова общая кинетическая энергия шаров после столкновения, если столкновение центральное и неупругое?

A) 0. *B)* $\frac{m\upsilon^2}{2}$. *C)* $\frac{m\upsilon^2}{16}$. *D)* $\frac{m\upsilon^2}{4}$. *E)* $\frac{m\upsilon^2}{8}$.

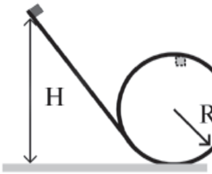
23. (99/10-72). Груз, закрепленный на пружине, оттянули на расстояние x и отпустили. На каком расстоянии груза от положения равновесия кинетическая и потенциальная энергии системы равны между собой?

A) x/8. B) x/2. C) x/4. D) 3x/4. E) $x/\sqrt{2}$.

24. (98/6-16). Тело массой 1 кг, двигаясь без начальной скорости по наклонной плоскости длиной 5м и углом наклона 30°, в нижней точке достигло скорости 6 м/с. Найдите работу, совершаемую против силы трения (в джоулях). sin30°=0,5; cos30°=0,87; g=10 м/с ^{2} .

A) 7 Дж. B) 6 Дж. C) 5 Дж. D) 3 Дж. E) 1 Дж.

25. (11-). Небольшое тело соскальзывает без трения по желобу в форме мертвой петли. С какой наименьшей высоты Н должно начать скользить тело, чтобы не оторваться от желоба?



A) 4,5 R. B) 2 R. C) 3 R. D) 2,5R. E) 3,5 R.

26. (03/6-14). Пуля, летящая горизонтально, попала в шар, подвешенный на невесомом стержне, и застряла в нем. При этом стержень отклонился на угол 60°. Какова была скорость пули (м/с), если масса шара в 100 раз больше массы пули и расстояние от точки подвеса стержня до центра шара равно 1,6 м?

A) 160. B) 320. C) 500. D) 480. E) 400.

27. (01/1-35). Скорость тела, брошенного под углом к горизонту со скоростью υ_0, в высшей точке траектории, находящейся на высоте h, равна

A) $\upsilon_0 - \sqrt{gh}$. *B)* $\sqrt{\upsilon_0^2 + 2gh}$. *C)* $\upsilon_0 + \sqrt{gh}$.

D) $\sqrt{\upsilon_0^2 - 2gh}$. *E)* $\sqrt{2gh - \upsilon_0^2}$.

28. (03/9-7). Маятник массой 1 кг и длиной 2 м отклонен до горизонтального положения и отпущен. Каково натяжение нити (Н) в момент, когда маятник проходит положение равновесия?

A) 40. B) 30. C) 20. D) 15. E) 10.

29. (01/2-7). КПД двигателя механизма, имеющего мощность 400 кВт и двигающегося равномерно со скоростью 5 м/с при силе сопротивления движению 20 кН, равен (%):

A) 20. B) 25. C) 40. D) 80. E) 50.

30. Санки массой 10 кг скатились с горы высотой 5 м и остановились на горизонтальном участке. Какую минимальную работу (Дж) совершит мальчик, возвращая санки по линии их скатывания?

A) 100. B) 500. C) 1000. D) 1200. E) 2000.

Глава V
ВРАЩЕНИЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА

§ 30. Движение центра массы твердого тела

Во многих задачах рассматривается случай, когда ось вращения твердого тела проходит через его *центр массы*. Положение x_C, y_C центра масс для простого случая системы из двух частиц с массами m_1 и m_2, расположенными в плоскости XY в точках с координатами x_1, y_1 и x_2, y_2 (рис. 5.1), определяется выражениями:

$$x_C = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2};$$

$$y_C = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2}{m_1 + m_2}.$$

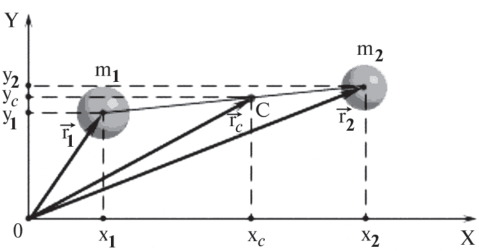


Рис. 5.1

Аналогично, для системы из многих частиц радиус-вектор центра масс определяется выражением:

$$\vec{r}_C = \frac{\Sigma m_i \vec{r}_i}{\Sigma m_i}.$$

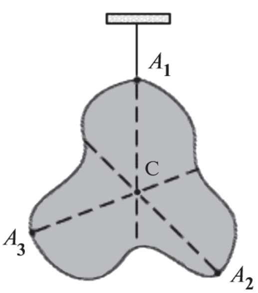


Рис. 5.2

Для сплошного тела суммы в выражении для $\vec{r}_c$ заменяются интегралами. В однородном поле тяготения центр масс совпадает с центром тяжести.

Положение центра масс тела сложной формы можно практически определить путем последовательного подвешивания его за несколько точек и отмечая по отвесу вертикальные линии. A_1, A_2, A_3 – точки подвеса (рис. 5.2).

Если тело подвешено за центр масс, то оно находится в безразличном состоянии равновесия.

Равнодействующая сил тяжести в однородном поле тяготения приложена к центру массы тела.

В механике доказывается теорема о движении центра масс: *под действием внешних сил центр масс любого тела или системы взаимо-*

Рис. 5.3

действующих тел движется как материальная точка, в которой сосредоточена вся масса системы.

Иллюстрацией этого утверждения может служить рис. 5.3, на котором изображено движение тела под действием силы тяжести.

Центр масс тела движется по параболической траектории как материальная точка, в то время как все другие точки движутся по более сложным траекториям.

§ 31. Кинетическая энергия вращающегося тела. Момент инерции тела относительно неподвижной оси

Рассмотрим вращение абсолютно твердого тела произвольной формы (рис. 5.4).

Абсолютно твердым телом *называется тело, которое не деформируется, и ни при каких условиях расстояние между двумя частицами тела не изменяется.*

Разобьем вращающееся абсолютно твердое тело на малые элементы Δm_i. Расстояния от элементов до неподвижной оси $O\,O_1$ вращения обозначим через r_i, модули линейных скоростей – через υ_i. Малые элементы Δm_i, вращающиеся по окружностям с разными радиусами r_i, будут иметь различные линейные скорости υ_i.

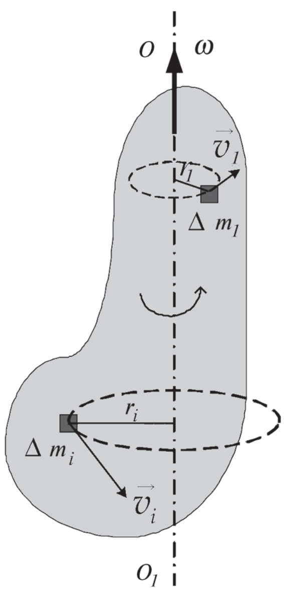


Рис. 5.4

Все точки абсолютно твердого тела движутся с одинаковыми угловыми скоростями: $\omega_1 = \omega_2 = \ldots = \omega$.

Кинетическую энергию вращающегося тела можно найти как сумму кинетических энергий его малых элементов и записать в виде:

$$E_k = \sum_i \frac{\Delta m_i \upsilon_i^2}{2} = \sum_i \frac{\Delta m_i (r_i \omega)^2}{2} = \frac{\omega^2}{2} \sum_i \Delta m_i r_i^2 .$$

Моментом инерции *системы (тела) относительно оси вращения называется физическая величина, равная сумме произведений масс материальных точек системы на квадраты их расстояний до рассматриваемой оси:*

$$I = \sum_i \Delta m_i r_i^2 .$$

В пределе при $\Delta m \to 0$ эта сумма переходит в интеграл. Единица измерения момента инерции в СИ – килограмм-метр в квадрате ($кг \cdot м^2$). Таким образом, кинетическую энергию твердого тела, вращающегося относительно неподвижной оси, можно представить в виде

$$E_k = \frac{I\omega^2}{2}.$$

Эта формула очень похожа на выражение для кинетической энергии поступательно движущегося тела $\frac{m\upsilon^2}{2}$, только теперь вместо массы m в формулу входит момент инерции I, а вместо линейной скорости υ – угловая скорость ω.

Момент инерции тел разной конфигурации. На (рис. 5.5) изображены однородные твердые тела различной формы и указаны моменты инерции этих тел относительно оси, проходящей через центр масс.

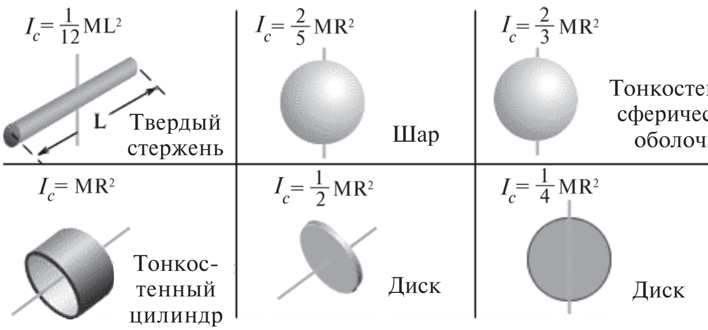


Рис. 5.5

Момент инерции в динамике вращательного движения играет ту же роль, что и масса тела в динамике поступательного движения. Но есть и принципиальная разница. Если масса – внутреннее свойство данного тела, не зависящее от его движения, то момент инерции тела зависит от того, вокруг какой оси оно вращается. Для разных осей вращения моменты инерции одного и того же тела различны.

Теорема Штейнера. Если твердое тело вращается относительно некоторой неподвижной оси, то его момент инерции I можно выразить через момент инерции I_C этого тела относительно оси, проходящей через центр масс тела и параллельной первой.

$$I_P = I_C + md^2,$$

где m – полная масса тела, d – расстояние между осями. Это утверждение называют ***теоремой Штейнера*** (теоремой о параллельном переносе оси вращения).

Плоское движение. Любое движение твердого тела можно представить как сумму двух движений: поступательного движения со скоростью центра масс тела и вращения относительно оси, проходящей через центр масс. Примером может служить колесо, которое катится без проскальзывания по горизонтальной поверхности (рис. 5.6). При качении колеса все его точки движутся в плоскостях, параллельных плоскости рисунка. Такое движение называется *плоским*.

При плоском движении кинетическая энергия движущегося твердого тела равна сумме кинетической энергии поступательного движения и кинетической энергии вращения относительно оси, проходящей через центр масс тела и перпендикулярной плоскостям, в которых движутся все точки тела:

$$E_k = \frac{m\upsilon_C^2}{2} + \frac{I_C\omega^2}{2},$$

где m – полная масса тела, I_C – момент инерции тела относительно оси, проходящей через центр масс.

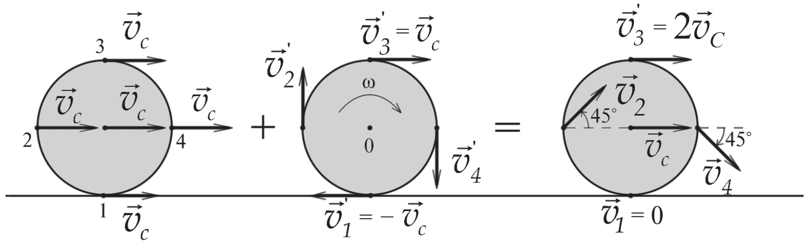


Рис. 5.6

Качение колеса (3) как сумма поступательного движения (1) со скоростью $\vec{\upsilon}_C$ и вращения (2) с угловой скоростью $\omega = \dfrac{\upsilon_C}{R}$ относительно оси O, проходящей через центр масс.

§ 32. Основное уравнение динамики вращательного движения

Рассмотрим вращение абсолютно твердого тела относительно оси, перпендикулярной плоскости рисунка и проходящей через точку 0. (рис. 5.7)

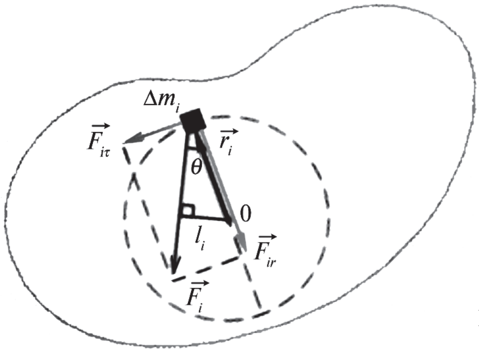


Рис. 5.7

Выделим произвольный малый элемент массы Δm_i. На него действуют внешние и внутренние силы. Равнодействующая всех сил есть $\vec{F}_i$. Ее можно разложить на две составляющие: касательную составляющую $\vec{F}_{i\tau}$ и радиальную – $\vec{F}_{ir}$.

Радиальная составляющая создает центростремительное ускорение a_n. Касательная составляющая $\vec{F}_{ir}$ вызывает тангенциальное ускорение $\vec{a}_{i\tau}$ массы Δm_i. Второй закон Ньютона в скалярной форме дает: $\Delta m_i a_{i\tau}=F_{i\tau}=F_i \sin\theta$ или $\Delta m_i r_i \varepsilon=F_i \sin\theta$,

где $\varepsilon = \dfrac{a_{i\tau}}{r_i}$ – угловое ускорение всех точек твердого тела.

Если обе части написанного выше уравнения умножить на r_i, то получим: $\Delta m_i r_i^2 \varepsilon = F_i r_i \sin\theta = F_i l_i = M_i$.

Здесь l_i – плечо силы $\vec{F}_i$, M_i – момент силы.

Теперь нужно аналогичные соотношения записать для всех элементов массы Δm_i вращающегося твердого тела, а затем просуммировать левые и правые части. Это дает:

$$\sum_{i=1}^{n} \Delta m_i r_i^2 \varepsilon = \sum_{i=1}^{n} M_i, \qquad I = \sum_i \Delta m_i r_i^2.$$

Стоящая в правой части сумма моментов сил, действующих на различные точки твердого тела, состоит из суммы моментов всех внешних сил и суммы моментов всех внутренних сил.

$$\sum_{i=1}^{n} M = \sum_{i=1}^{n} (M_{i_{\text{внешн}}}) + \sum_{i=1}^{n} (M_{i_{\text{внутр}}}).$$

Но сумма моментов всех внутренних сил согласно третьему закону Ньютона равна нулю, поэтому в правой части остается только сумма моментов всех внешних сил, которые будем обозначать через *M*. В итоге:

$$I\varepsilon = M.$$

Это и есть основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела.

Аналогия поступательного и вращательного движений.

Сопоставим основные величины и формулы поступательного и вращательного движений твердого тела, подчеркнув их аналогию.

Поступательное движение		**Вращательное движение**	
Путь	S	Угол поворота	φ
Скорость	$\upsilon = \dfrac{dS}{dt}$	Уголовая скорость	$\omega = \dfrac{d\varphi}{dt}$
Линейное ускорение	$a = \dfrac{d\upsilon}{dt}$	Уголовое ускорение	$\varepsilon = \dfrac{d\omega}{dt}$
Масса	m	Момент инерции	$I = \sum_i \Delta m_i r_i^2$
Сила	F	Момент силы	$M = F1$
Импульс	$p = m\upsilon$	Момент импульса	$L = I\omega$
$F = ma,$ $F = \dfrac{dp}{dt}$	Основное управление динамики		$M = I\varepsilon$ $M = \dfrac{dL}{dt}$
$A = FS$	Работа		$A = M\varphi$
$P = F\upsilon$	Мощность		$P = M\omega$
$E_k = \dfrac{m\upsilon^2}{2}$	Кинетическая энергия		$E_k = \dfrac{I\omega^2}{2}$

§ 33. Закон сохранения момента импульса

Моментом импульса L_i *отдельной частицы тела массой* Δm_i *называют физическую величину, равную произведению расстояния* r_i *от оси вращения до частицы на импульс* $\Delta m_i \upsilon_i$ *этой частицы:*

$$L_i = \Delta m_i \upsilon_i r_i.$$

Момент импульса L *вращающегося тела относительно оси есть сумма моментов импульса отдельных частиц:*

$$L = \sum_{i-1}^{n} \Delta m_i \upsilon_i r_i.$$

Так как для вращательного движения $\upsilon_i = \omega r_i$, то

$$L = \sum_{i=1}^{n} \Delta m_i r_i^2 \omega = \omega \sum_{i=1}^{n} \Delta m_i r_i^2 = I\omega.$$

Таким образом, момент импульса L *тела равен произведению момента инерции тела* I *на угловую скорость* ω *его вращения:*

$$L = I\omega.$$

Поскольку $\varepsilon = \dfrac{\Delta\omega}{\Delta t}$; $(\Delta t \to 0)$ уравнение вращательного движения можно представить в виде:

$$M = I\varepsilon = I\frac{\Delta\omega}{\Delta t} \qquad \text{или} \qquad M\Delta t = I\Delta\omega = \Delta L.$$

Окончательно будем иметь:

$$M = \frac{\Delta L}{\Delta t}; \qquad (\Delta t \to 0).$$

Если суммарный момент M *внешних сил, действующих на тело, равен нулю, то момент импульса* $L = I\omega$ *относительно данной оси сохраняется:* $\Delta L = 0$, *если* $M = 0$. Следовательно, $L = I\omega = \text{const}$.

Это и есть ***закон сохранения момента импульса.***

Продемонстрировать сохранение момента количества движения можно с помощью скамьи Жуковского (рис. 5.8).

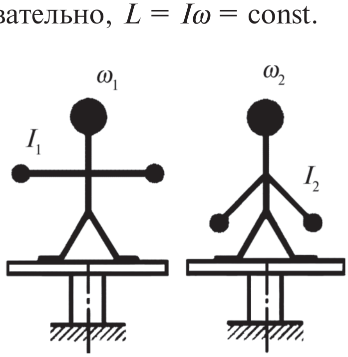


Рис. 5.8

Пусть человек, стоящий на скамье, которая без трения вращается вокруг вертикальной оси, и держащий в поднятых на уровне плеч руках гири (рис. 5.8), приведен во вращение с угловой скоростью ω_1. Человек обладает некоторым момен-

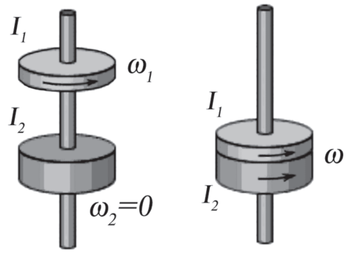


Рис. 5.9

том количества движения, который сохраняется. Если он опустит руки, то его момент инерции уменьшится, в результате чего возрастет угловая скорость ω_2 его вращения.

Так как $I_1\omega_1 = I_2\omega_2$ и $I_1 > I_2$, то $\omega_1 < \omega_2$.

Аналогично, гимнаст во время прыжка через голову поджимает к туловищу руки и ноги (группируется), чтобы уменьшить свой момент инерции и увеличить тем самым угловую скорость вращения.

Иллюстрацией этого закона может также служить неупругое вращательное столкновение двух дисков, насаженных на общую ось (рис. 5.9).

Закон сохранения момента импульса в этом случае примет вид:

$$I_1\omega_1 = (I_1 + I_2)\omega.$$

Вопросы и задания

1. Что называется моментом инерции тела относительно оси вращения?

2. Запишите формулу кинетической энергии тела, вращающегося относительно неподвижной оси.

3. Как практически можно определить положение центра масс тела сложной формы?

4. Как определить кинетическую энергия колеса, которое катится без проскальзывания по горизонтальной поверхности?

5. В чем суть теоремы о движении центра масс?

6. Сформулируйте теорему Штейнера и запишите формулу.

7. Что называется моментом силы? Что называется плечом силы?

8. Какую физическую величину называют моментом импульса?

9. Запишите основное уравнение динамики вращательного движения.

10. Сформулируйте закон сохранения момента импульса. Приведите примеры его проявлений.

11. Составьте аналогии величин и формул поступательного и вращательного движений.

12. Сопоставьте формулы, характеризующие поступательное и вращательное движения.

Глава VI
ГИДРОАЭРОМЕХАНИКА

Гидроаэромеханика – раздел механики, изучающий равновесие и движение жидкостей и газов, их взаимодействие между собой и обтекаемыми ими твердыми телами.

Хотя свойства жидкостей и газов во многом отличаются, в ряде механических явлений их поведение описывается одинаковыми параметрами и идентичными уравнениями. Поэтому гидроаэромеханика использует единый подход к изучению жидкостей и газов. Жидкости и газы рассматриваются как *сплошные среды*, непрерывно распределенные в занятой ими части пространства.

Молекулы газа, совершая беспорядочное, хаотическое движение, слабо связаны силами взаимодействия, поэтому они движутся свободно и в результате соударений стремятся разлететься во все стороны, заполняя весь предоставленный им объем, то есть объем газа определяется объемом сосуда, который он занимает. Плотность газов зависит от давления.

Жидкость, как и газ принимает форму сосуда, в который она заключена. В жидкостях, в отличие от газов, молекулы расположены близко друг к другу, среднее расстояние между молекулами остается практически постоянным, поэтому жидкость обладает неизменным объемом. Плотность жидкости очень слабо зависит от давления.

§ 34. Давление в жидкостях и газах

На тело, погруженное в жидкость (или газ), действуют силы со стороны жидкости и оказывают давление на тело.

Давлением называется физическая величина равная отношению модуля силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности: $p = \dfrac{F}{S}$.

Давление измеряется в паскалях $1Па = 1\dfrac{Н}{м^2}$.

Один паскаль это такое давление, которое производит сила в 1Н, действующая на поверхность площадью 1 м², перпендикулярно этой поверхности.

Используются также внесистемные единицы: нормальная атмосфера (*атм*) и миллиметр ртутного столба:

1 атм = 101325 Па = 760 мм рт. ст. или *1 атм* $\approx 10^5$ *Па.*

1 мм рт. ст. $\approx$ *133,3 Па.*

Для увеличения давления можно увеличить силу или уменьшить площадь поверхности, для уменьшения давления – наоборот, уменьшить силу и увеличить площадь поверхности.

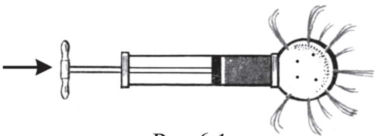


Рис.6.1

Закон Паскаля: *давление, производимое на жидкость или газ, передается без изменения в каждую точку жидкости или газа* (рис. 6.1).

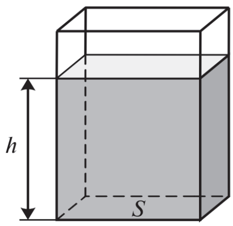


Рис.6.2

Давление жидкости на дно сосуда. Пусть сосуд с основанием площадью S, заполнен жидкостью плотностью ρ до высоты h (рис. 6.2). Тогда давление на дно:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{mg}{S} = \frac{\rho Vg}{S} = \frac{\rho Shg}{S} = \rho gh,$$

$p = \rho gh$ – гидростатическое давление.

С учетом атмосферного давления p_0 давление на дно равно:

$p = \rho gh + p_0$, $(p_0 \approx 10^5 \text{ Па})$.

Давление жидкости на одном горизонтальном уровне во всех точках одинаково.

Формула $p = \rho gh$ показывает, что давление жидкости на дно сосуда зависит только от высоты h и рода жидкости и не зависит от формы сосуда (рис. 6.3).

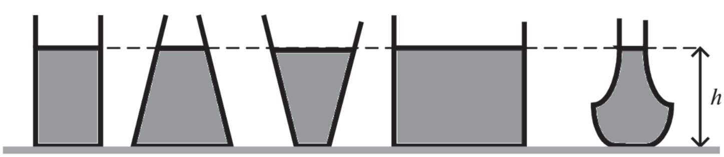


Рис.6.3

Давление жидкости на дно во всех сосудах одинаково.

Гидростатический парадокс

Сила давления жидкости на дно может быть меньше или больше силы тяжести жидкости (рис. 6.4).

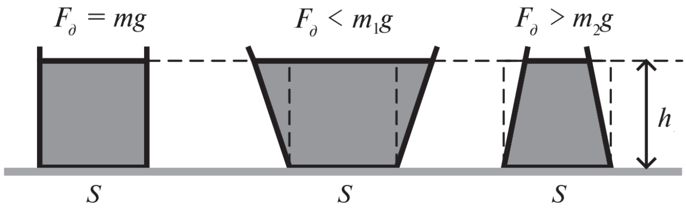


Рис.6.4

В сосудах с одинаковым уровнем жидкости h и одинаковой площадью дна S силы давления жидкости на дно $F_д$ равны:

$$F_д = pS = \rho ghS.$$

Давление жидкости на стенку сосуда

Давление на стенку различно на разных горизонтальных уровнях. Оно возрастает от нуля на поверхности до $p = \rho gh$ на дне. Поэтому давление на стенку равно среднему давлению:

$$p_{ст} = p_{ср} = \frac{p_{\min} + p_{\max}}{2} = \frac{0 + \rho gh}{2} = \frac{1}{2}\rho gh,$$

с учетом атмосферного давления p_0: $p_{ст} = \dfrac{1}{2}\rho gh + p_0$.

§ 35. Сообщающиеся сосуды

Сообщающимися сосудами называются сосуды, соединенные между собой в нижней части.

Закон сообщающихся сосудов:

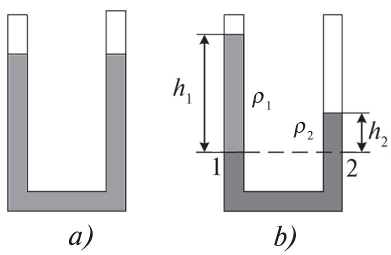


Рис.6.5

В сообщающихся сосудах поверхности однородной жидкости устанавливаются на одном уровне (рис. 6.5 *a*).

Поверхности неоднородных жидкостей в сообщающихся сосудах устанавливаются на различных уровнях (рис 6.5 *b*).

Проведем горизонтальный уровень вдоль границы раздела жидкостей. Давления в точках 1 и 2 на этом уровне одинаковы.

$$\rho_1 = \rho_2, \qquad \rho_1 gh_1 = \rho_2 gh_2, \qquad \frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

Высоты неоднородных жидкостей в сообщающихся сосудах обратно пропорциональны их плотностям.

Более плотная жидкость установится на меньшей высоте (h_2) и наоборот – менее плотная жидкость устанавливается на большей высоте (h_1).

§ 36. Гидравлический пресс

Гидравлический пресс (подъемник) – это гидравлическая машина, принцип работы которой основан на законе Паскаля.

Состоит из двух цилиндров с поршнями разного сечения S_1 и S_2, соединенных в нижней части и заполненных жидким маслом (рис. 6.6).

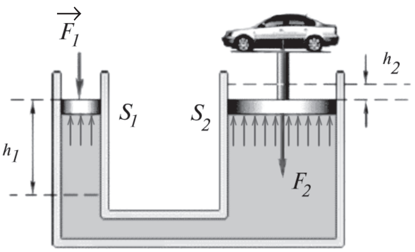


Рис. 6.6

Пусть на малый поршень S_1 действует сила F_1. Под действием этой силы поршень опустится на высоту h_1. При этом большой поршень S_2 поднимется на высоту h_2. Можно подобрать такую силу F_2, действующую на большой поршень S_2, что поршни опять придут в равновесие.

В соответствии с законом Паскаля, давление под поршнями одинаково

$$p_1 = p_2, \qquad \frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}, \qquad F_2 = \frac{S_2}{S_1} F_1. \qquad (1)$$

Гидравлический пресс дает выигрыш в силе в $\frac{S_2}{S_1}$ раз, то есть сила F_2 больше силы F_1 во столько же раз, во сколько раз площадь поршня S_2 больше площади поршня S_1.

При работе гидравлического пресса, объемы перетекающей жидкости равны: $V_1 = V_2, \quad S_1 h_1 = S_2 h_2, \quad \frac{S_2}{S_1} = \frac{h_1}{h_2}.$ (2)

в формуле (1) произведем замену в соответствии с выражением (2) и, применив свойство пропорции, получим:

$$F_2 = \frac{h_1}{h_2} F_1, \quad F_2 h_2 = F_1 h_1, \quad A_1 = A_2.$$

Таким образом, гидравлический пресс не дает выигрыша в работе, что соответствует «золотому правилу» механики.

Гидравлический пресс применяют для прессования различных материалов, штамповки деталей, для поднятия тяжелых грузов (домкрат) и т.п.

§ 37. Закон Архимеда

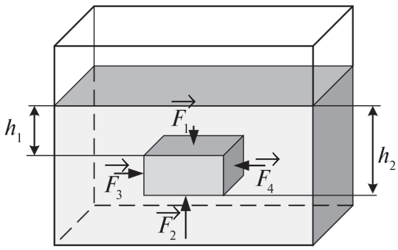


Рис. 6.7

На тело, погруженное в жидкость (или газ), со стороны жидкости действуют силы F_1, F_2, F_3 и F_4 (рис. 6.7). Силы, действующие на боковые грани F_3 и F_4, равны. Сила давления F_2 на нижнюю грань больше силы F_1, действующей на верхнюю грань.

Результирующая этих сил, направленная вертикально вверх, является выталкивающей силой или силой Архимеда:

$$F_A = F_2 - F_1 = p_2 S - p_1 S, \text{ так как } p = \rho_ж gh, \text{ то}$$

$$F_A = \rho_ж gh_2 S - \rho_ж gh_1 S = \rho_ж gS\,(h_2 - h_1) = \rho_ж gSh = \rho_ж gV,$$

где $h = h_2 - h_1$ – высота тела, V – объем тела, $\rho_ж$ – плотность жидкости.

Закон Архимеда: *на тело, погруженное в жидкость (газ), действует выталкивающая сила, направленная вертикально вверх и равная весу вытесненной телом жидкости (или газа)*:

$$F_A = \rho_ж V_T g.$$

Вес тела, погруженного в жидкость, меньше чем в воздухе на величину силы Архимеда $P = mg - F_A$.

§ 38. Плавание тел

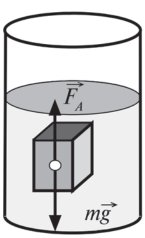


Рис. 6.8

$mg = F_A$, $\rho_T V_T g = \rho_ж V_T g$,

$\rho_T = \rho_ж$ – тело в состоянии безразличного равновесия.

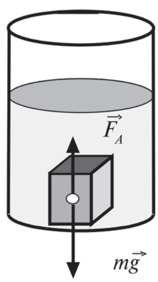


Рис. 6.9

$mg > F_A$, $\rho_T V_T g > \rho_ж V_T g$,

$\rho_T > \rho_ж$ – тело тонет.

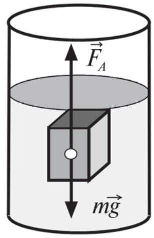


Рис. 6.10

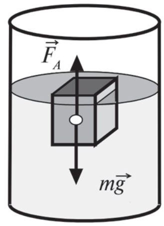


Рис. 6.11

$mg < F_A, \ \rho_T V_T g < \rho_ж V_T g$

$\rho_T < \rho_ж$

Тело всплывает.

$mg = F_A, \ \rho_T V_T g = \rho_ж V_{пчТ} g,$

где $V_{пчТ}$ – объем погруженной части тела.

Тело плавает на поверхности.

Плавание судов

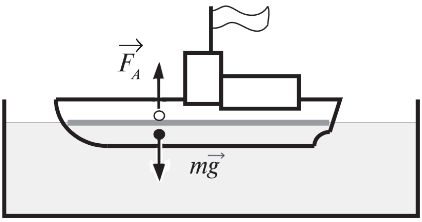


Рис. 6.12

Вес воды, вытесняемой подводной частью судна, равен силе тяжести, действующей на судно с грузом:

$$F_A = mg.$$

Глубину, на которую судно погружается в воду, называют *осадкой* (рис. 6.12).

Наибольшая допустимая осадка отмечена на корпусе судна красной линией, называемой *ватерлинией*.

Вес воды, вытесняемой судном при погружении до ватерлинии, называется *водоизмещением* судна.

Если из водоизмещения вычесть вес судна, то получим грузо*подъемность* этого судна, то есть вес максимального груза, при котором корабль погружается до ватерлинии.

Воздухоплавание

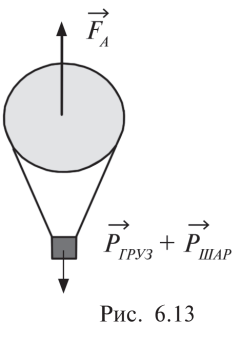


Рис. 6.13

Подъемная сила шара зависит от разности плотностей воздуха и газа, наполняющего шар (рис. 6.13). Докажем это при равномерном движении

$$P_{гр} + P_ш = F_A;$$

$$F_{под} = P_{гр} = F_A - P_ш = \rho_в V_ш g - \rho_г V_ш g.$$

$$F_{под} = (\rho_{воз} - \rho_{газ}) V_ш g.$$

Ареометр – прибор для измерения плотности жидкости.

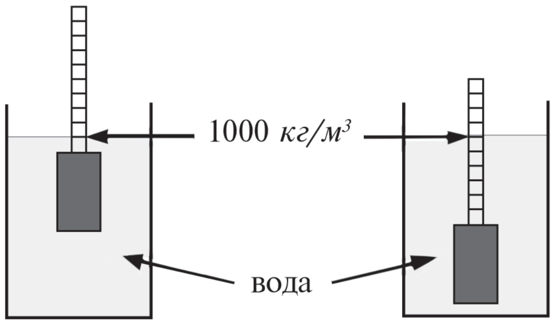


Рис. 6.14

Предназначен для жидкостей, плотности которых меньше плотности воды.

$\rho_{жидкости} < \rho_{воды}$

(молоко, спирт, нефть).

Предназначен для жидкостей, плотности которых больше плотности воды.

$\rho_{жидкости} < \rho_{воды}$

(электролит в аккумуляторе).

§ 39. Уравнение неразрывности

Идеальной жидкостью *называется жидкость, у которой отсутствует внутреннее трение, т. е. трение между слоями жидкости и жидкость является несжимаемой.*

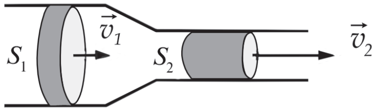


Рис. 6.15

Рассмотрим движение идеальной жидкости в трубе переменного сечения (рис. 6.15). Течение жидкости является *стационарным* (установившимся), то есть скорость в каждой ее точке со временем не меняется.

За равные промежутки времени t через сечение S_2 пройдет такой же объем жидкости, как и через сечение S_1, то есть $V_1 = V_2$. Следовательно:

$$S_1 v_1 t = S_2 v_2 t \Rightarrow$$

$Sv = \text{const}$ – уравнение неразрывности.

Для несжимаемой жидкости при стационарном течении произведение Sv в любом сечении имеет одинаковое значение.

В узком сечении трубы скорость течения жидкости больше, чем в широком.

§ 40. Уравнение Бернули

Рассмотрим стационарное течение идеальной жидкости.

Выделим объем жидкости, ограниченный стенками трубки и сечениями S_1 и S_2.

За время t этот объем сместится вдоль трубки так, что граница S_1 получит перемещение l_1, а граница S_2 – перемещение l_2 (рис. 6.12).

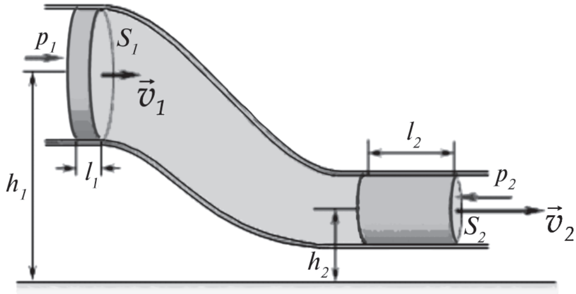


Рис. 6.16

Согласно закону сохранения энергии, изменение полной энергии идеальной несжимаемой жидкости, равно работе сил по перемещению жидкости

$$E_2 - E_1 = A\ . \qquad (1)$$

Силы давления на стенки перпендикулярны к направлению течения, поэтому работы не совершают. Отлична от нуля лишь работа сил давления F_1 и F_2, приложенных к сечениям S_1 и S_2. Эта работа равна:

$$A=A_1 + A_2 = F_1l_1 - F_2l_2 = p_1S_1l_1 - p_2S_2l_2 = (p_1 - p_2)V. \qquad (2)$$

При этом учли, что $S_1\ l_1 = S_2\ l_2 = V$.

Полные энергии E_1 и E_2 будут складываться из кинетической и потенциальной энергий массы m жидкости:

$$E_1 = \frac{m\upsilon_1^2}{2} + mgh_1, \qquad E_2 = \frac{m\upsilon_2^2}{2} + mgh_2. \qquad (3)$$

Подставим формулы (2) и (3) в выражение (1), а также учитывая, что $m = \rho V$, получим: $\dfrac{\rho V\upsilon_2^2}{2} + \rho Vgh_2 - \dfrac{\rho V\upsilon_1^2}{2} - \rho Vgh_1 = (p_1 - p_2)V,$

сократим объем V и разделим переменные:

$$\frac{\rho\upsilon_2^2}{2} + \rho gh_2 + p_2 = \frac{\rho\upsilon_1^2}{2} + \rho gh_1 + p_1. \qquad (4)$$

Так как выбор сечений S_1 и S_2 произволен, то можно утверждать, что:

$$\frac{\rho\upsilon^2}{2} + \rho gh + p = const. \qquad (5)$$

Уравнение (5) и равнозначное ему (4) называется *уравнением Бернули*. Слагаемые в нем имеют названия:

p – *статическое давление*, давление жидкости на поверхность обтекаемого ею тела;

ρgh – *гидростатическое давление*; $\frac{\rho v^2}{2}$ – *динамическое давление.*

Уравнение Бернули выражает закон сохранения энергии применительно к установившемуся течению идеальной жидкости (или газа).

Для горизонтальной трубы полное давление $\frac{\rho v^2}{2} + p = const.$

Уравнение Бернули для горизонтальной трубы совместно с уравнением неразрывности

$$\begin{cases} \frac{\rho v^2}{2} + p = const, \\ Sv = const \end{cases}$$

дают следующий вывод:

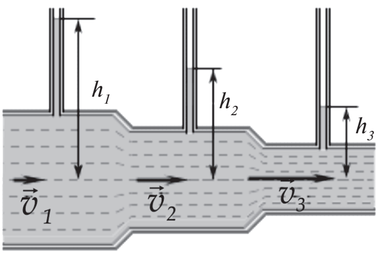


Рис.6.17

При течении жидкости по горизонтальной трубе, имеющей различные сечения, скорость жидкости больше в узких сечениях, а статическое давление больше в широких сечениях, то есть там где скорость меньше.

Этот вывод демонстрируется опытом с измерением давления в потоке жидкости с помощью манометров (рис. 6.17).

$v_1 < v_2 < v_3$; $h_1 > h_2 > h_3$.

Применение уравнений Бернули:

Подъемная сила крыла самолета

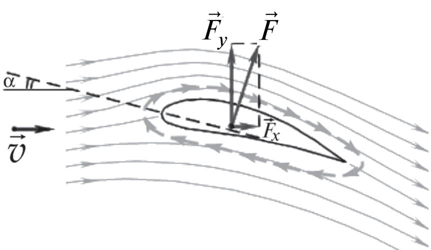


Рис. 6.18

На рис. 6.18 показан профиль крыла самолета. Вследствие асимметричной формы крыла скорость потока воздуха над крылом оказывается больше, чем под крылом, а следовательно давление над крылом меньше давления под крылом. Благодаря этому создается подъемная сила F_y крыла самолета.

Пульверизатор

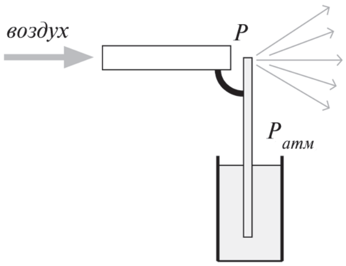


Рис. 6.19

В горизонтальной трубке скорость движения воздуха, подаваемого грушей велика, а давление p в ней и над трубкой, опущенной в жидкость, мало (рис. 6.19). Под действием атмосферного давления $p_{атм}$ жидкость поднимается по вертикальной трубке вверх и разбрызгивается струей воздуха.

На этом же принципе основано действие карбюратора, газовой горелки и водоструйного насоса.

Полет закрученного мяча

Циркуляция воздуха, обусловленная силами вязкого трения, возникает и вокруг вращающегося тела.

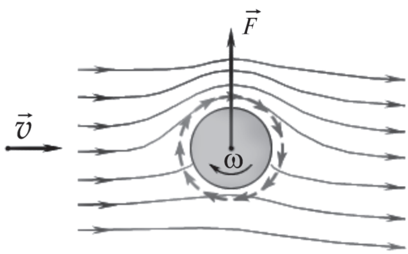


Рис. 6.20

При вращении мяч увлекает прилегающие слои воздуха, вызывая его циркуляцию. В набегающем потоке воздуха возникнет сила бокового давления, аналогичная подъемной силе крыла самолета (рис. 6.20).

Это явление называется ***эффектом Магнуса***, оно проявляется при полете закрученного мяча при игре в теннис или футбол.

§ 41. Истечение жидкости из отверстия

Рассмотрим истечение идеальной несжимаемой жидкости из небольшого S_2 отверстия в широком S_1 открытом сосуде (рис. 6.21).

К данным сечениям S_1 и S_2 применим уравнение Бернули.

Если давления p_1 и p_2 в обоих сечениях одинаковы и равны атмосферному, то уравнение будет иметь вид:

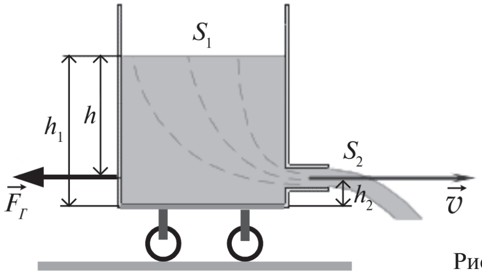


Рис. 6.21

$\frac{\rho \upsilon_2^2}{2} + \rho g h_2 = \frac{\rho \upsilon_1^2}{2} + \rho g h_1$, (1), сократим плотность ρ:

$$\frac{\upsilon_2^2}{2} + g h_2 = \frac{\upsilon_1^2}{2} + g h_1. \qquad (2)$$

Так как $S_1 >> S_2$ и из уравнения

неразрывности: $\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1} = \frac{S_1}{S_2}$, то членом $\frac{\upsilon_1^2}{2}$ можно пренебречь, и тогда получим $\upsilon_2^2 = 2g(h_1 - h_2) = 2gh$ или

$$\upsilon_2 = \sqrt{2gh}. \qquad (3)$$

Выражение (3) называется *формулой Торричелли*.

Заметим, что формула (3) совпадает с формулой для скорости тела, свободно падающего с высоты h.

При истечении струи сосуд испытывает действие силы F_r, называемой *реакцией вытекающей струи*. Если сосуд на тележке, то он придет в движение в направлении противоположном направлению вытекания струи.

Найдем модуль силы реакции вытекающей струи F_r.

Масса жидкости, вытекающей за время t, равна: $m = \rho S \upsilon t$, где S – площадь отверстия, тогда импульс равен $m\upsilon = \rho S t \upsilon^2$, и стенка сосуда получит такой же импульс.

Учитывая, что импульс силы равен изменению импульса тела: $F_r t = \rho S t \upsilon^2$, сократим t и получим: $F_r = \rho S \upsilon^2$. Учитывая, что F_r противоположна скорости истечения жидкости, имеем формулу силы реакции вытекающей струи:

$$F_r = -\rho S \upsilon^2. \qquad (4)$$

Если применить формулу Торричелли (3):

$$F_r = -2\rho S g h. \qquad (5)$$

Из формулы (5) следует, что сила реакции вытекающей струи в два раза превосходит силу гидростатического давления, то есть противоположная стенка сосуда испытывает давление в два раза больше чем та, на котором отверстие.

§ 42. Давление атмосферы

Земная поверхность испытывает давление воздушной оболочки, называемой атмосферой. Это давление называется ***атмосферным давлением.***

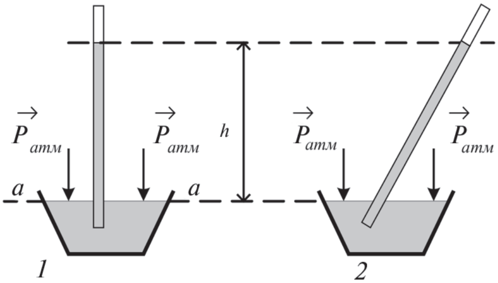


Рис. 6.22

Опыт Э. Торричелли (итальянский ученый, 1642 г.).

Стеклянную трубку длиной около одного метра, запаянную с одного конца, наполняют ртутью до краев, затем, плотно закрыв, переворачивают и опускают в чашку со ртутью и под ртутью открывают конец трубки (рис. 6.22). Часть ртути при этом выливается в чашку, а большая часть остается в трубке. Высота столба ртути h, оставшейся в трубке, равна примерно 760 мм. Над ртутью в трубке безвоздушное пространство («Торричеллева пустота»). Ртуть находится в равновесии, а значит давление во всех точках уровня «а – а» одинаково и равно атмосферному. Давление в трубке на этом уровне создается весом столба ртути, поэтому:

$$p_{атм} = \rho_{рт} gh.$$

Вычислим нормальное атмосферное давление, соответствующее 760 мм ртутного столба в системе СИ:

$$p_{атм} = 13800\,\frac{кг}{м^3} \times 9,8\,\frac{н}{кг} \times 0,76\ м = 101300\ Па \approx 10^5\ Па.$$

$$1\ мм\ рт.\ ст. \approx 133,3\ Па.$$

Чем меньше величина атмосферного давления, тем меньше высота столба ртути в трубке и наоборот. Измеряя высоту h ртути, определяем давление атмосферы в миллиметрах ртутного столба. Такой прибор называется ртутным барометром. Если наклонить трубку Торричелли, то высота h уровня ртути не изменится.

Зависимость атмосферного давления от высоты

Если подниматься над уровнем моря на высоту h (например в горах), то величина атмосферного давления уменьшается из-за уменьшения высоты столба атмосферы (рис. 6.23).

Установлено, что на каждые 12 м высоты давление уменьшается на 1 мм рт.ст. (133 Па).

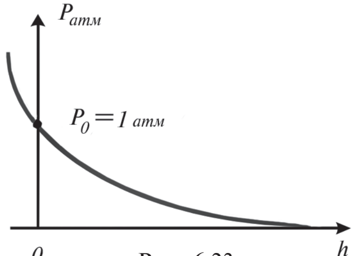


Рис. 6.23

Если опускаться ниже уровня моря, то давление возрастает по той же зависимости, на графике (рис. 6.23) при $h<0$.

Зависимость давления атмосферы от высоты называется *барометрической формулой:* $p = p_0 e^{-\mu g h / RT}$, где:

p_0 – давление на уровне моря, то есть нормальное атмосферное давление; p – давление атмосферы на высоте h;

μ – молярная масса газа (воздуха); T – температура в кельвинах; R – универсальная газовая постоянная.

Эта зависимость позволяет определять высоту, измеряя давление. Барометр, проградуированный в значениях высоты, называется *альтиметром* (высотомером).

Вопросы и задания

1. *Назовите основные свойства жидкостей и газов. Дайте объяснения их на основе молекулярного строения вещества.*
2. *Что называется давлением? В каких единицах оно измеряется?*
3. *Как можно увеличить или уменьшить давление? Приведите примеры.*
4. *Сформулируйте закон Паскаля. Приведите примеры, подтверждающие его справедливость.*
5. *Как определить давление жидкости на дно и стенки сосуда?*
6. *Как давление жидкости зависит от формы сосуда? Как давление жидкости зависит от площади дна сосуда?*
7. *В чем заключается закон сообщающихся сосудов? Приведите примеры сообщающихся сосудов.*
8. *Как располагаются свободные поверхности разнородных жидкостей в сообщающихся сосудах?*
9. *Какой выигрыш в силе дает гидравлический пресс?*
10. *Объясните справедливость «золотого правила» механики на примере гидравлического пресса.*
11. *Сформулируйте закон Архимеда.*
12. *Назовите условия, при которых тело, погруженное в жидкость (газ), тонет, всплывает или находится в состоянии безразличного равновесия.*
13. *Назовите прибор для определения плотности жидкости. Объясните принцип его работы.*
14. *Что называется грузоподъемностью судна?*
15. *От чего зависит подъемная сила аэростата?*
16. *Объясните физический смысл уравнения неразрывности жидкости.*
17. *Выведите уравнение Бернули. Сформулируйте его.*
18. *Получите формулу Торричелли, применяя уравнение Бернули для жидкости, вытекающей из малого отверстия.*

19. Почему молекулы газов, входящих в состав атмосферы, не падают на Землю под действием силы тяжести? Почему эти молекулы не улетают в космическое пространство?

20. Объясните, как при помощи трубки Торричелли можно измерить атмосферное давление?

21. Что представляет собой прибор для определения высоты? Как он называется?

Тестовые задания

1. (98/8-36). В каком направлении будет действовать сила Архимеда на пловца, плывущего в горизонтальном положении?

A) в противоположном направлению движения.
B) в направлении движения. *C) снизу вверх.*
D) сила Архимеда не действует. *E) сверху вниз.*

2. (98/3-18). Если кусочку пластилина придать вначале форму шара, затем куба, цилиндра и конуса, и опустить каждую фигурку в воду, то наибольшая выталкивающая сила действует на:

A) шар. *B) куб.* *C) цилиндр.* *E) конус.*
D) во всех случаях выталкивающая сила одинакова.

3. (99/7-15). Сосуд, наполненный до краев водой висит на динамометре. Как изменится показание динамометра, если в сосуд опустить не тонущее в воде тело?

A) увеличится. *B) не изменится.* *C) уменьшится.*
D) ответ зависит от массы тела. *E) НПО.*

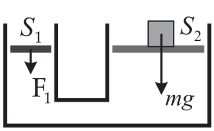
4. (98/8-35). Чему равна плотность однородного тела, если, оно весит в воде в n раз меньше, чем в воздух; ρ − плотность воды.

A) $\frac{n}{n-1}\rho$. *B)* $\frac{n-1}{n}\rho$. *C)* $n\rho$. *D)* ρ. *E)* $\frac{\rho}{n}$.

5. (98/11-). На одной чаше весов, находящихся в равновесии, находится сосуд с водой, а на другой − разновески. Изменится ли равновесие весов, если в воду опустить палец, не касаясь сосуда?

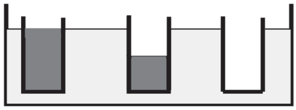
A) чаша с сосудом поднимается.
B) чаша с сосудом сначала опускается, а потом поднимается.
C) равновесие не нарушается.
D) чаша с сосудом опускается. *E) НПО.*

6. (99/3-29). При какой силе F_1, действующей на малый поршень, гидравлический пресс находится в равновесии? Площади поршней равны соответственно S_1=120 см^2, S_2 = 600 см^2.



A) $F_1 = mg$. *B)* $F_1 = 5mg$. *C)* $F_1 < mg$.
D) $F_1 > mg$. *E)* $F1 = mg/5$.

7. (98/2-16). В воду на одинаковую глубину погружены три одинаковых стакана: один наполненный водой, другой наполненный водой наполовину, третий пустой. Как соотносятся архимедовы силы, действующие на них?



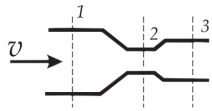
A) $F_1=F_2=F$ *B)* $F_1<F_2<F_3$.

C) $F_1>F_2>F_3$. *D)* $F_2>F_1<F_3$. *E)* $F_3<F_1>F_2$.

8. (03/6-38). Скорость течения воды в широкой части трубы равна 2 м/с. Какова эта скорость (м/с) в узкой части трубы в 2 раза меньшего диаметра?

A) 8. B) 6. C) 4. D) 2. E) 1.

9. (01/12-2). Жидкость течет по трубе с переменным сечением. В каком сечении трубы давление, создаваемое текущей жидкостью, наименьшее?



A) 3. B) 1. C) 2.

D) текущая жидкость дополнительного давления не создает.

E) во всех сечениях давление одинаково.

10. (98/6-23). Пробка массой 20 г плавает на поверхности воды. Найдите силу Архимеда, действующую на пробку.

A) 0,2 Н. B) 0,02 Н. C) 2 Н.

D) 10 Н. E) 20 Н.

11. (99/3-28). В сосуде с водой плавает брусок в вертикальном положении. Как изменится уровень воды в сосуде, если брусок примет горизонтальное положение?

A) повысится. B) ответ зависит от плотности бруска.

C) понизится. D) не изменится. E) НПО.

12. (98/3-20). Пробковый спасательный круг весит 36 Н. Определите подъемную силу этого круга в воде. Плотность воды равна 10^3 кг/м^3, плотность пробки – 200 кг/м^3.

A) 100 Н. B) 170 Н. C) 180 Н.

D) 164 Н. E) 144 Н.

13. (00/7-18). В середине замерзшего озера пробурили отверстие для взятия воды. Какой должна быть минимальная длина веревки с ведром на конце (в метрах), если толщина льда 10 м? Плотность льда 0,9 г/см^3.

A) 1. B) 2. C) 9. D) 10. E) 11.

14. (04/9-14). Тело плавает в керосине, погрузившись на 0,75 части своего объема. Какая часть объема этого тела погрузилась бы в воду при плавании? Плотность керосина 800 кг/м^3.

A) 0,3. B) 0,6. C) 0,75. D) 0,9. E) 0,25.

15. (00/10-5). Стакан вместимостью 250 см^3 имеет массу 200 г. Груз какой минимальной массы надо поместить в стакан, чтобы он потонул в воде? Плотность стекла 2,5 г/см^3.

A) 250 г. *B) 200 г.* *C) 130 г.* *D) 50 г.* *E) НПО.*

16. (00/7-48). Какая физическая величина определяется с помощью ареометра?

A) скорость. *B) ускорение.* *C) сила.*
D) давление. *E) плотность жидкости.*

17. (00/7-28). Один из двух стеклянных сосудов заполнен водой, другой ртутью. Если первый сосуд опустить в воду, а второй в ртуть, то который из них утонет?

A) оба. *B) оба не тонут.* *C) второй.*
D) первый. *E) НПО.*

18. (00/9-30). Сравните силы давления воды одинаковой массы на дно, налитой в цилиндрический стакан (F_1), коническую мензурку (F_2), коническую колбу (F_3).

A) $F_2<F_1<F_3$. *B)* $F_1=F_2=F_3$. *C)* $F_2<F_3<F_1$.
D) $F_1<F_3<F_2$. *E) НПО.*

19. (00/5-23). На сколько сантиметров поднимется уровень ртути в одном колене U-образной трубки, если в другое колено залить воду высотой 13,6 см? Плотность ртути 13,6 $\cdot 10^3$ кг/м^3.

A) 13,6. *B) 10.* *C) 6,8.* *D) 3,6.* *E) 1.*

20. Как изменится давление воздуха на высоте 600 м от земной поверхности?

A) не изменится. *B) увеличится на 50 мм рт. ст.*
C) уменьшится на 600 мм рт. ст.
D) уменьшится на 50 мм рт. ст.
E) увеличится на 600 мм рт. ст.

21. (10-6). Пластик в форме параллелепипеда толщиной 10 см плавает в воде. Какая часть (в сантиметрах) этого параллелепипеда выступает над водой? Плотность пластика равна 800 кг/м^3.

A) 2. *B) 5.* *C) 10/8.* *D) 8.* *E) НПО.*

22. (98/3-16). Как соотносятся архимедовы силы, действующие на тело, если его поочередно погружать в три разные жидкости с плотностями $\rho_1<\rho_2<\rho_3$?

A) $F_1>F_2<F_3$. *B)* $F_1>F_2>F_3$. *C)* $F_1=F_2=F_3$.
D) $F_1<F_2>F_3$. *E)* $F_1<F_2<F_3$.

23. (00/7-26). Каков объем подводной части айсберга (в м^3), если объем его надводной части равен 20 м^3. $\rho_в$=1000 кг/м^3; $\rho_л$=900 кг/м^3.

A) 160. *B) 170.* *C) 180.* *D) 190.* *E) 200.*

Глава VII
МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

§ 43. Гармонические колебания

Механическими колебаниями *называют периодические процессы, повторяющиеся через одинаковые промежутки времени.*

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

Вынужденными называются колебания, происходящие под действием внешних периодически изменяющихся сил.

Маятником называется тело или система тел, совершающих колебательные движения.

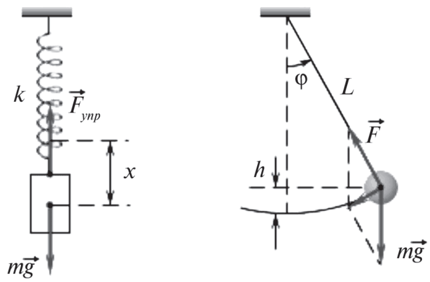


Рис. 7.1

Примеры простых колебательных систем: пружинный и математический маятники (рис. 7.1).

Колебания пружинного и математического маятников являются свободными колебаниями.

Для получения закона движения тела $x=f\ (t)$, совершающего колебания, применим метод векторных диаграмм. Из произвольной точки 0, откладывается вектор A   (рис. 7.2).

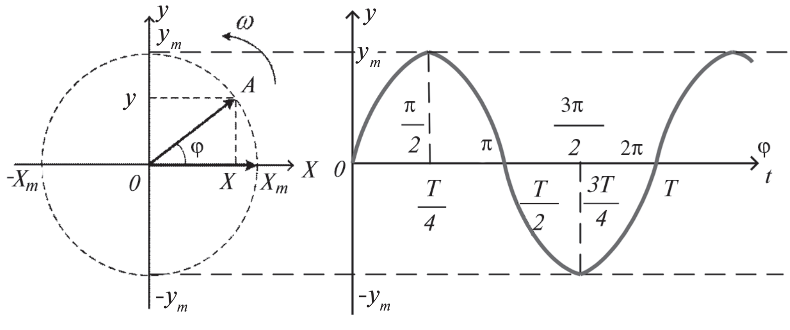


Рис. 7.2

Если этот вектор привести во вращение с угловой скоростью ω, то проекция конца вектора на ось X (или Y) будет совершать колебательные движения, принимая значения от $-x_m$ до $+x_m$ (или от $-y_m$ до $+y_m$), $x_m = y_m = A$. Пусть за время t вектор повернулся на угол $\varphi = \omega t$, тогда колеблющая величина x (или y) будет изменяться со временем по закону:

$$x = x_m \cos\varphi = x_m \cos\omega t \text{ или } y = y_m \sin\varphi = y_m \sin\omega t.$$

Колебания, при которых физическая величина изменяется со временем по закону косинуса (или синуса), называются гармоническими.

$x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0)$ – *уравнение гармонических колебаний*, где:

x (*м*) – смещение тела от положения равновесия,

x_m (*м*) – амплитуда колебаний, т. е. максимальное смещение,

ω *(рад/с)* — циклическая или круговая частота,

$\varphi = \omega t + \varphi_0$ – фаза гармонического процесса (стоит под знаком косинуса или синуса), φ_0 – начальная фаза.

Период *T(с)* – время одного полного колебания, $T = \dfrac{t}{N}$,

***Частота* ν** *(Гц)* – число колебаний за 1 с, $\nu = \dfrac{N}{t}$,

где N – число колебаний за время t.

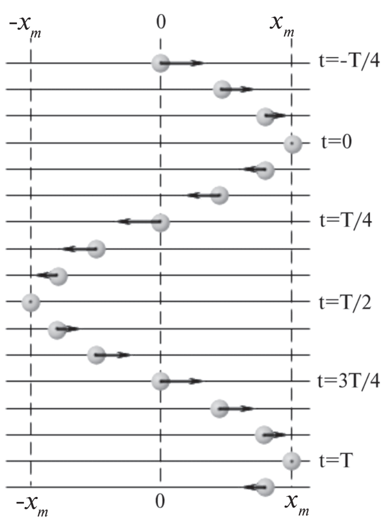


Рис. 7.3

Частота связана с периодом колебаний: $\nu = \dfrac{1}{T}$.

Частота колебаний ν связана с циклической частотой ω:

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

Положения тела через одинаковые промежутки времени (рис. 7.3) можно получить при освещении колеблющегося тела короткими периодическими вспышками света (стробоскопическое освещение). Стрелки изображают векторы скорости тела в различные моменты времени.

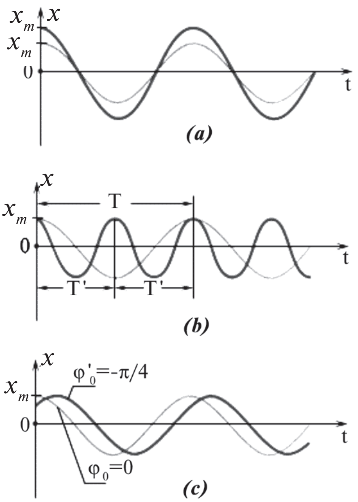


Рис. 7.4 иллюстрирует изменения, которые происходят на графике гармонического процесса, если изменяются:

(a) – амплитуда колебаний x_m,

(b) – период T (или частота ν),

(c) – начальная фаза φ_0.

Рис. 7.4

§ 44. Скорость и ускорение тела при гармонических колебаниях

Скорость υ является первой производной пути по времени.

Для гармонического закона движения $x = x_m\cos(\omega t + \varphi_0)$ нахождение производной приводит к следующему:

$$\upsilon = x'(t) = -\omega x_m \sin(\omega t + \varphi_0) = \omega x_m \cos(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}).$$

Появление слагаемого $+\pi/2$ в аргументе косинуса означает изменение начальной фазы.

$\upsilon_m = \omega x_m$ – максимальная скорость (когда тело проходит положение равновесия.)

Ускорение a равно производной функции $\upsilon(t)$ по времени t, или второй производной функции $x(t)$:

$$a = \upsilon'(t) = x''(t) = -\omega^2 x_m \cos(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 x(t).$$

Знак минус означает, что ускорение $a(t)$ имеет знак, противоположный знаку смещения $x(t)$, и сила, заставляющая тело совершать гармонические колебания, направлена всегда в сторону положения равновесия (x=0).

Максимальное ускорение $a_m = \omega^2 x_m$.

$x'' = -\omega^2 x$ – ***дифференциальное уравнение гармонических колебаний,*** решением которого являются уравнения:

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

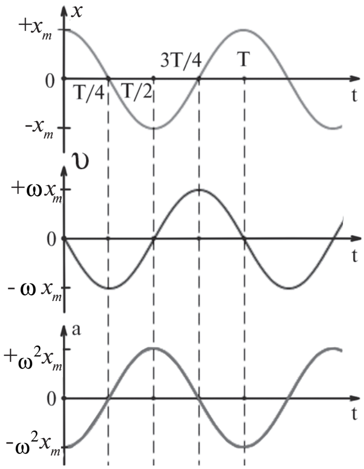


Рис. 7.5

Графики координаты $x(t)$, скорости $\upsilon(t)$ и ускорения $a(t)$ тела, совершающего гармонические колебания (рис. 7.5).

***Гармоническим осциллятором** называется колебательная система, описываемая уравнением вида: $x'' = -\omega^2 x$.*

Примерами гармонического осциллятора являются пружинный, математический и физический маятники (также колебательный контур, колебания частиц в атоме и др.).

§ 45. Пружинный маятник

Груз массы m, прикрепленный к пружине жесткости k, составляют вместе систему, способную совершать в отсутствие трения свободные гармонические колебания под действием упругой силы (рис. 7.6).

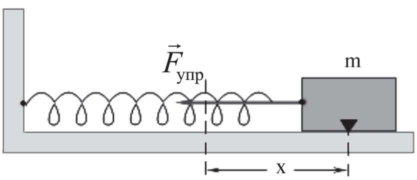


Рис. 7.6

$F_{упр} = -kx$ (закон Гука).

Учтем, что ускорение является второй производной координаты тела x по времени t: $a(t) = x''(t)$, тогда второй закон Ньютона для груза на пружине примет вид:

$$ma = mx'' = -kx, \quad \text{или}$$

$$x'' + \omega_0^2 x = 0, \qquad \text{где} \qquad \omega_0^2 = \frac{k}{m}.$$

Все физические системы (не только механические), описываемые уравнением $x'' + \omega_0^2 x = 0$, способны совершать свободные гармонические колебания, так как решением этого дифференциального уравнения являются гармонические функции (sin или cos) вида:

$$x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Частота ω_0 называется собственной циклической частотой колебательной системы. $\omega_0 = \sqrt{\dfrac{k}{m}}$ — для пружинного маятника.

Период T гармонических колебаний груза на пружине равен:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Физические свойства колебательной системы определяют только *собственную частоту колебаний ω_0 или период T*. Амплитуда x_m и начальная фаза φ_0 определяются способом, с помощью которого система выведена из состояния равновесия.

Если, например, груз был смещен из положения равновесия на расстояние Δl и затем в момент времени t=0 отпущен без начальной скорости, то $x_m=\Delta l$, $\varphi_0=0$. Если же грузу, находившемуся в положении равновесия, с помощью резкого толчка была сообщена начальная скорость $\pm\upsilon_0$, то $x_m = \upsilon_0 \sqrt[\frac{\pi}{2}]{\frac{m}{k}}$, $\varphi_0 = \pm\frac{\pi}{2}$.

Таким образом, амплитуда x_m и начальная фаза φ_0 определяются начальными условиями.

При горизонтальном расположении системы пружина – груз сила тяжести, приложенная к грузу, компенсируется силой реакции опоры. Если же груз подвешен на пружине, то сила тяжести направлена по линии движения груза. В положении равновесия пружина растянута на величину x_0, равную $x_0 = \frac{mg}{k}$, и колебания совершаются около этого нового положения равновесия. Приведенные выше выражения для собственной частоты ω_0 и периода колебаний T справедливы и в этом случае.

§ 46. Математический маятник

Математическим маятником *называют тело малых размеров, подвешенное на тонкой нерастяжимой невесомой нити.*

В положении равновесия, сила тяжести $m\vec{g}$ уравновешивается силой натяжения нити $\vec{F}_{упр}$. При отклонении маятника из положения равновесия на некоторый угол φ появляется касательная составляющая силы тяжести $F_\tau =- mg \sin\varphi$. Знак «минус» означает, что касательная составляющая направлена в сторону, противоположную отклонению маятника (рис. 7.7).

При малых линейных смещениях маятника от положения равновесия по дуге окружности радиуса l, угловое смещение равно $\varphi \approx x/l$.

По второму закону Ньютона: $ma_\tau = F_\tau = -mg\sin\frac{x}{l}$.

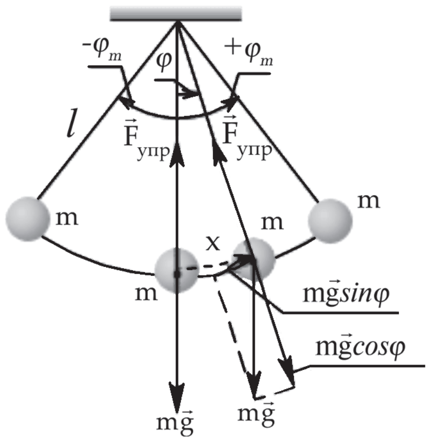


Рис. 7.7

Это соотношение показывает, что математический маятник представляет собой сложную *нелинейную* систему, так как сила, стремящаяся вернуть маятник в положение равновесия, пропорциональна не смещению x, а $\sin\frac{x}{l}$. Только в случае малых колебаний, когда приближенно $\sin\frac{x}{l}$ можно заменить на $\frac{x}{l}$, математический маятник является системой, способной совершать гармонические колебания.

Практически такое приближение справедливо для углов порядка 10−12°; при этом величина $\sin\frac{x}{l}$ отличается от $\frac{x}{l}$ не более чем на 1%.

Колебания маятника при больших амплитудах не являются гармоническими.

Для малых колебаний математического маятника второй закон Ньютона записывается в виде: $ma_\tau = -m\frac{g}{l}x.$

Таким образом, тангенциальное ускорение a_τ маятника пропорционально его смещению x, взятому с обратным знаком, следовательно, система является гармонической колебательной системой. Для таких систем модуль коэффициента пропорциональности между ускорением и смещением из положения равновесия равен квадрату круговой частоты: $\omega_0^2 = \frac{g}{l}$,

$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$ − собственная частота колебаний математического маятника.

$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ − период колебаний математического маятника (формула Гюйгенса).

***Физическим маятником** называется твердое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг неподвижной горизонтальной оси O подвеса, не проходящей через центр тяжести C тела.*

При отклонении маятника на угол φ возникает момент силы тяжести, стремящийся возвратить маятник в положение равновесия. При малых углах φ физический маятник способен совершать свободные гармонические колебания (рис. 7.8).

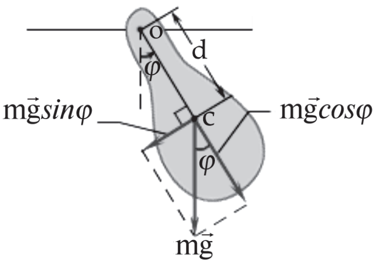


Рис. 7.8

Как и в случае математического маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{l_{пр}}{g}}$,

где $l_{пр} = \frac{I}{md}$ – приведенная длина физического маятника,

I – момент инерции маятника,

d – расстояние между осью вращения O и центром тяжести C.

$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgd}}$ – период колебаний физического маятника.

§ 47. Превращения энергии при свободных механических колебаниях

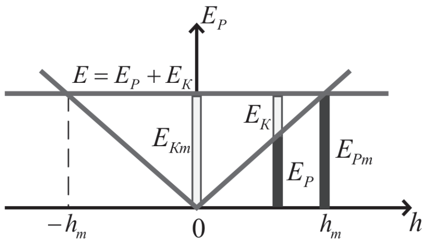
При гармонических колебаниях происходит периодическое превращение кинетической энергии в потенциальную и наоборот.

При наибольшем отклонении тела от положения равновесия потенциальная энергия колеблющегося тела достигает максимального значения, его скорость и кинетическая энергия обращаются в нуль.

Когда тело проходит положение равновесия, его скорость максимальна и оно обладает максимальной кинетической и минимальной потенциальной энергией. Тело проходит положение равновесия по инерции. При дальнейшем движении начинает увеличиваться потенциальная энергия за счет убыли кинетической энергии и т.д.

Превращения энергий в колебательных системах можно показать на графиках потенциальных энергий: (рис. 7.9 и 7.10).

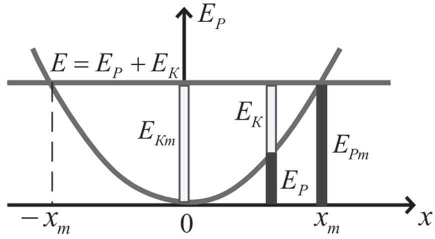
Если в колебательной системе отсутствует трение, то полная механическая энергия при свободных колебаниях остается неизменной $E_P + E_k = E = const$.



Для математического маятника потенциальная энергия – это энергия в поле тяготения Земли.

$$E = E_k + E_P = \frac{m\upsilon^2}{2} + mgh,$$

Рис. 7.9



Для груза на пружине потенциальная энергия – это энергия упругих деформаций пружины.

$$E = E_k + E_P = \frac{m\upsilon^2}{2} + \frac{kx^2}{2}.$$

Рис. 7.10

Получим формулы E_P и E_k колебания груза на пружине:

$$x\,(t) = x_m \cos\,(\omega_0 t), \quad \text{где} \quad \omega_0^2 = \frac{k}{m},\ \upsilon\,(t) = -\omega x_m \sin\,(\omega_0 t);$$

$$E_P(t) = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kx_m^2\cos^2\omega_0 t = \frac{1}{4}kx_m^2(1+\cos 2\omega_0 t);$$

$$E_K(t) = \frac{1}{2}m\upsilon^2 = \frac{1}{2}m\omega_0^2 x_m^2\sin^2\omega_0 t = \frac{1}{4}kx_m^2(1-\cos 2\omega_0 t).$$

Из формул видно, что частота колебаний E_P и E_k равна $2\omega_0$, то есть в два раза больше частоты колебаний смещения $x(t)$.

Заменив $k = m\omega^2$ для E_P, имеем:

$$E_P = \frac{1}{2}m\omega_0^2 x_m^2\cos^2\omega_0 t, \qquad E_k = \frac{1}{2}m\omega_0^2 x_m^2\sin^2\omega_0 t.$$

Полная механическая энергия: $E = E_p + E_k = \frac{1}{2}m\omega_0^2 x_m^2 = const.$

На рис. 7.11 изображены графики функций $E_p(t)$ и $E_k(t)$. Потенциальная и кинетическая энергии два раза за период колебаний достигают максимальных значений. Сумма E_k и E_p остается постоянной:

$$E_P(t) + E_k(t) = E = const.$$

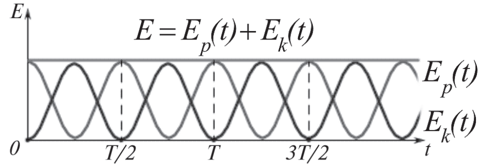


Рис. 7.11

§ 48. Затухающие колебания

В реальных условиях колебательная система находится под воздействием сил трения (сопротивления). При этом часть механической энергии превращается во внутреннюю энергию теплового движения атомов и молекул, и колебания становятся *затухающими* (рис. 7.12).

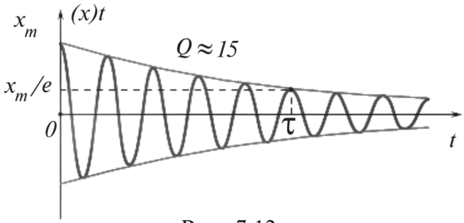


Рис. 7.12

Скорость затухания колебаний зависит от величины сил трения. Интервал времени τ, в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в $e \approx 2{,}7$ раз, называется *временем затухания*.

При возрастании сил трения собственная частота уменьшается. Однако, изменение частоты заметно лишь при больших силах трения.

Добротность *Q — характеристика колебательной системы, определяется как число N полных колебаний, совершаемых системой за время затухания τ, умноженное на π:* $Q = \pi N = \pi \dfrac{\tau}{T}$.

Чем медленнее происходит затухание свободных колебаний, тем выше добротность Q колебательной системы. Добротность колебательной системы на рис. 7.12 приблизительно равна 15.

Добротность характеризует относительную убыль энергии колебательной системы из-за наличия трения на интервале времени,

равном одному периоду колебаний: $Q = 2\pi \dfrac{E_0}{\Delta E_T}$,

где E_0 — запас энергии в колебательной системе,
ΔE_T — потеря энергии за один период колебаний.

§ 49. Вынужденные колебания

Колебания тела или систем, совершающиеся под воздействием внешней периодической силы, называются *вынужденными*.

Вынужденные колебания — это *незатухающие* колебания. Неизбежные потери энергии на трение компенсируются подводом энергии от внешнего источника периодически действующей силы.

Если внешняя сила, изменяющаяся по гармоническому закону с частотой ω, воздействует на колебательную систему, способную совершать собственные колебания на некоторой частоте ω_0, то *установ-*

вившиеся вынужденные колебания происходят на частоте ω внешней силы. Рассмотрим вынужденные колебания тела на пружине (рис.7.13).

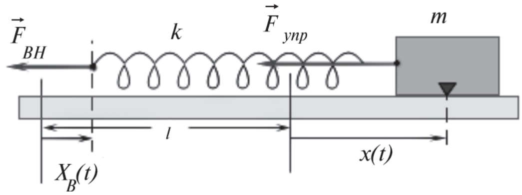


Рис. 7.13

Внешняя сила $\vec{F}_{вн}$, приложенная к свободному концу пружины, заставляет его перемещаться по закону
$X_в = X_{вт}\cos\omega t$, где $X_{вт}$ – максимальное смещение, под действием внешней силы. Если левый конец пружины смещен на расстояние $X_в$, а правый – на расстояние x от их первоначального положения, то удлинение пружины Δl равно $\Delta l = x - X_в = x - X_{вт}\cos\omega t$.

Второй закон Ньютона для тела массой m:

$$ma = -k(x - X_в) = -kx + k\,X_{вт}\cos\omega t.$$

Первое слагаемое $-kx$ – это упругая сила, стремящаяся возвратить тело в положение равновесия (x=0).

Второе слагаемое $k\,X_{вт}\cos\omega t$ – внешнее периодическое воздействие на тело (*амилитуда вынуждающей силы*).

Если учесть, что $a = x''$, тогда *уравнение вынужденных колебаний* запишется в виде $x'' + \omega_0^2 x = A_{уе}\cos\omega t$, где $A_{уе} = \dfrac{k}{m}X_{вт} = \omega_0^2 X_{вт}$.

Уравнение вынужденных колебаний содержит две частоты – частоту ω_0 свободных колебаний и частоту ω вынуждающей силы.

Установившиеся вынужденные колебания груза на пружине происходят на частоте внешнего воздействия по закону:

$$x(t) = x_m\cos(\omega t + \theta).$$

На очень низких частотах, когда $\omega << \omega_0$, движение тела массой m, прикрепленного к правому концу пружины, повторяет движение левого конца пружины. При этом $x(t) = X_в(t)$, и пружина остается практически недеформированной. Внешняя сила $\vec{F}_{вн}$, приложенная к левому концу пружины, работы не совершает, т.к. модуль этой силы при $\omega << \omega_0$ стремится к нулю.

Резонанс. ***Резонансом называется явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний, когда частота ω внешней силы приближается к собственной частоте ω_0 колебательной системы.***

Зависимость амплитуды x_m вынужденных колебаний от частоты ω вынуждающей силы называется *резонансной характеристикой или*

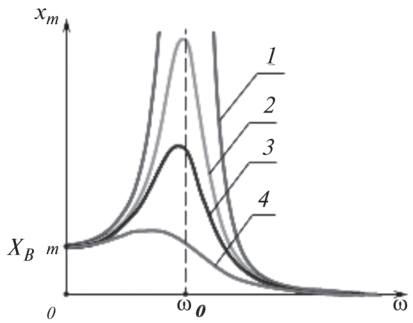


Рис. 7.14

резонансной кривой (рис. 7.14).

1 – колебательная система без трения; при резонансе амплитуда x_m вынужденных колебаний неограниченно возрастает;

2, 3, 4 – реальные резонансные кривые для систем с различной добротностью: $Q_2 > Q_3 > Q_4$.

При резонансе амплитуда x_m

На низких частотах ($\omega << \omega_0$):	На высоких частотах ($\omega >> \omega_0$):
$x_m \approx X_{вт}$.	$x_m \rightarrow 0$.

колебания груза может во много раз превосходить амплитуду $X_{вт}$ колебаний свободного конца пружины, вызванного внешним воздействием.

У колебательных систем с не очень высокой добротностью (Q<10) резонансная частота несколько смещается в сторону низких частот.

Автоколебания

Системы, в которых незатухающие колебания возникают не за счет периодического внешнего воздействия, а в результате имеющейся у таких систем способности самой регулировать поступление энергии от постоянного источника, называются *автоколебательными*. В автоколебательной системе можно выделить три характерных элемента – колебательная система, источник энергии и устройство обратной связи между колебательной системой и источником (рис. 7.15).

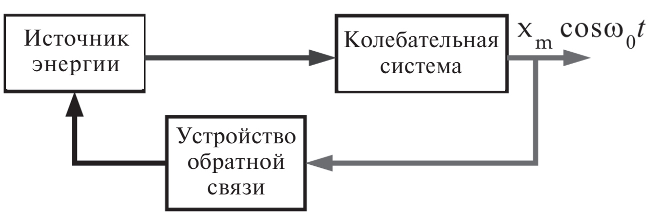


Рис. 7.15

Примером механической автоколебательной системы может служить часовой механизм с *анкерным ходом* (рис. 7.16). Ходовое колесо с косыми зубьями жестко скреплено с зубчатым барабаном, через который перекинута цепочка с гирей. На верхнем конце маятника закреплен *анкер* (якорек) с двумя пластинками из твердого материала, изогнутыми по дуге окружности с центром на оси маятника. В

Рис. 7.16

наручных часах гиря заменяется пружиной, а маятник – балансиром – маховичком, скрепленным со спиральной пружиной. Балансир совершает крутильные колебания вокруг своей оси.

Колебательной системой в часах является маятник или балансир. Источником энергии – поднятая вверх гиря или заведенная пружина. Устройством, с помощью которого осуществляется обратная связь, является анкер, позволяющий ходовому колесу повернуться на один зубец за один полупериод. Обратная связь осуществляется взаимодействием анкера с ходовым колесом.

При каждом колебании маятника зубец ходового колеса толкает анкерную вилку в направлении движения маятника, передавая ему некоторую порцию энергии, которая компенсирует потери энергии на трение. Таким образом, потенциальная энергия гири (или закрученной пружины) постепенно, отдельными порциями передается маятнику.

Автоколебания совершают паровые машины, двигатели внутреннего сгорания, электрические звонки, струны смычковых музыкальных инструментов, воздушные столбы в трубах духовых инструментов, голосовые связки при разговоре или пении и т.д.

Вопросы и задания

1. *Что называют механическими колебаниями? Приведите примеры.*
2. *Какие колебания называются гармоническими?*
3. *Выведите уравнение гармонических колебаний.*
4. *Под действием каких сил совершаются свободные и вынужденные колебания?*
5. *Что называется смещением и амплитудой колебаний?*
4. *Что называется периодом, частотой и циклической частотой колебаний?*
6. *Какой физический смысл фазы гармонических колебаний? Что понимают под начальной фазой?*
7. *Выведите зависимости от времени для скорости и ускорения тела при гармонических колебаниях. Изобразите эти зависимости графически.*
8. *Приведите формулы собственной частоты и периода гармонических колебаний груза на пружине и малых колебаний математического маятника.*
9. *Объясните процесс превращения энергии при свободных механических колебаниях.*

10. Запишите закон сохранения энергии колебаний груза на пружине и для малых колебаний математического маятника.

11. Изобразите графики функций $E_P(t)$ и $E_K(t)$ потенциальной, кинетической и полной энергий колебательной системы.

12. На какой частоте происходят установившиеся вынужденные колебания?

13. В чем суть явления резонанса?

14. Что такое автоколебания?

Тестовые задания

1. (03/10-38). Как изменится период колебаний пружинного маятника, если его перенести с Земли на планету, на которой ускорение свободного падения в 4 раза больше, чем на Земле?

A) не изменится. B) увеличится в 2 раза.
C) увеличится в 4 раза.
D) уменьшится в 2 раза. E) уменьшится в 4 раза.

2. (01/1-51). Груз массой 4 кг подвешен на пружине и совершает гармонические колебания с периодом T. Какой груз (кг) нужно снять, чтобы период сократился до T/2?

A) 1. B) 2. C) 3. D) 3,5.
E) нужно знать жесткость пружины.

3. (03/6-35). Какова была начальная масса (г) груза, подвешенного на пружине, если при увеличении массы на 60 г, период вертикальных колебаний его увеличился в 2 раза?

A) 20. B) 30. C) 40. D) 60. E) 120.

4. (03/10-36). Тело, совершающее гармонические колебания, за время одного колебания прошло 2 м пути. Определите амплитуду колебаний (м).

A) 0,25. B) 0,5. C) 1. D) 2. E) 4.

5. (03/9-22). Период колебаний одного из двух математических маятников равен 0,5 с. Каков период колебаний второго маятника (с), если он колеблется 4 раза за то же самое время, за которое первый маятник колеблется 6 раз?

A) 1,2. B) 1,5. C) 0,25. D) 0,35. E) 0,75.

6. (03/6-36). Какова будет частота колебаний (Гц) математического маятника на Луне, если она на Земле равна 0,5 Гц? На Луне ускорение свободного падения в 6 раз меньше, чем на Земле.

A) 0,2. B) 0,3. C) 0,6. D) 0,8. E) 1,2.

7. (03/10-37). Какова длина математического маятника, если амплитуда его колебаний равна A, а максимальное тангенциальное ускорение – a?

A) Aga; *B)* $\dfrac{ag}{A}$; *C)* $\dfrac{Ag}{a}$; *D)* $\dfrac{A^2g}{a}$; *E)* $\dfrac{Ag}{a^2}$.

8. (98/4-29). Математический маятник со стальным шариком массой 50 г имеет период колебаний, равный 2 с. Когда его поместили в магнитное поле, то период уменьшился до 1 с. Определите силу, действующую на шарик со стороны магнитного поля.

A) 0,5 Н. B) 1 Н. C) 5 Н. D) 3 Н. E) 1,5 Н.

9. (8-49). Периоды колебаний математических маятников длинами l_1 и l_2 равны T_1 и T_2 соответственно. Чему равен период колебаний математического маятника длиной $l=l_1+l_2$?

A) $T=\sqrt{T_1 \cdot T_2}$. *B)* $T=\sqrt{T_1^2-T_2^2}$.

C) $T=T_1+T_2$. *D)* $T=\sqrt{T_1^2+T_2^2}$. *E)* $T=\sqrt{2T_1-T_2}$.

10. (98/6-18). Математический маятник колеблется по закону $x = 0,1\sin 5t$ (м). Найдите длину маятника (в метрах). $g=10$ м/с^2.

A) 5. B) 2,5. C) 0,5. D) 0,1. E) 0,4.

11. (99/7-19). Как изменится частота малых колебаний материальной точки, подвешенной на невесомой нерастяжимой нити, если увеличить ее массу в 2 раза?

A) уменьшится в 2 раза. B) увеличится в 2 раза.
C) не изменится. D) увеличится в 4 раза.
E) уменьшится в 4 раза.

12. (98/4-23). Два математических маятника, отношение длин которых равно $l_2/l_1=4$, отклонили на одинаковый угол и отпустили. Каково соотношение их максимальных скоростей?

A) $\upsilon_2=2\upsilon_1$. *B)* $\upsilon_1=4\upsilon_2$. *C)* $\upsilon_1=\upsilon_2$. *D)* $\upsilon_2=4\upsilon_1$. *E)* $\upsilon_1=2\upsilon_2$.

13. (98/7-21). Каково ускорение математического маятника (в м/с^2) при прохождении положения равновесия, если амплитуда колебаний маятника равна 0,2 м, а длина –2 м? $g=10$ м/с^2.

A) 1. B) 0,8. C) 0,4. D) 0,2. E) 0,1.

14. (98/6-21). Какова амплитуда колебаний математического маятника, если его длина равна 1,6 м, а максимальная скорость – 0,5 м/с. $g = 10$ м/с^2.

A) 5 см. B) 20 см. C) 16 см. D) 8 см. E) 50 см.

15. (98/7-24). Каково максимальное ускорение математического маятника (в м/с^2), если его длина равна 1 м, а амплитуда колебаний – 0,2 м? $g = 10$ м/с^2

A) 0,5. B) 1. C) 2. D) 0,2. E) 0,1.

16. (99/10-70). Перед зданием проезжает грузовой автомобиль, радиус колес которого 0,4 м. При этом стекла в окнах начинают дребезжать. С какой скоростью (в м/с) движется автомобиль, если частотомер, прикрепленный к окну, показывает, что частота колебаний стекол равна 5 Гц и колебания возникают за счет вращения колес?

A) 2. B) 6,5. C) 9,6. D) 12,6. E) 20.

17. (04/9-45). Период колебаний материальной точки равен 36 с. За какое время (в секундах) она смещается от положения равновесия на половину амплитуды?

A) 9. B) 8. C) 4,5. D) 4. E) 3.

18. (00/5-15). Длина маятника 98 м. Какова амплитуда колебаний маятника (в метрах), если максимальный угол его отклонения от равновесия равен 5°?

A) 9,8. B) 8,5. C) 1. D) 9,5. E) 0,5.

19. (99/6-29). Два математических маятника колеблются с одинаковыми периодами. Второй маятник начинает колебаться с опозданием на половину периода. Найдите разность фаз колебаний маятников.

A) 0. B) $\pi/4$. C) π. D) $\pi/2$. E) 2π.

20. (99/2-39). При гармонических колебаниях тела вдоль оси OX ускорение изменяется по закону $a_x = 4\cos 2t$ (м/с^2). Какова амплитуда изменений координаты x тела?

A) 1 м. B) 4 м. C) 8 м. D) 12 м. E) 16 м.

21. (04/9-44). Определите полную механическую энергию (в мДж) материальной точки массой 30 г колеблющейся по закону $x = 0{,}04\sin(5t+0{,}6)$ м.

A) 0,6. B) 0,3. C) 3. D) 6. E) 5.

22. (6-19).Как изменится период колебаний пружинного маятника, если отрезать половину пружины?

A) увеличится в 2 раза. B) уменьшится в 2 раза.
C) не изменится.
D) уменьшится в $\sqrt{2}$ раз. E) увеличится в $\sqrt{2}$ раз.

23. (10-31). Найти массу груза, который на пружине с жесткостью 1000 Н/м совершает 5 продольных колебаний за 2 с.

A) 10. B) 0,125. C) 2. D) 8. E) 4.

Глава VIII
МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

§ 50. Волны продольные и поперечные

Механической волной *называется процесс распространения колебаний в упругой среде со временем.*

Если в каком-нибудь месте твердой, жидкой или газообразной среды возбуждены колебания частиц, то вследствие взаимодействия атомов и молекул среды колебания начинают передаваться от одной точки к другой с конечной скоростью.

Характерной особенностью механических волн является то, что они распространяются в материальных упругих средах (твердых, жидких или газообразных).

Поперечной называется такая волна, у которой частицы среды испытывают смещение в направлении, перпендикулярном направлению распространения (рис. 8.1).

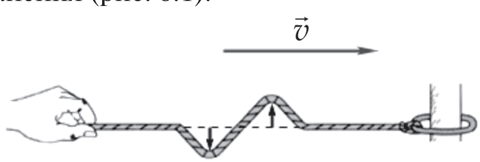


Рис. 8.1

Примером могут служить волны, бегущие по натянутой веревке или по струне.

Продольной называется такая волна, у которой смещение частиц среды происходит в направлении распространения волны.

Примерами таких волн являются волны в упругом стержне или звуковые волны в газе (рис. 8.2).

Волны на поверхности жидкости имеют как поперечную, так и продольную компоненты.

Продольные механические волны могут распространяться в любых средах — твердых, жидких и газообразных.

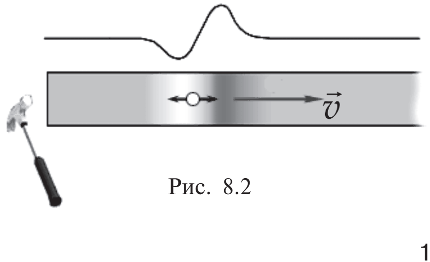


Рис. 8.2

В жидкостях и газах упругая деформация сдвига не возникает. Если один слой жидкости или газа сместить на некоторое расстояние относительно соседнего слоя, то никаких касательных сил на границе между слоями не появляется. Следовательно, поперечные волны не могут существовать в жидкой или газообразной средах.

Как в поперечных, так и в продольных волнах не происходит переноса вещества в направлении распространения волны.

В процессе распространения частицы среды лишь совершают колебания около положений равновесия.

Волны переносят энергию колебаний от одной точки среды к другой.

Волновым фронтом *называется геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t.* Фронт волны отделяет часть пространства, уже вовлеченную в волновой процесс, от области, в которой колебания еще не возникли.

Волновой поверхностью *называется геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе.* Волновых поверхностей можно провести бесчисленное множество, а волновой фронт в каждый момент времени — один.

Плоской волной называется волна, у которой волновые поверхности представляют собой совокупность плоскостей параллельных друг другу.

Сферической волной называется волна, у которой волновые поверхности представляют собой совокупность концентрических сфер.

§ 51. Уравнение бегущей волны

Рассмотрим простые *гармонические* или *синусоидальные* волны. Они характеризуются амплитудой колебания частиц A, частотой ν и длиной волны λ. Синусоидальные волны распространяются в однородных средах с некоторой постоянной скоростью υ.

Бегущими *называются волны, все точки которых перемещаются с одной и той же скоростью.*

Если источник совершает гармонические колебания $y(x, t) = A\cos\omega t$, тогда точка среды, отстоящая от источника на расстоянии x, будет совершать колебания по тому же закону, но отставать на время τ, т.к. для прохождения волной расстояния x требуется время

$$\tau = \frac{x}{\upsilon}.$$

Уравнение колебаний частиц на расстоянии x имеет вид:

$$y(x,t) = A\cos\omega(t - \frac{x}{\upsilon}) = A\cos(\omega t - kx)$$ — *уравнение бегущей волны*,

где $k = \dfrac{\omega}{\upsilon}$ — *волновое число*, $\omega = 2\pi\nu$ — *циклическая частота*.

На рис. 8.3 изображены «моментальные фотографии» поперечной волны в два момента времени: t и $t+\Delta t$. За время Δt волна переместилась вдоль оси OX на расстояние $\upsilon\Delta$t.

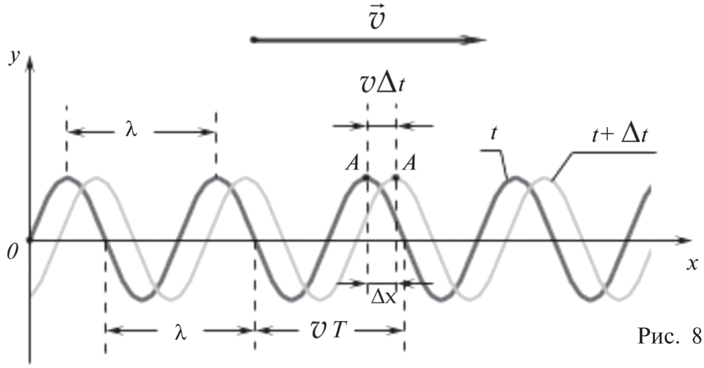


Рис. 8.3

Длиной волны λ называют расстояние между двумя соседними точками на оси OX, колеблющимися в одинаковых фазах. Расстояние, равное длине волны λ, волна пробегает за период T, следовательно, $\lambda=\upsilon T$, где υ – *скорость распространения* волны.

Для любой выбранной точки на графике волнового процесса (например, для точки A на рис. 8.3) выражение $(\omega t - kx)$ не изменяется по величине. С течением времени t изменяется координата x этой точки. Через промежуток времени Δt точка A переместится по оси OX на некоторое расстояние $\Delta x=\upsilon\Delta t$. Следовательно:

$\omega t - kx = \omega(t+\Delta t) - k(x+\Delta x) = \text{const}$ или $\omega\Delta t = k\,\Delta x$.

Отсюда следует: $\upsilon = \dfrac{\Delta x}{\Delta t} = \dfrac{\omega}{k}$ или $k = \dfrac{2\pi}{\lambda} = \dfrac{\omega}{\upsilon}$.

Уравнение бегущей волны можно записать в виде:

$$y(x,t) = A\cos(\omega t - kx) = A\cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right).$$

Из полученного уравнения видно, что бегущая синусоидальная волна обладает двойной периодичностью – во времени и в пространстве. Временной период равен периоду колебаний T частиц среды, пространственный период равен длине волны λ. Волновое число $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ является пространственным аналогом круговой частоты $\omega = \dfrac{2\pi}{T}$.

Уравнение *сферической* синусоидальной волны имеет вид: $y = \frac{A_0}{r}\cos(\omega t - kr)$, где $\frac{A_0}{r}$ – амплитуда колебаний, убывающая с расстоянием даже в среде, не поглощающей энергию.

При распространении волны частицы среды не движутся вместе с волной, а колеблются около своих положений равновесия. Вместе с волной от частицы к частице среды передается лишь состояние колебательного движения (фаза) и его энергия. Поэтому *основным свойством всех волн независимо от их природы является* ***перенос энергии без переноса вещества,*** а скорость распространения волны $\upsilon = \frac{\omega}{k}$ является фазовой скоростью.

Как видно из формулы, фазовая скорость зависит от частоты синусоидальной волны. *Явление зависимости скорости волны от частоты называется* ***дисперсией.***

В бегущей синусоидальной волне каждая частица среды совершает гармонические колебания с некоторой частотой. Поэтому, как и в случае простого колебательного процесса, средняя потенциальная энергия, запасенная в некотором объеме среды, равна средней кинетической энергии в том же объеме.

Интенсивностью волны это средняя энергия, переносимая волной за одну секунду через волновую поверхность площадью один квадратный метр: $I = \frac{W_{ср.}}{St}$.

При распространении бегущей волны средний поток энергии, пропорционален скорости волны и квадрату ее амплитуды:

$$I = \frac{\rho \upsilon A^2 \omega^2}{2}, \quad \text{где} \quad \rho \text{ — плотность среды.}$$

§ 52. Интерференция волн

Принцип суперпозиции *(наложения) волн.* При распространении в среде нескольких волн каждая из них распространяется так, как будто другие волны отсутствуют, а результирующее смещение частицы среды в любой момент времени равно геометрической сумме смещений, которые получают частицы, участвуя в каждом из слагающих волновых процессов.

Согласованное протекание во времени и пространстве нескольких волновых процессов связано с понятием когерентности.

Волны называются ***когерентными****, если они имеют одинаковую частоту и разность их фаз остается постоянной во времени.*

При наложении в пространстве двух (или нескольких) когерентных волн в разных его точках получается усиление или ослабление результирующей волны в зависимости от соотношения между фазами этих волн. Это явление называется ***интерференцией волн.***

Рассмотрим наложение двух когерентных сферических волн, возбуждаемых точечными источниками S_1 и S_2 (рис 8.4), колеблющимися с одинаковыми амплитудой A_0 и частотой ω, и постоянной разностью фаз. Согласно уравнению для сферической волны: $y_1 = \frac{A_0}{r_1}\cos(\omega t - kr_1)$, $y_2 = \frac{A_0}{r_2}\cos(\omega t - kr_2)$, где r_1 и r_2 — расстояния от источников волн до рассматриваемой точки B (рис. 8.4 *б*).

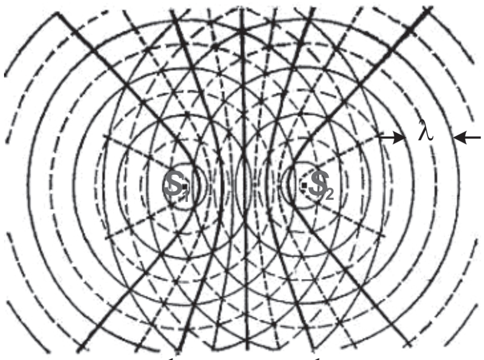


Рис. 8.4 *а*

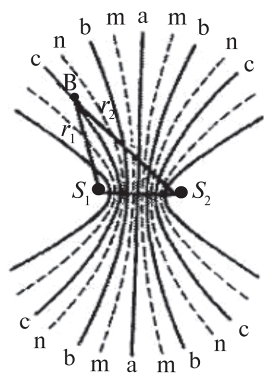


Рис. 8.4 *б*

Так как для когерентных источников разность фаз $(\varphi_1 - \varphi_2) = const$, то результат интерференции двух волн в различных точках зависит от величины $\Delta = r_1 - r_2$, называемой ***разностью хода*** волн.

Условие максимума. Если $\Delta = 2k\frac{\lambda}{2} = k\lambda$ $(k = 0, 1, 2, ...)$, то наблюдается интерференционный максимум: амплитуда результирующего колебания $A = \frac{A_0}{r_1} + \frac{A_0}{r_2}$ максимальна.

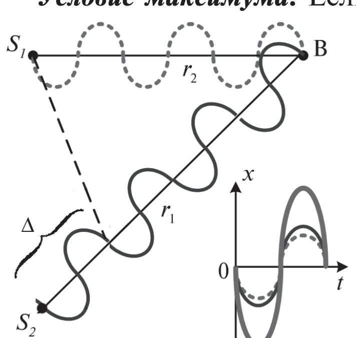


Рис. 8.5

Амплитуда колебаний среды в данной точке максимальна, если разность хода двух волн, возбуждающих колебания в этой точке, равна четному числу полуволн (целому числу длин волн).

Две волны пришли, в рассматриваемую точку, совпадая гребень с гребнем, впадина с впадиной (рис. 8.5).

Условие минимума. Если $\Delta = (2k+1)\cdot\dfrac{\lambda}{2}$ $(k = 0, 1, 2, ...)$ наблюдается интерференционный минимум: амплитуда результирующего колебания минимальна:

$$A = \left|\frac{A_0}{r_1} - \frac{A_0}{r_2}\right|; \quad A = 0 \text{ при равенстве амплитуд.}$$

Амплитуда колебаний среды в данной точке минимальна, если разность хода двух волн, возбуждающих колебания в этой точке, равна нечетному числу полуволн.

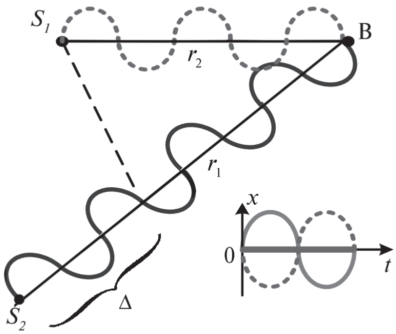


Рис. 8.6

Две волны пришли в рассматриваемую точку, совпадая гребень с впадиной, впадина с гребнем (рис. 8.6).

Амплитуда колебаний в любой точке не меняется с течением времени.

Неизменное во времени распределение амплитуд колебаний в пространстве называют ***интерференционной картиной.***

На рис. 8.4 *а* схематично показана интерференционная картина круговых волн от двух источников S_1 и S_2. Концентрические окружности, изображенные сплошной линией, символизируют гребень волны, пунктирной – впадину.

Условия максимума и минимума сводятся к тому, что

$$r_1 - r_2 = \text{const}.$$

Это выражение представляет собой уравнение гиперболы с фокусами в точках S_1 и S_2. Следовательно, геометрическое место точек, в которых наблюдается усиление или ослабление результирующего колебания, представляет собой семейство гипербол (рис. 8.4 *б*). Между двумя интерференционными максимумами (сплошные линии) находятся интерференционные минимумы – пунктирные линии.

§ 53. Стоячие волны

Стоячие волны – *волны, образующиеся при наложении двух бегущих синусоидальных волн, распространяющихся навстречу друг другу с одинаковыми частотами и амплитудами.*

Стоячие волны являются частным случаем интерференции волн.

Волна, бегущая по веревке или струне, отражается от неподвижно закрепленного конца; при этом появляется волна, бегущая во встречном направлении. В струне, закрепленной на обоих концах, возникают сложные колебания, которые можно рассматривать как результат наложения (*суперпозиции*) двух волн, распространяющихся в противоположных направлениях и испытывающих отражения. Колебания струн, закрепленных на обоих концах, создают звуки всех струнных музыкальных инструментов. Похожее явление возникает при звучании духовых инструментов.

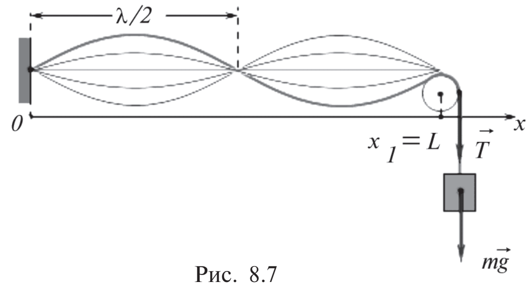


Рис. 8.7

Пусть струна длины l закреплена так, что один из ее концов находится в точке $x = 0$, а другой – в точке $x = l$ (рис. 8.7).

В струне создано натяжение T.

По струне одновременно распространяются в противоположных направлениях две волны одной и той же частоты:

$y_1(x, t) = A\cos(\omega t + kx)$ – волна, бегущая справа налево;

$y_2(x, t) = -A\cos(\omega t - kx)$ – волна, бегущая слева направо.

В точке $x = 0$ падающая волна y_1 в результате отражения порождает волну y_2. При отражении от неподвижно закрепленного конца отраженная волна оказывается в противофазе с падающей. Согласно *принципу суперпозиции:*

$y = y_1 + y_2 = (-2A\sin kx)\sin\omega t$ – уравнение стоячей волны.

(Из тригонометрии: $\cos\alpha - \cos\beta = -2\sin\dfrac{\alpha+\beta}{2}\sin\dfrac{\alpha-\beta}{2}$.)

В каждой точке стоячей волны происходят колебания с частотой ω. $2A\sin kx$ – амплитуда стоячей волны, зависящая от координаты x.

Амплитуда стоячей волны принимает минимальные значения равные нулю в неподвижных точках, которые называются ***узлами***. Посередине между узлами находятся точки, которые колеблются с максимальной амплитудой $2A$. Эти точки называются ***пучностями***.

Расстояния между соседними узлами (или пучностями) равно $\dfrac{\lambda}{2}$.

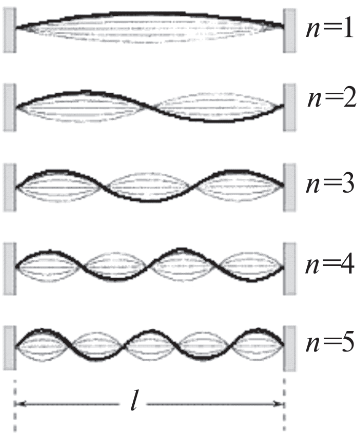


Рис. 8.8

Оба неподвижных конца струны должны быть узлами. *Стоячая волна в струне возникает только в том случае, если длина l струны равняется целому числу n полуволн* (рис. 8.8):

$$l = n\frac{\lambda_n}{2} \quad \text{или} \quad \lambda_n = \frac{2l}{n} \quad (n = 1,2,3,...).$$

Набору значений λ_n длин волн соответствует набор возможных частот

ν_n: $$\nu_n = \frac{\upsilon}{\lambda_n} = n\frac{\upsilon}{2l} = n\nu_1,$$

где υ – скорость распространения поперечных волн по струне.

Каждая из частот ν_n и связанный с ней тип колебания струны называется ***нормальной модой***. Наименьшая частота ν_1 называется ***основной частотой***, все остальные (ν_2, ν_3, ...) называются ***гармониками***. На рис. 8.7 изображена нормальная мода для $n = 2$.

В стоячей волне нет потока энергии. Колебательная энергия, заключенная в отрезке струны между двумя соседними узлами, не передается в другие части струны. В каждом таком отрезке происходит периодическое (дважды за период T) превращение кинетической энергии в потенциальную и обратно как в обычной колебательной системе. Но в отличие от груза на пружине или маятника, у которых имеется единственная собственная частота $\nu_0 = \dfrac{\omega_0}{2\pi}$, струна обладает бесчисленным количеством собственных (резонансных) частот ν_n. В соответствии с принципом суперпозиции стоячие волны различных типов (т.е. с разными значениями n) могут одновременно присутствовать в колебаниях струны.

§ 54. Дифракция

Дифракцией (от латинского слова difractus – *разломанный) называется огибание волнами препятствий, встречающихся на их пути, или отклонение от прямолинейного распространения волн.*

Благодаря дифракции волны могут попадать в область геометрической тени, огибать препятствия, проникать через небольшие отверстия в экранах и т.д.

Например, звук слышен за углом дома, т.к. звуковая волна его огибает.

Дифракция присуща любому волновому процессу в той же мере, как и интерференция. При дифракции происходит искривление волновых поверхностей у краев препятствий.

Соотношение между длиной волны λ и размером препятствий l определяет поведение волны.

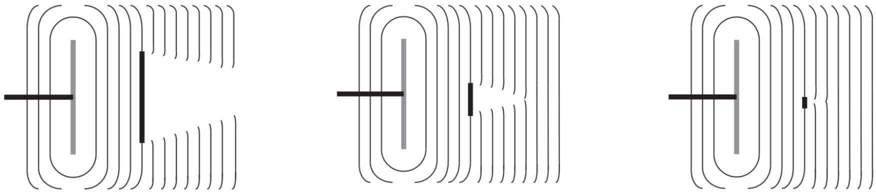


Рис. 8.9 *а* *б* *в*

Поставим на пути прямолинейной поверхностной волны в водяной ванне препятствия различного размера (рис. 8.9, *а*, *б*, *в*). Когда препятствие достаточно велико по сравнению с длиной волны λ (рис. *а*), тень от него сравнительно резкая, волна лишь слегка огибает край препятствия. По мере уменьшения препятствия тень оказывается менее ясно выраженной (рис. *б*), а когда размеры препятствия становятся сравнимыми с длиной волны, образования тени практически не происходит (рис. *в*), волна огибает препятствие, и позади него она распространяется почти так же, как если бы препятствия не было. Это огибание волной края препятствия, особенно отчетливо наблюдаемое при малых по сравнению с длиной волны размерах препятствия, называется *дифракцией.*

Таким образом, *дифракция волн проявляется особенно отчетливо в случаях, когда размеры препятствий на пути волн меньше длины волны или сравнимы с ней, то есть* $l<\lambda$.

Способностью огибать препятствия обладают и звуковые волны. Длина звуковой волны в воздухе при частоте в 1000 *гц* равна 33,7 см, а при частоте 100 *гц* она составляет уже 3,37 м. Таким образом, размеры обычно окружающих нас предметов (за исключением больших домов) не велики по сравнению с длиной звуковой волны, дифракция звука хорошо наблюдается.

Явление дифракции объясняется с помощью ***принципа Гюйгенса,*** *согласно которому: каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн дает положение волнового фронта в следующий момент времени.*

Фронт плоский только в средней части, а у границ отверстия происходит загибание волнового фронта, т.е. волна проникает в область геометрической тени, огибая края преграды $d<\lambda$ (рис. 8.10).

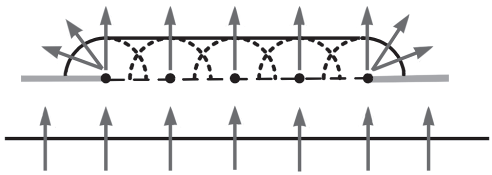


Рис. 8.10 *а*

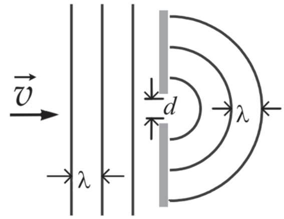


Рис. 8.10 *б*

§ 55. Звук

Звуковыми волнами или просто **звуком** называются механические волны, воспринимаемые человеческим ухом. Диапазон звуковых частот лежит в пределах приблизительно от 16 *Гц* до 20 *кГц*. Волны с частотой менее 16 *Гц* называются ***инфразвуком***, а с частотой более 20 *кГц* – ***ультразвуком***. Удобно запомнить в виде:

$$\text{инфразвук} \rightarrow \boxed{\begin{array}{c} 20\,Гц < \nu < 20000\,Гц \\ \text{слышимый звук} \\ 17\,\text{м} > \lambda > 17\,\text{мм} \end{array}} \rightarrow \text{ультразвук}$$

Рис. 8.11

Волны звукового диапазона могут распространяться не только в газе, но и в жидкости (продольные волны) и в твердом теле (продольные и поперечные волны). В вакууме звуковые волны не распространяются. Изучением звуковых явлений занимается раздел физики, который называют ***акустикой***.

При распространении звука в газе атомы и молекулы колеблются вдоль направления распространения волны. Это приводит к изменениям локальной плотности ρ и давления p. Звуковые волны в газе часто называют волнами плотности или волнами давления. В простых гармонических звуковых волнах, распространяющихся вдоль оси OX, изменение давления $p(x, t)$ зависит от координаты x и времени t по закону синуса или косинуса:

$$p(x,\ t) = p_0 \cos(\omega t + kx).$$

Важной характеристикой звуковых волн является ***скорость их распространения***. Она определяется инертными и упругими свойствами среды.

Скорость звука при нормальных условиях (т.е. при температуре 0°С и давлении 1 атм) равна 331,5 м/с, а скорость звука при температуре 20°С и давлении 1 атм равна 343 м/с.

Скорость звука сильно зависит от свойств газа. Чем легче газ, тем больше скорость звука в этом газе. Так, например, при нормальных условиях в воздухе ($\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль) υ = 331,5 м/с, в гелии ($\mu = 4{\cdot}10^{-3}$ кг/моль) $\upsilon = 970$ м/с,

в водороде ($\mu = 2{\cdot}10^{-3}$ кг/моль) $\upsilon = 1270$ м/с.

В жидкостях и твердых телах скорость звука еще больше. В воде, например, =1480 м/с (при 20°С), в стали $\upsilon = 5–6$ км/с.

При восприятии различных звуков человеческое ухо оценивает их прежде всего по уровню ***громкости***, зависящей от потока энергии или ***интенсивности*** звуковой волны. Воздействие звуковой волны на барабанную перепонку зависит от ***звукового давления***, т.е. амплитуды колебаний давления p_0 в волне. Громкость звука определяется амплитудой звуковых колебаний (рис. 8.12 и 8.13).

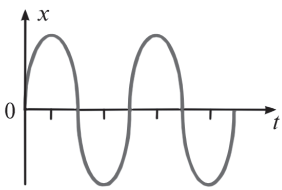


Рис. 8.12. Громкий звук

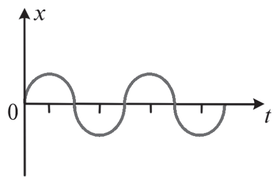


Рис. 8.13. Тихий звук

Интенсивностью звука *(силой звука) называется величина определяемая средней энергией, переносимой звуковой волной в единицу времени сквозь единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны:* $I = \dfrac{W_c\rho}{St}$ *(Вт/ м²).*

Интенсивность сферической волны убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. При увеличении радиуса, например в двое, поверхность возрастает вчетверо, а значит интенсивность звука уменьшилась в четыре раза (рис. 8.14).

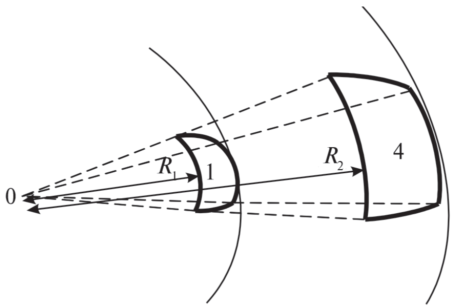


Рис. 8.14

Человеческое ухо способно воспринимать звуки в огромном диапазоне интенсивностей: от слабого писка комара до грохота вулкана. ***Порог слышимости*** соответствует значению p_0 порядка 10^{-10} атм., т.е. 10^{-5}Па. ***Болевой порог*** соответствует значению p_0 порядка 10^{-4} атм. или 10 Па (рис. 8.15). Таким образом, человеческое ухо способно воспринимать волны, в которых звуковое давление изменяется в

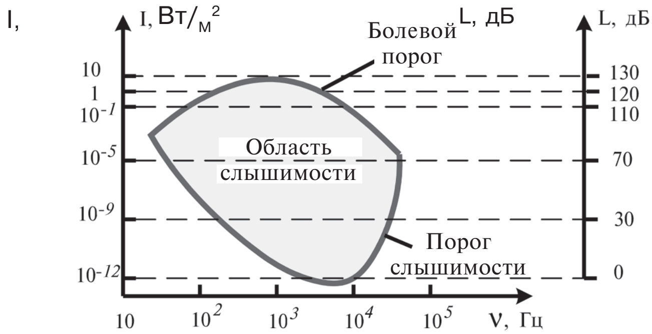


Рис. 8.15

миллион раз. Так как интенсивность звука пропорциональна квадрату звукового давления, то диапазон интенсивностей оказывается порядка 10^{12}.

Субъективной характеристикой звука, связанной с его интенсивностью, является ***громкость звука***. По физиологическому закону Вебера-Фехнера с ростом интенсивности звука громкость возрастает по логарифмическому закону: $L = \lg \dfrac{I}{I_0}$,

где I_0 – интенсивность звука на пороге слышимости, принимается равной 10^{-12} Вт/м^2 для всех звуковых частот. L – громкость звука или уровень интенсивности измеряется в ***белах***.

Обычно пользуются в десять раз меньшими *единицами-**децибелами*** **(дБ)**: $L = 10 \lg \dfrac{I}{I_0}$.

Так, если интенсивность I в миллион раз (10^6) больше порога слышимости , то логарифмирование дает значение для громкости L=6Б=60 дБ. Диапазон воспринимаемых ухом звуковых волн соответствует громкости от 0 до 130 дБ.

Еще одной характеристикой звуковых волн является ***высота звука*** (рис. 8.16 и 8.17).

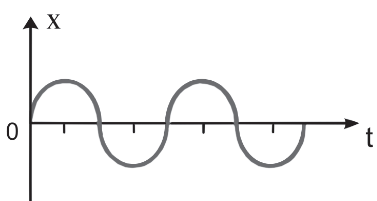


Рис. 8.16. Высокий тон

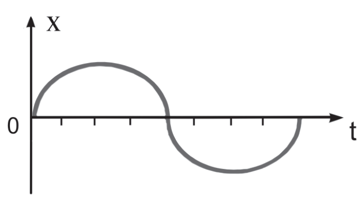


Рис. 8.17. Низкий тон

Колебания высокой частоты воспринимаются как звуки высокого тона, колебания низкой частоты – как звуки *низкого тона*.

Звуки, издаваемые музыкальными инструментами, а также звуки человеческого голоса могут сильно различаться по высоте тона и по диапазону частот. Так, например, диапазон наиболее низкого мужского голоса – баса – простирается приблизительно от 80 до 400 Гц, а диапазон высокого женского голоса – сопрано – от 250 до 1050 Гц.

Диапазон звуковых колебаний, соответствующий изменению частоты колебаний в два раза, называется *октавой*. Голос скрипки, например, перекрывает приблизительно три с половиной октавы (196–2340 Гц), а звуки пианино – семь с лишним октав (27,5–4186 Гц). Когда говорят о частоте звука, издаваемого струнами любого струнного музыкального инструмента, то имеется в виду частота ν_1 основного тона. Но в колебаниях струн могут присутствовать и гармоники, частоты ν_n которых удовлетворяют соотношению:

$$\nu_n = n\,\nu_1,\ (n = 1,2,3...).$$

Поэтому звучащая струна может излучать целый *спектр* волн с кратными частотами. Амплитуды A_n этих волн зависят от способа возбуждения струны (смычок, молоточек); они определяют музыкальную окраску звука или ***тембр***.

Трубы духовых инструментов также являются ***акустическими резонаторами***. При определенных условиях в воздухе внутри труб возникают стоячие звуковые волны. На рис. 8.18 показаны несколько типов стоячих волн (мод) в органной трубе, закрытой с одного конца и открытой с другого.

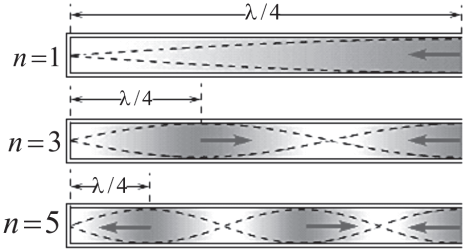


Рис. 8.18

Звуки, издаваемые трубами духовых инструментов, состоят из целого спектра волн с кратными частотами.

При *акустическом резонансе длина воздушного столба равна нечетному числу четвертей длины волны*

$$L = (2n+1)\frac{\lambda}{4}, \qquad n = 0,1,2,...$$

Стрелками показаны направления движения частиц воздуха в течение одного полупериода колебаний.

При настройке музыкальных инструментов часто используется устройство, называемое ***камертоном***. Оно состоит из металлической вилки и скрепленного с ним деревянного акустического резонатора настроенных в резонанс. При ударе молоточком по вилке вся система возбуждается и издает чистый музыкальный тон.

Акустическим резонатором является и гортань певца.

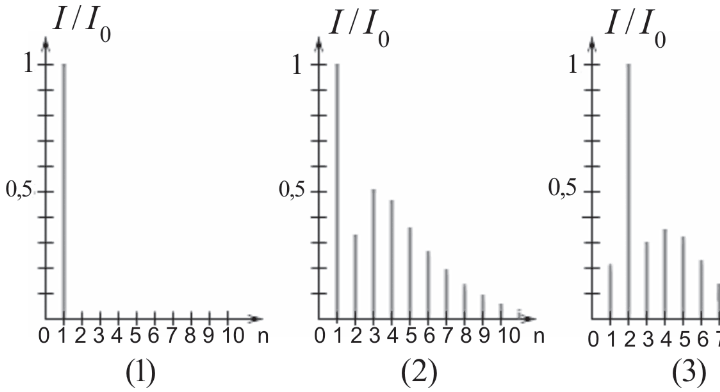


Рис. 8.19

На рис. 8.19 показаны относительные интенсивности I/I_0 гармоник в спектре звуковых волн, испускаемых камертоном (1), пианино (2) и низким женским голосом (альт) (3), звучащими на ноте «ля» контроктавы (ν_1 = 220 Гц). Звуковые волны, частотные спектры которых изображены на рис. 8.19, обладают *одной и той же высотой, но различными тембрами.*

§ 56. Эффект Доплера

Если источник или *приемник звука движутся относительно друг друга со скоростью $\upsilon_{ист}$, то принимаемая частота звука ν отличается от частоты ν_0 звука, испускаемого неподвижным источником.* Этот эффект, называемый эффектом Доплера, возникает из-за того, что меняется число максимумов звуковой волны, достигающих за одну секунду нашего уха или измерительного прибора. Например, тон гудка поезда повышается по мере его приближения к платформе и понижается при удалении.

Пусть $T_0 = \dfrac{1}{\nu_0}$ – период колебаний неподвижного источника звука и, следовательно, период звуковой волны (рис. 8.20, 8.21). Это означает, что каждые T_0 секунд максимум звуковой волны покидает источник. Если источник неподвижен, то за время T_0 максимум волны проходит расстояние $\lambda_0 = \upsilon T_0$, равное длине волны испускаемого звука (υ – скорость звуковой волны, которая является постоянной и зависит только от свойств среды).

Скорости $\upsilon_{ист}$ и $\upsilon_{пр}$ измеряются относительно воздуха или другой среды, в которой распространяются звуковые волны. Если источник движется со скоростью $\upsilon_{ист}$ вдоль оси x, то расстояние между двумя максимумами, приходящими к приемнику, становится равным: $\lambda = \upsilon T_0 - \upsilon_{ист} T_0$.

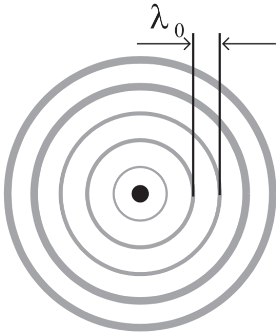


Рис. 8.20

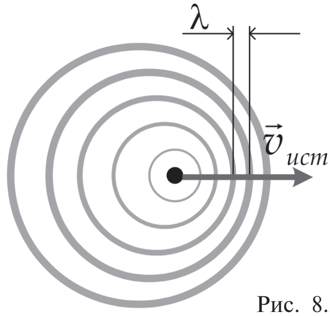


Рис. 8.21

Это расстояние воспринимается приемником как длина звуковой волны $\lambda = \upsilon T$. Отсюда:

$$T = T_0\left(1 - \frac{\upsilon_{ист}}{\upsilon}\right) \quad \text{или} \quad \nu = \nu_0 \frac{\upsilon}{\upsilon - \upsilon_{ист}}.$$

Из этой формулы следует, что если источник приближается, то частота звука возрастает, если источник удаляется (меняется знак скорости), то частота звука уменьшается.

Очевидно, что аналогичная формула будет верна, если источник неподвижен, а приемник звука движется со скоростью $\upsilon_{пр}$.

В этом случае: $\lambda = \upsilon T_0 = \upsilon T - \upsilon_{пр} T$. $\nu = \nu_0\left(1 - \frac{\upsilon_{пр}}{\upsilon}\right)$.

Если приемник приближается (скорость приемника отрицательна), то частота возрастает, если приемник удаляется, то частота звука уменьшается.

В общем случае, когда и источник, и наблюдатель движутся со скоростями $\upsilon_{ист}$ и $\upsilon_{пр}$, формула для эффекта Доплера имеет вид:

$$\nu = \frac{\upsilon \pm \upsilon_{пр}}{\upsilon \mp \upsilon_{ист}} \nu_0.$$

Знак плюс в числителе соответствует приближению приемника к источнику, знак минус – его удалению от источника; в знаменателе знак плюс соответствует удалению источника от приемника, знак минус – приближение его к приемнику.

Доплер-эффект широко используется в технике для измерения скоростей движущихся объектов («доплеровская локация» в акустике, оптике и радио).

Вопросы и задания

1. Что называется волной?

2. Какие волны называют поперечными? Продольными?

3. В чем состоит различие между поперечными и продольными волнами?

4. Почему в газах и жидкостях не существует поперечных волн?

5. Что называют длиной волны?

6. Какова разность фаз колебаний двух точек пространства, колеблющихся на расстоянии, равном длине волны?

7. Запишите уравнение бегущей волны. Что называется волновым числом?

8. Какую волну называют плоской? Сферической?

9. Какие волны называются когерентными?

10. Что называют интерференцией?

11. Сформулируйте условия максимумов и минимумов интерференционной картины.

12. Как формулируется принцип Гюйгенса?

13. При каком условии дифракция волн проявляется особенно отчетливо?

14. Какие колебания называют акустическими?

15. От чего зависит скорость звука в воздухе?

16. Чем определяется громкость звука и его высота?

17. В чем измеряется громкость звука?

18. В чем суть эффекта Доплера?

Тестовые задания

1. (03/9-44). В каком направлении колеблются частицы среды в продольной волне?

A) во всех направлениях.

B) в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны.

C) только в направлении распространения волны.

D) в направлении распространения волны и в перпендикулярном направлении. E) НПО.

2. (03/9-45). В каком направлении колеблются частицы среды в поперечной волне?

A) во всех направлениях.

B) в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны.

C) только в направлении распространения волны.

D) в направлении распространения волны и в перпендикулярном направлении. E) НПО.

3. (97). Какова длина поперечной волны, если расстояние между первым и пятым горбами равно 40 м?

A) 20 м. B) 40 м. C) 4 м. D) 8 м. E) 10 м.

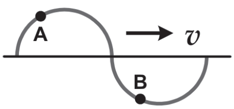
4. (97). Какие из следующих волн являются продольными: 1) волны на поверхности воды; 2) звуковые волны; 3) электромагнитные волны; 4) волны, возникающие в струнах музыкальных инструментов.

A) 1. B) 2. C) 3. D) 1 и 2. E) 4.

5. (00/3-39). Какие из перечисленных волн являются поперечными?

A) звуковые волны в газах. B) ультрафиолетовое излучение.
C) ультразвук. D) звуковые волны в жидкостях. E) НПО.

6. (02/9-6). Поперечная волна распространяется направо. В каком направлении движутся точки A и B в данный момент?



A) A и B вправо. B) A и B вниз.
C) A и B вверх. D) A - вверх, B - вниз.
E) A - вниз, B - вверх.

7. (00/3-35). Какие механические волны распространяются в газах?

A) волны в газах распространяться не могут.
B) поперечные. C) продольные.
D) и продольные, и поперечные. E) НПО.

8. (03/10-39). Какие из следующих параметров механической волны не изменятся при переходе из воздуха в воду: 1) скорость; 2) длина волны; 3) частота?

A) 3. B) 2. C) 1. D) 1 и 3. E) 2 и 3.

9. (97). Какова длина волны, если на расстоянии 18 м укладывается 4,5 длины волны?

A) 2 м. B) 4,5 м. C) 4 м. D) 3 м. E) 6 м.

10. (97). По шнуру распространяется волна с частотой 4 Гц и скоростью 8 м/с. Определите длину волны.

A) 2 м. B) 32 м. C) 4 м. B) 12 м. E) 0,5 м.

11. (97). Определить длину стоячей волны, если расстояние между первым и третьим узлами равно 0,2 м.

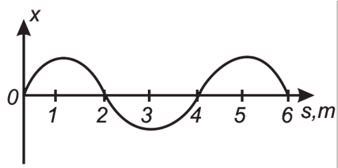
A) 1 м. B) 0,7 м. C) 0,4 м. D) 0,2 м. E) 0,1 м.

12. (97). Найдите длину волны, если расстояние между узлами стоячей волны 0,5 м.

A) 0,25 м. B) 0,5 м. C) 0,75 м. D) 1 м. E) 2 м.

13.(98/5-47). Определите длину волны, представленной на рисунке.

A) 5 м. B) 0,1 м. C) 4 м.
D) 2 м. E) 0,2 м.



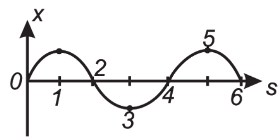
14. (03/10-35). Разность фаз колебаний в двух точках, расположенных на одной линии вдоль направления распространения волны, равна 2π. Какова длина волны (м), если расстояние между этими точками равно 2 м?

A) 2π. B) 4π. C) 1. D) 2. E) 4.

15. (01/2-44). При наименьшем расстоянии между двумя точками в плоской волне, распространяющейся вдоль оси *x*, колеблющимися в противофазе, равном 1 м, длина волны (м) равна ...

A) 1. B) 2. C) 4. D) 4π. E) 8π.

16. (99/2-44). На рисунке представлен профиль волны в определенный момент времени. Чему равна разность фаз колебании в точках 0 и 4?



A) $\frac{\pi}{3}$ B) 2π. C) π. D) $\frac{\pi}{2}$. E) $\frac{\pi}{4}$.

17. (03/9-9). Пробка колеблется на волнах 10 раз за 5 с. Какова скорость распространения волны (м/с), если расстояние между двумя соседними горбами волны равно 1 м?

A) 2,5. B) 1. C) 2. D) 3. E) 2.

18. (03/10-40). Человек услышал звук сирены через 5 с после его издания. На каком расстоянии (м) находится сирена, если частота звука равна 2 кГц, а длина волны −15 см?

A) 100. B) 10000. C) 3000.
D) 2000. E) 1500.

19. (03/8-22). Как изменится длина звуковой волны при переходе из воздуха в воду? Скорость звука в воздухе $\upsilon_{воз}$=330 м/с, в воде − $\upsilon_{вода}$=1485 м/с.

A) не изменится. B) уменьшится в 4,5 раза.
C) увеличится в 2,25 раз. D) увеличится в 4,5 раза.
E) уменьшится в 2,25 раза.

20. (03/11-5). Глубина моря определяется эхолотом. Какова эта глубина (м), если импульсы ультразвука, посланные эхолотом, возвратились через 2 с? Скорость звука в воде 1480 м/с.

A) 370. B) 740. C) 1480. D) 2960. E) 5920.

21. (03/6-37). Стрелок услышал звук от попадания пули в цель через 3 с после выстрела. Какова дальность цели (м), если скорость пули равна 680 м/с? Скорость звука в воздухе равна 340 м/с.

A) 340. B) 680. C) 1360. D) 1020. E) 2040.

22. (97). В какой среде скорость распространения звуковой волны самая большая?

A) в воздухе. B) в воде. C) в твердом металлическом теле. D) в вакууме. E) не зависит от среды.

23. (98/2-50). От чего зависит громкость звука?

A) от скорости распространения звука. B) от фазы колебания. C) от длины волны. D) от амплитуды колебаний. E) от частоты.

24. (99/1-50). От чего зависит высота звука?

A) от фазы колебаний. B) от длины волны. C) от частоты колебаний. D) от амплитуды колебаний. E) НПО.

25. (99/1-51). При переходе звуковой волны из одной среды в другую длина волны увеличилась в 2 раза. Изменится ли при этом высота звука?

A) увеличится в 2 раза. B) увеличится в 4 раза. C) уменьшится в 4 раза. D) не изменится. E) уменьшится в 2 раза.

26.(00/4-35). Какие звуки относятся к ультразвукам?

A) частота которых меньше 200 Гц.
B) частота которых меньше 20 Гц.
C) частота которых находится в интервале 20 − 20000 Гц.
D) частота которых больше 20000 Гц.

27.(03/3-68 и 00/4-32). Какая величина не изменяется при переходе звука из воздуха в воду?

A) скорость. B) длина волны. C) частота. D) частота и длина волны. E) НПО.

28.(10-18). Расстояние между первым и третьим гребнями волны равно 18 см. Чему равна длина волны (см)?

A) 18. B) 9. C) 36. D) 54. E) 72.

29.(7-20). Наблюдатель определил, что расстояние между соседними гребнями волн 12 м. Чему равна скорость распространения волны (м/с), если гребень волны проходит мимо наблюдателя через каждые 6 с?

A) 2. B) 4. C) 6. D) 12. E) 18.

РАЗДЕЛ II

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Введение

Молекулярная физика — раздел физики, изучающий строение и свойства вещества исходя из молекулярно-кинетических представлений, основывающихся на том, что все тела состоят из частиц (молекул, атомов), находящихся в непрерывном движении. Идея об атомном строении вещества возникла в древней Греции в трудах ученых-философов Демокрита и Эпикура (460 −270 гг. до н.э.). Мельчайшую частицу вещества Демокрит назвал атомом, что в переводе с греческого означает «неделимый». Ар-Рази, Ибн Сина, Беруни развили атомистические представления и объяснили тепловые процессы, тепловое расширение и процессы диффузии. Абдурахман Хазини (XII век) создал весы. Беруни (973—1050) определил удельный вес различных веществ с большой точностью, изучил структуры различных минералов. Атомистические представления возродились вновь лишь в XVIII веке в работах М.В. Ломоносова, взгляды которого на строение вещества и тепловые явления близки к современным. М.В. Ломоносов впервые объяснял тепловые явления на основе движения молекул, а не перетеканием «теплорода». Строгое развитие молекулярной теории относится к середине XIX века и связано с трудами немецкого физика Р. Клаузиуса, английского физика Дж. Максвелла, австрийского физика Л. Больцмана.

Процессы, изучаемые молекулярной физикой, являются результатом действия огромного числа молекул и подчиняются статистическим закономерностям.

Термодинамика − раздел физики, изучающий термические свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, процессы перехода между этими состояниями, не рассматривая микропроцессы, которые лежат в основе этих превращений.

Глава IX
ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

§ 57. Молекулярно-кинетические представления

Молекулярно-кинетической теорией *называется теория, объясняющая свойства и особенности веществ на основе движения и взаимодействия атомов и молекул, из которых они состоят.*

Основные положения молекулярно-кинетической теории (МКТ):

1) все вещества состоят из частиц – атомов или молекул, межу которыми имеются промежутки;

2) молекулы движутся непрерывно и хаотично (беспорядочно);

3) частицы взаимодействуют друг с другом (существуют силы взаимного притяжения и отталкивания).

Доказательства основных положений МКТ:

* Механическое дробление веществ.
* Растворение веществ в жидкостях.
* Диффузия веществ друг в друга.
* Сжатие и расширение газов.
* Броуновское движение.
* Получение изображений крупных молекул с помощью современных микроскопов, а также отдельных атомов на ионном проекторе и в туннельном микроскопе.

Молекула — мельчайшая частица вещества, обладающая его физическими и химическими свойствами, способная существовать самостоятельно. Молекула состоит из одного или нескольких атомов.

Атом состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов, вращающихся вокруг ядра, составляя электронную оболочку. Атом в целом электрически нейтрален. *Электрон* может покинуть атом и стать свободным. Атом с недостающими электронами превращается в *положительный ион*. Некоторые из свободных электронов присоединяются к нейтральной молекуле, превращая ее в *отрицательный ион*.

Молекулы, атомы, положительные и отрицательные ионы, свободные электроны являются *структурными элементами* вещества.

Масса молекулы. Массы атомов (молекул) весьма малы в привычных единицах (порядка 10^{-26} кг), поэтому для их описания используют относительные единицы.

Атомная единица массы – 1/12 массы атома углерода.

1 а.е.м.$=1/12\ m_{0c}=1{,}66\cdot10^{-27}$ кг.

Относительная молекулярная масса:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}} = \frac{m_0}{1\, а.е.м},$$ где m_0 — масса молекулы.

M_r — безразмерная величина.

M_r показывает, во сколько раз масса молекулы больше 1/12 массы атома углерода или 1 а.е.м.

Количество вещества. Число Авагадро:

ν (моль) – количество вещества. 1 моль – это количество вещества, масса которого в граммах численно равна относительной молекулярной массе вещества.

1 моль любого вещества содержит одинаковое число атомов, (молекул), равное числу атомов в 0,012 килограммах углерода.

$N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ *1/моль* — число Авогадро.

Число Авогадро показывает, сколько атомов (молекул) содержится в одном моле любого вещества.

Количество вещества можно определить по формуле $\nu = \dfrac{N}{N_A}$,

где N – число атомов.

Молярная масса μ – масса вещества в количестве одного моля,

$$\mu\left(\frac{кг}{моль}\right). \qquad \mu = m_0 N_A \Rightarrow m_0 = \frac{\mu}{N_A},$$

где m_0 – масса одного атома.

Связь относительной молекулярной массы M_r и молярной массы μ:

$$\mu = M_r \cdot 10^{-3}\ \frac{кг}{моль}.$$

Число молей ν и число атомов N в веществе массой m определяют по формулам:

$$\nu = \frac{m}{\mu} = \frac{N}{N_A} \Rightarrow N = \frac{m}{\mu} N_A.$$

Размеры молекул.

Размеры атомов (молекул) равны 10^{-10}–10^{-9} м. Число атомов (молекул) в единице объема вещества (твердого тела или жидкости) порядка 10^{22} в 1 см^3.

Метод масляной пленки это наиболее простой метод оценки размера молекул. При растекании масла по поверхности воды оно образует слой толщиной в одну молекулу (рис. 9.1).

Рис. 9.1

$d = \dfrac{V}{S}$, $d \sim 10^{-8}$ см $= 1A^{\circ}$ — *ангстрем*, где:

d — диаметр молекулы (толщина слоя пленки),
V — объем масляной капли,
S — площадь масляной пленки.

Линейный размер a, приходящийся на один атом, можно определить по формуле:

$$a = \sqrt[3]{V_1} = \sqrt[3]{\frac{m}{\rho N}} = \sqrt[3]{\frac{N\mu}{N_A \rho N}} = \sqrt[3]{\frac{\mu}{\rho N_A}},$$

где V_1 — объем, приходящийся на один атом;
m — масса вещества; ρ — плотность вещества;
N — число атомов (молекул); μ — молярная масса.

§ 58. Взаимодействие молекул

Взаимодействие молекул имеет электромагнитную природу.

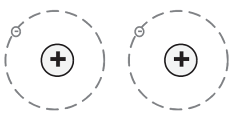


Рис. 9.2

Атом имеет положительно заряженное ядро и отрицательную оболочку. Два соседних атома взаимодействуют так, что одновременно существует и сила притяжения и сила отталкивания (рис. 9.2).

Электрон и ядро притягиваются; ядро и ядро, электрон и электрон отталкиваются.

Сила взаимодействия является результирующей сил притяжения и отталкивания (рис. 9.3).

При $r = r_0$, $F = 0$ — положение равновесия;

При $r < r_0$, $F > 0$ – силы отталкивания больше, чем силы притяжения.

При $r > r_0$, $F < 0$ – силы притяжения больше, чем силы отталкивания.

При $r \to \infty$, $F \to 0$.

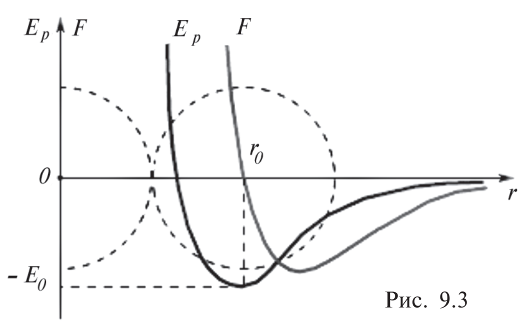


Рис. 9.3

При $r = r_0$ — сила притяжения равна силе отталкивания, сила взаимодействия обращается в нуль. Это расстояние условно принимают за диаметр молекулы. Потенциальная энергия E_p взаимодействия при $r = r_0$ минимальна. Чтобы удалить друг от друга две молекулы, находящиеся на расстоянии r_0, нужно сообщить им дополнительную энергию E_0, называемую энергией связи.

Силы взаимодействия стремятся вернуть молекулы в положение равновесия, что объясняет происхождение сил упругости и справедливость закона Гука при упругих деформациях.

§ 59. Броуновское движение

Броуновское движение – это тепловое движение мельчайших частиц, взвешенных в жидкости или газе (рис. 9.4).

Рис. 9.4

Оно было открыто английским ботаником Броуном и явилось наглядным доказательством *хаотичного молекулярного движения*. Броуновские частицы движутся под влиянием ударов молекул. Из-за хаотичности теплового движения молекул эти удары никогда не уравновешивают друг друга.

В результате скорость броуновской частицы беспорядочно меняется по величине и направлению, а ее траектория представляет собой сложную зигзагообразную кривую.

Молекулярно – кинетическая теория броуновского движения была создана А. Эйнштейном.

Основные закономерности броуновского движения:

1. Движение броуновской частицы непрерывно и хаотично.

2. Траектория представляет собой сложную зигзагообразную кривую.

3. Характер движения не зависит от биологических свойств вещества (неживая природа броуновского движения).

4. Скорость движения частиц обратно пропорциональна их массам $\upsilon \sim \dfrac{1}{m}$.

5. Квадрат смещения r^2 броуновской частицы от начального положения, усредненный по многим броуновским частицам, изменяется пропорционально времени (диффузионный закон)

$$\langle r^2 \rangle = Dt\ ,$$

при этом коэффициент диффузии D пропорционален абсолютной температуре T.

§ 60. Диффузия газов

Диффузией называется *процесс самопроизвольного выравнивания концентраций молекул жидкости или газа в различных частях объема*. Диффузия приближает систему к состоянию термодинамического равновесия. Если в двух половинах сосуда находятся разные газы (при одинаковых температуре и давлении) и между ними нет разделяющей перегородки, то вследствие теплового движения молекул возникает процесс *взаимопроникновения* газов. Этот процесс называется диффузией. Скорость диффузии сильно зависит от температуры и длины *свободного пробега молекул*, то есть от среднего расстояния, которое пролетают молекулы между двумя последовательными соударениями с другими молекулами. Процесс диффузии протекает достаточно медленно, если длина свободного пробега намного меньше размеров сосуда. Взаимопроникновение молекул из одной половины сосуда в другую, соединенных трубкой, также называют диффузией. Скорость процесса в этом случае сильно зависит от геометрических размеров соединительной трубки.

§ 61. Измерение температуры

Рис. 9.5

1. ***Температура*** – физическая величина, определяющая степень нагретости тела.

2. *Температура указывает направление передачи теплоты (от горячего тела к холодному).*

3. *Температура характеризует состояние теплового равновесия (при тепловом равновесии температуры тел равны между собой).*

Для измерения температуры используются физические приборы – *термометры*, в которых о величине температуры судят по изменению какого-либо физического параметра (рис. 9.5). В общеизвестном ***ртутном термометре*** значение температуры определяется по высоте подъема столбика ртути в капилляре. Градуировка этого термометра использует тот факт, что термометрическая величина объема ртути изменяется прямо пропорционально температуре. Наиболее распространена в быту шкала Цельсия, в которой за начало отсчета температуры (0 °C) принимается температура тающего льда, а второй опорной точкой (100 °C) является температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении. Интервал между этими опорными точками делится на сто равных частей (градусы).

В ***газовом термометре*** термометрическим веществом является разреженный газ (гелий, воздух) в сосуде неизменного объема (V=const), а термометрической величиной – давление газа p. Опыт показывает, что давление газа (при V=const) линейно растет с ростом температуры (рис. 9.6).

Чтобы проградуировать газовый термометр постоянного объема, можно измерить давление при двух значениях температуры (например, 0˚ C и 100 ˚C), нанести точки p_0 и p_{100} на график, а затем провести между ними прямую линию. Эти точки называют реперными точками (рис. 9.7).

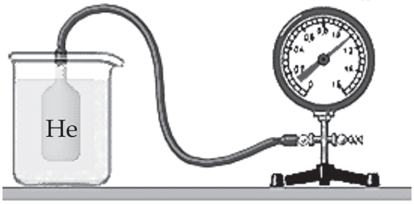


Рис. 9.6

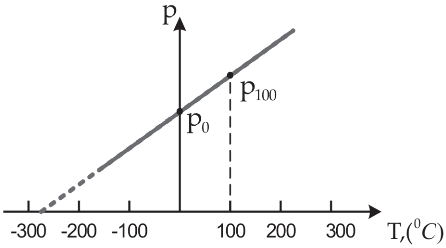


Рис. 9.7

Используя полученный таким образом график, можно определять температуры, соответствующие другим значениям давления. Экстраполируя график в область низких давлений, можно определить некоторую «гипотетическую» температуру, при которой давление газа стало бы равным нулю. Эта температура равна −273,15 ˚C *и не зависит от свойств газа.* На опыте невозможно получить путем охлаждения газ в состоянии с нулевым давлением, так как при очень низких температурах все газы переходят в жидкие или твердые состояния.

Температуры ниже абсолютного нуля в природе быть не может.

Для измерения температуры в настоящее время применяют три шкалы (рис. 9.8).

1. Термодинамическую абсолютную шкалу Кельвина, $T = t + 273,15$. 2. Международную практическую шкалу Цельсия, t ˚C. 3. Шкалу Фаренгейта (применяется в США и некоторых др. странах).

$$F = \frac{9}{5}t + 32.$$

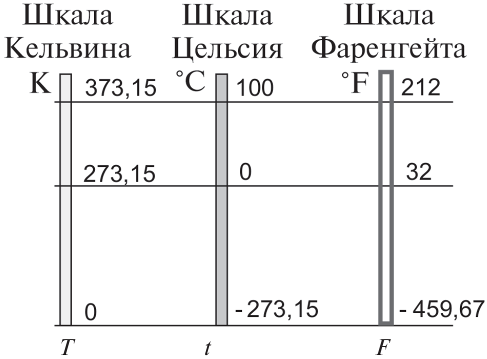


Рис. 9.8

Английский физик У. Кельвин (Томсон) в 1848 г. предложил использовать точку нулевого давления газа для построения новой температурной шкалы (*шкала Кельвина*). В этой шкале единица измерения температуры такая же, как и в шкале Цельсия, но нулевая точка сдвинута: $T_K = t_c + 273{,}15$.

В системе СИ принято единицу измерения температуры по шкале Кельвина называть *кельвином* и обозначать буквой К. Например, комнатная температура $t_c = 20°C$ по шкале Кельвина равна $T_K = 293{,}15K$.

Температурная шкала Кельвина называется *абсолютной шкалой температур*.

Кроме точки нулевого давления газа, которая называется ***абсолютным нулем температуры***, достаточно принять еще одну фиксированную опорную точку. В шкале Кельвина в качестве такой точки используется *температура тройной точки воды* (0,01 °С), в которой в тепловом равновесии находятся все три фазы – лед, вода и пар. По шкале Кельвина температура тройной точки принимается равной 273,16К.

§ 62. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории

Идеальный газ:

1. Собственный объем молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда.
2. Между молекулами газа отсутствуют силы взаимодействия.
3. Столкновения молекул между собой и со стенками центральные и абсолютно упругие.

Идеальный газ – это модель. Реальный газ близок к идеальному при давлениях $p \leq 10$ атм.

В кинетической модели идеального газа молекулы рассматриваются как идеально упругие шарики, взаимодействующие между собой во время столкновений центральными силами. В результате каждого столкновения между молекулами их скорости изменяются по величине и направлению. В газах обычно среднее расстояние между молекулами значительно превышает их размер; поэтому на интервалах между последовательными соударениями молекулы двигаются равномерно и прямолинейно. Соударения приводят к случайному движению молекул, которое принято называть *тепловым движением*.

Давление газа на стенку сосуда.

При своем движении молекулы газа ударяют о стенку сосуда. Совокупность множества ударов молекул создает давление газа на стенку сосуда (рис. 9.9).

Удар одной молекулы массой m_0 о стенку изменяет ее импульс на $2m_0\bar{v}$. За время t площадки S достигнут молекулы, удаленные от нее на расстояние $\bar{v}t$, где $\bar{v}$ — средняя скорость движения молекул.

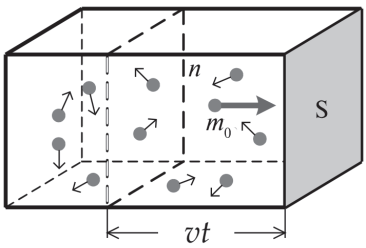


Рис. 9.9

В выделенном объеме $\bar{v}tS$ число молекул равно $n\bar{v}tS$, где n — концентрация молекул.

У прямоугольного сосуда 6 граней (стенок), поэтому число ударов z в одну стенку, равно $\frac{1}{6}$ числа молекул в выделенном объеме. $z = \frac{1}{6}n\bar{v}tS.$

Полное изменение импульса стенки равно:

$$2m_0\bar{v}z = 2m_0\bar{v}\cdot\frac{1}{6}n\bar{v}tS = \frac{1}{3}nm_0\bar{v}^2tS.$$

Так как импульс силы Ft равен изменению импульса тела, получим:

$$Ft = \frac{1}{3}nm_0\bar{v}^2tS.$$

Найдем давление p: $p = \frac{F}{S} = \frac{1}{3}nm_0\bar{v}^2.$ (1)

Полученное выражение является основным уравнением молекулярно-кинетической теории.

Заменяя $\frac{m_0\bar{v}^2}{2} = \bar{E}$, где $\bar{E}$ – средняя кинетическая энергия движения молекул, получим основное уравнение молекулярно-кинетической теории в следующем виде:

$$p = \frac{2}{3}n\bar{E}. \tag{2}$$

Давление идеального газа пропорционально произведению числа молекул в единице объема на среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекулы.

Несложные преобразования дают еще одну форму записи основного уравнения МКТ:

$$p = \frac{2}{3}nm_0\bar{v}^2 = \frac{1}{3}\frac{N}{V}m_0\bar{v}^2 = \frac{1}{3}\frac{m}{V}\bar{v}^2 = \frac{1}{3}\rho\bar{v}^2, \tag{3}$$

где ρ − плотность газа, а $m = Nm_o$ — вся масса газа.

Итак, основное уравнение МКТ можно выразить одной из трех формул (1), (2), (3).

§ 63. Уравнение состояния идеального газа

Термодинамические параметры

Состояние газа определяется параметрами: давлением p (*Па*), объемом V($м^3$), температурой Т(К).

Термодинамическое равновесие.

Система, состоящая из нескольких тел, самопроизвольно стремится к состоянию термодинамического равновесия, при котором температуры тел выравниваются, а давления и объемы остаются неизменными.

Две системы, находящиеся в тепловом равновесии с третьей системой, находятся в тепловом равновесии друг с другом (нулевой закон термодинамики).

Опытным путем было установлено, что для данной массы газа справедливо соотношение:

$$\frac{pV}{T} = const \quad \text{или} \quad \frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} \quad \text{(ур. Клайперона).} \qquad (1)$$

Как следует из закона Авогадро, один моль идеального газа, при нормальных условиях ($p_0 = 1{,}013 \times 10^5 Па = 1\ атм;\ T_0 = 273\ K$) занимает объем $V_м = 22{,}4\ дм^3$.

Подставив эти значения в формулу (1), получим

$$\frac{p_0V_м}{T_0} = \frac{1{,}013\times10^5\times22{,}4\times10^{-3}}{273} = 8{,}31\frac{Dж}{моль\times град}.$$

$R = 8{,}31\dfrac{Dж}{моль\times град}$ — универсальная газовая постоянная.

$\dfrac{p_0V_м}{T_0} = R.$ Умножив левую и правую части на ν, учтем, что $V_м\nu = V$; получим уравнение состояния идеального газа:

$$\frac{p_0V}{T_0} = \frac{PV}{T} = \nu R \quad \text{или в виде:}$$

$$PV = \nu RT \quad \text{(ур. Менделеева − Клайперона).} \qquad (2)$$

где ν — число молей газа в сосуде, $R=8.31$ *Дж/(моль К)* − универсальная газовая постоянная.

После преобразований выражения (2) учитывая, что

$v = \dfrac{N}{N_A}, \quad k = \dfrac{R}{N_A} = 1,38 \times 10^{-23}\ \dfrac{Дж}{град}$ — постоянная Больцмана и

$n = \dfrac{N}{V}$ — концентрация, получим уравнение для вычисления давления газа в зависимости от концентрации и температуры

$$p = nkT. \qquad (3)$$

Итак, уравнение состояния идеального газа можно выразить одной из трех формул (1), (2), (3).

§ 64. Температура — мера движения молекул

Из уравнений $p = \dfrac{2}{3} n\bar{E}$ и $p = nkT$, приравнивая правые части,

получим: $\bar{E} = \dfrac{3}{2} kT$ — для одноатомного газа.

где $k = 1,38 \times 10^{-23}$ *дж/К* − постоянная Больцмана.

Средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул газа прямо пропорциональна абсолютной температуре.

Температура есть мера средней кинетической энергии теплового движения молекул.

Скорость движения молекул идеального газа.

Для идеального газа кинетическая энергия выражается формулами:

$\bar{E} = \dfrac{m_0 \bar{\upsilon}^2}{2}$ и $\bar{E} = \dfrac{3}{2} kT$; приравняв правые части, получим:

$$\frac{m_0 \bar{\upsilon}^2}{2} = \frac{3}{2} kT \Rightarrow \quad \bar{\upsilon} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}.$$

Последняя формула позволяет теоретически вычислить среднюю скорость движения молекул газа, зная его температуру T и молярную массу μ. $\bar{\upsilon} = \sqrt{\bar{\upsilon}^2}$ — среднеквадратичная скорость.

Отметим, что величина средней скорости движения молекул газа весьма значительна. Например, средняя скорость движения молекул кислорода при комнатной температуре составляет ≈ 500 м/с.

О. Штерн экспериментально определил скорость движения молекул, используя метод молекулярных пучков (Нобелевская премия 1945 г). Опытное значение скорости (для молекул серебра) совпало с теоретическим, что подтвердило справедливость молекулярно-кинетической теории.

Опыт Штерна:

Прибор, использованный Штерном для определения скоростей молекул, состоит из двух скрепленных коаксиальных цилиндров. (рис. 9.10). Цилиндры могут быть приведены во вращение с большой угловой скоростью. В поверхности внутреннего цилиндра сделана щель. По оси цилиндров расположена серебряная проволока, которая при нагревании испаряется. Весь прибор находится в вакуумной камере.

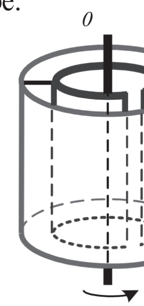


Рис. 9.10

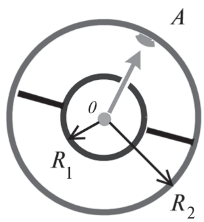


Рис. 9.11

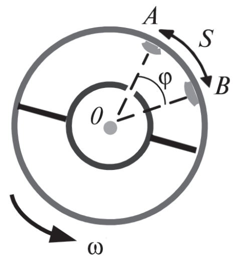


Рис. 9.12

Если цилиндры неподвижны, то испарившиеся атомы серебра, проходя через щель во внутреннем цилиндре, осаждаются полосой против щели на внутренней поверхности внешнего цилиндра (рис. 9.11). Если теперь привести цилиндры во вращение с известной угловой скоростью (в опыте Штерна частота вращения равнялась ν =1500 с$^{-1}$), то за время, пока пучок атомов серебра, двигаясь со средней скоростью $\bar{\upsilon}$, пролетит расстояние между цилиндрами $t = (R_2 - R_1)/\bar{\upsilon}$, точка *A*, находящаяся на одном радиусе со щелью *0*, сдвинется в точку В на расстояние $s = 2\pi R_2 \nu t$ (рис. 9.12). Отсюда можно определить среднюю скорость движения молекул:

$$\bar{\upsilon} = \frac{2\pi\nu(R_2 - R_1)R_2}{s}.$$

Выводы из опыта Штерна:

1. Скорость движения молекул, полученная экспериментально совпадает с вычисленной при температуре *T* опыта, по формуле $\bar{\upsilon} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$, вытекающей из МКТ, и подтверждает справедливость данной теории.

2. Молекулы движутся с различными скоростями. Исследуя толщину осажденного слоя, можно оценить распределение молекул по скоростям, которое соответствует максвелловскому распределению.

Распределение Максвелла.

Распределение молекул газа по величине скоростей называется распределением Максвелла (рис. 9.13).

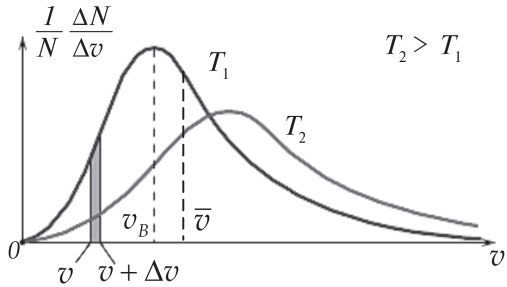


Рис. 9.13

Молекулы газа вследствие теплового движения испытывают многочисленные соударения друг с другом. При каждом соударении скорости молекул изменяются как по величине, так и по направлению.

В результате в сосуде, содержащем большое число молекул, устанавливается некоторое статистическое распределение молекул по скоростям, зависящее от абсолютной температуры Т. При этом все направления векторов скоростей молекул оказываются равноправными (равновероятными), а величины скоростей подчиняются определенной закономерности.

Если одновременно измерить скорости большого числа N (площадь фигуры под графиком) молекул газа и выделить некоторый малый интервал скоростей от υ до $\upsilon + \Delta\upsilon$, то в выделенный интервал $\Delta\upsilon$ попадает некоторое число ΔN молекул (площадь узкой полоски).

На графике удобно изображать зависимость величины $\frac{\Delta N}{\Delta \upsilon}$ от скорости υ.

При достаточно большом числе N эта зависимость изображается плавной кривой, имеющей максимум при $\upsilon_в$.

$\upsilon_в = \upsilon_m = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$ — наиболее вероятная скорость.

Характерным параметром распределения Максвелла является среднеквадратичная скорость $\overline{\upsilon} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$.

При повышении температуры максимум функции распределения молекул по скоростям смещается вправо, однако площадь, ограниченная кривой, остается неизменной, так как общее число молекул не зависит от температуры. Поэтому при повышении температуры кривая распределения будет растягиваться и понижаться.

Отметим, что форма полоски напыленных молекул в опыте Штерна напоминает в разрезе по форме кривую распределения молекул по скоростям.

§ 65. Изопроцессы. Газовые законы

Изопроцессами *называются такие процессы, в которых один из параметров p, V или T остается неизменным.*

Изобарический процесс.

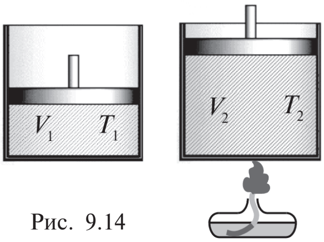


Рис. 9.14

Изобарический процесс — это процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном давлении p.

Объем изменяется прямо пропорционально температуре (рис. 9.14).

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}.$$

Для одного моля идеального газа при *p=const,* уравнение состояния идеального газа примет вид:

$$\frac{V}{T} = \frac{R}{p} = const. \qquad (1)$$

Закон Гей-Люссака: *отношение объема к температуре постоянно для газа данной массы, если давление газа не меняется.*

В осях (V, T) изобарические процессы при разных значениях давления p изображаются семейством прямых линий, которые называют *изобарами* (рис. 9.15).

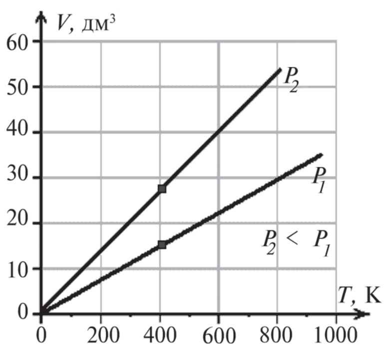


Рис. 9.15

Пусть $\dfrac{V}{T} = \dfrac{V_0}{T_0}$, $\quad \dfrac{1}{T_0} = \dfrac{1}{273^0} = \alpha,$

$\alpha\left(\dfrac{1}{град}\right)$ – температурный коэффициент объемного расширения.

Отсюда: $V = \alpha V_0 T.$ (2)

Учитывая, что $T = 273^0 + t$, получим формулу $V = V_0(1 + \alpha t).$ (3)

Закон Гей-Люссака может быть выражен формулами (1), (2), (3).

Изохорический процесс

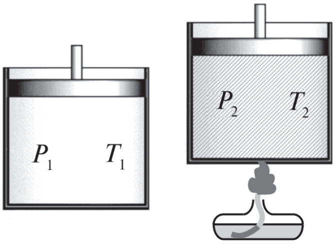


Рис. 9.16

Изохорический процесс – это процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объеме V.

Давление возрастает прямо пропорционально температуре (рис. 9.16):

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}.$$

Для одного моля идеального газа при $V=const.$ уравнение состояния идеального газа примет вид:

$$\frac{p}{T} = \frac{R}{V} = const. \qquad (1)$$

Закон Шарля: *отношение давления газа к температуре постоянно для данной массы газа, если объем газа не меняется.*

Пусть $\frac{p}{T} = \frac{p_0}{T_0}$, $\frac{1}{T_0} = \frac{1}{273^0} = \beta$, $\beta\left(\frac{1}{град}\right)$ – температурный коэффициент давления. Отсюда

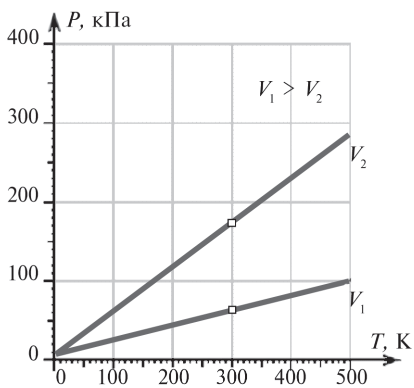


Рис. 9.17

$$p = \beta p_0 T. \qquad (2)$$

Учитывая, что $T = 273^0 + t$, получим формулу:

$$p = p_0(1+\beta t). \qquad (3)$$

Закон Шарля может быть выражен формулами (1), (2), (3).

В осях $p(T)$ изохорические процессы при разных значениях объема V изображаются семейством прямых линий, которые называют *изохорами* (рис. 9.17).

Изотермический процесс

Изотермический процесс – это процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянной температуре T.

Давление газа изменяется обратно пропорционально объему (рис. 9.18):

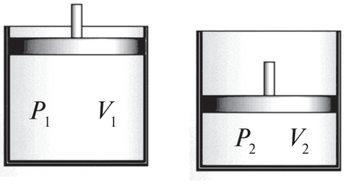


Рис. 9.18

$$p_1V_1 = p_2V_2.$$

Для одного моля идеального газа при $T=const$ уравнение состояния идеального газа примет вид: $pV = const = RT$.

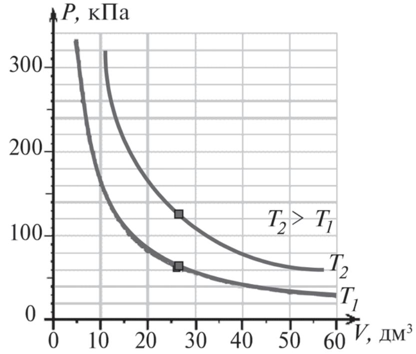


Рис. 9.19

Закон Бойля-Мариотта: *Произведение давления газа на его объем остается величиной постоянной для данной массы газа, если температура газа не меняется.*

В осях $p(V)$ изотермические процессы при различных значениях температуры T изображаются семейством гипербол, которые называются *изотермами* (рис. 9.19).

§ 66. Применение закона Бойля-Мариотта к расчету работы насоса

Поршневой насос, объем цилиндра которого V_1, соединен с баллоном объемом V_2. Первоначальное давление воздуха в баллоне $p_0 = 1$ *атм* $= 10^5$ *Па*. Насос совершает n рабочих ходов и может работать в нагнетательном или разрежающем режимах. Получим рабочую формулу для вычисления конечного давления p в баллоне.

***Нагнетательный режим*:** после n рабочих ходов поршня насос заберет из атмосферы объем воздуха nV_1 при давлении p_0. Эта масса воздуха будет введена в объем баллона V_2, создав там парциальное давление p^n. Так как изменение температуры не учитывается, то по закону Бойля-Мариотта $p_n V_2 = p_0 n V_1$, откуда:

$$p_n = p_0 \frac{V_1}{V_2} \cdot n.$$

Искомое давление p воздуха в баллоне будет равно:

$$p = p_n + p_0 = p_0\left(\frac{V_1}{V_2} n + 1\right).$$

***Разрежающий режим*:** в начале первого рабочего хода поршня воздух в баллоне занимал объем V при давлении p_0, к концу первого хода поршня та же масса воздуха займет объем $V_2 + V_1$ при давлении p_1. Так как изменение температуры не учитывается, то по закону Бойля-Мариотта $p_1(V_2+V_1) = p_0V_2$, откуда: $p_1 = \dfrac{V_2}{V_2 + V_1} p_0.$

В начале второго хода поршня объем и давление газа в баллоне равны соответственно V_2 и p_1, в конце хода они равны V_2+V_1 и p_2, откуда:

$$p_2 = \frac{V_2}{V_2 + V_1} p_1 = (\frac{V_2}{V_2 + V_1})^2 p_0.$$

Продолжая те же рассуждения, находим, что к концу n-го рабочего хода

$$p_n = (\frac{V_2}{V_2 + V_1})^n p_0.$$

§ 67. Закон Дальтона. Явление осмоса

Если в сосуде находится смесь газов, то каждый из них вносит свой вклад в общее давление. Парциальным давлением называют давление одного из газов при условии, что все остальные удалены из сосуда. Экспериментально установленный закон Дальтона утверждает:

Давление в смеси химически невзаимодействующих газов равно сумме их парциальных давлений:

$$p = p_1 + p_2 + \ldots + p_n = \sum_{i=1}^{n} p_i.$$

При этом парциальное давление каждого из газов подчиняется в случае достаточно разреженных газов ***уравнению состояния идеального газа:*** $p_1 V = \frac{m_1}{\mu_1} RT, \quad p_2 V = \frac{m_2}{\mu_2} RT,$ ... и т.д.,

где V – объем смеси; T – абсолютная температура; m_1, m_2 – массы различных газов в смеси; μ_1 , μ_2... – их молярные массы.

Примером газовой смеси является воздух, состоящий из азота, кислорода, углекислого газа и других газов.

Иллюстрацией закона Дальтона может служить процесс диффузии газа через полупроницаемую перегородку (мембрану).

Пусть в начальный момент два разных газа занимают две половины сосуда, разделенные полупроницаемой мембраной. Температуры обоих газов и их начальные давления одинаковы. Мембрана полностью непроницаема для одного из газов и частично прозрачна для другого. В процессе диффузии газа через полупроницаемую перегородку давление в одной половине сосуда возрастает в соответствии с законом Дальтона, а в другой – падает. Это явление носит название ***осмоса.***

Вопросы и задания

1. Сформулируйте основные положения МКТ.

2. Приведите примеры, подтверждающие справедливость основных положений МКТ.

3. Выведите соотношение между молярной массой и относительной молекулярной.

4. Что принято за атомную единицу массы?

5. В каких единицах измеряются: масса молекул, относительная молекулярная масса, молярная масса и количество вещества?

6. В чем состоит физический смысл числа Авогадро?

7. Оцените размер атома любого вещества (например алюминия).

8. Какова природа сил взаимодействия между молекулами?

9. Объясните происхождение сил упругости на основе МКТ.

10. Что называется броуновским движением? Назовите основные закономерности броуновского движения.

11. Почему крупные частицы не совершают броуновского движения?

12. Что называется диффузией? От чего зависит скорость диффузии?

13. Опишите модель «идеального газа».

14. Какие шкалы приняты для измерения температуры? Соотношения между ними.

15. Какими параметрами определяется состояние газа?

16. Какой параметр у нескольких тел должен быть одинаковым, если эти тела находятся в термодинамическом равновесии?

17. Какими формулами можно задать уравнения состояния идеального газа?

18. Какая температура является абсолютным нулем температуры?

19. Чем обусловлено давление газа на стенку сосуда?

20. Какой параметр состояния газа определяется основным уравнением МКТ?

21. Как определить давление газа на стенку сосуда, зная среднюю кинетическую энергию движения молекул?

22. Как определить давление газа на стенку сосуда зная плотность газа?

23. Какая физическая величина является мерой средней кинетической энергии движения молекул?

24. Начертите кривую распределения Максвелла. Что такое наиболее вероятная скорость?

25. Какие процессы называются изопроцессами? Назовите их.

26. Какой закон описывает изобарический процесс? Сформулируйте его.

27. Изобразите изобарный процесс графически в осях V(T), p(V), p(T).

28. Какой процесс называется изохорическим? Какому закону он подчиняется? Как практически его осуществить?

29. Изобразите изохоры на графиках в осях: p(T), p(V), V(T).

30. Какой процесс подчиняется закону Бойля-Мариотта?

31. Начертите изотермы, соответствующие двум температурам ($T_2>T_1$) в осях p(V) и V(T).

32. Как найти давление смеси газов, если парциальные давления каждого газа $p_1, p_2, \ldots, p_n$?

Тестовые задания

1. (00/6-22). Определите количество вещества в 16 г кислорода (в молях). $\mu = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

A) 0,5. B) 1. C) 2. D) 16. E) 32.

2. (00/5-29). Какова молярная масса газа массой *m*, если число его молекул равно *N*? N_A – число Авогадро.

A) $N\,mN_A$. *B)* $\dfrac{mN}{N_A}$. *C)* $\dfrac{m}{N}N_A$. *D)* $\dfrac{N_A}{mN}$. *E) НПО.*

3. (00/5-30). Масса одной молекулы некоторого газа равна $4{,}8 \cdot 10^{-26}$ кг. Определите молярную массу этого газа (в г/моль). $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$.

A) 8. B) 32. C) 12. D) 2. E) 29.

4. (00/1-34). Молярная масса — это ...

A) масса вещества в объеме 1 м^3 при T = 273 K.

B) масса вещества, равная массе одной молекулы, выраженной в граммах.

C) отношение массы атома данного вещества к 1/12 массы атома углерода.

D) масса вещества, содержащего NA = $6 \cdot 10^{23}$ молекул.

E) отношение массы молекулы данного вещества к 1/12 массы атома углерода.

5. (02/9-28). Сколько молекул содержится в 0,036 кг воды? $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$.

A) $3 \cdot 10^{23}$. *B)* $12 \cdot 10^{23}$. *C)* $6 \cdot 10^{20}$.
D) $6 \cdot 10^{23}$. *E)* $12 \cdot 10^{20}$.

6. (02/2-24). Сколько молекул содержится в стакане воды с объемом 200 см^3. μ =18 г/моль; $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$.

A) $6{,}5 \cdot 10^{28}$. *B)* $1{,}8 \cdot 10^{24}$. *C)* $6 \cdot 10^{25}$.
D) $6{,}7 \cdot 10^{23}$. *E)* $6{,}7 \cdot 10^{24}$.

7. (01/2-69). Во сколько раз отличаются числа молекул в водороде и кислороде, если массы газов одинаковы? $\mu_{O2} = 32$ г/моль; $\mu_{H2} = 2$ г/моль.

A) 64. B) 32. C) 18 D) 16. E) 34.

8. (04/1-40). Сколько молекул воды в среднем вылетает за 1 с с поверхности воды, если за 6 с испаряется 18 мг воды? $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$.

A) $1 \cdot 10^{23}$. B) $1 \cdot 10^{20}$. C) $4 \cdot 10^{19}$. D) $2 \cdot 10^{18}$. E) $2 \cdot 10^{19}$.

9. Что такое число Авогадро? 1) число атомов 12 г углерода; 2) число частиц в 1 моле вещества; 3) число молекул в 32 г кислорода; 4) число молекул в 2 г водорода.

A) только 1. B) только 2. C) только 3.
D) только 4. E) 1—4.

10. (02/3-24). Определите массу $3{,}01 \cdot 10^{26}$ атомов железа (в кг). Молярная масса железа 56 г/моль, $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$.

A) 56. B) 280. C) 28. D) 168. E) 2,8.

11. (02/2-26). Какой объем занимает 1 кмоль идеального газа при давлении 0,5 МПа и температуре 52 °C (в м^3)? R =8,3 Дж/(моль·K).

A) 5,4. B) 5,2. C) 6. D) 5,8. E) 6,2.

12. (00/6-27). Как изменится средняя кинетическая энергия молекул газа, если в изобарном процессе его объем уменьшится в 2 раза?

A) уменьшится в 4 раза. B) не изменится.
C) уменьшится в 2 раза.
D) увеличится в 2 раза. E) увеличится в 4 раза.

13. (00/9-61). Как изменится средняя квадратичная скорость молекул идеального газа, если давление газа уменьшится в 2 раза, а концентрация молекул увеличится в 2 раза?

A) не изменится. B) уменьшится в 4 раза.
C) увеличится в 4 раза.
D) уменьшится в 2 раза. E) увеличится в 2 раза.

14. (00/10-36). Как изменится давление газа, если концентрация и средняя квадратичная скорость молекул газа увеличатся в 2 раза?

A) увеличится в 8 раз. B) увеличится в 2 раза.

C) увеличится в 4 раза. D) увеличится в $2\sqrt{2}$ раз.
E) не изменится.

15. (04/9-27). Определите плотность водорода при давлении 83,1 кПа и температуре 127 °C (в кг/м^3).

A) 0,05. B) 0,08. C) 0,83. D) 0,02. E) 0,01.

16. (5-33). Какова средняя квадратическая скорость молекул газа (в м/с), если плотность газа 0,09 кг/м^3, а давление $0,3 \cdot 10^5$ Па?

A) 200. *B) $3 \cdot 10^3$.* *C) $1 \cdot 10^3$.* *D) 171.* *E) $2 \cdot 10^3$.*

17. (99/8-50). Плотность идеального газа 1,4 кг/м^3, давление его 4,2 МПа. Определите среднюю квадратичную скорость молекул газа (в м/с).

A) 300. *B) 3000.* *C) 600.* *D) 1500.* *E) 1732.*

18. (00/5-50). Как изменится давление газа, если при повышении его абсолютной температуры в 2 раза, объем увеличится в 2 раза?

A) увеличится в 1,5 раза. *B) увеличится в 2 раза.*
D) увеличится в 4 раза. *C) уменьшится в 2 раза.*
E) не изменится.

19. Укажите единицу универсальной газовой постоянной.

A) $\dfrac{Дж}{кг \cdot К}$. B) $\dfrac{Дж \cdot моль}{К}$. C) $\dfrac{Дж}{К}$. D) $\dfrac{Дж \cdot К}{моль}$.

E) $\dfrac{Дж}{К \cdot моль}$.

20. (99/1–19). Как изменится средняя кинетическая энергия теплового движения молекул идеального газа при изобарном процессе, если концентрацию молекул увеличить в 5 раз?

A) увеличится в 10 раз. *B) уменьшится в 10 раз.*
C) увеличится в 5 раз. *D) уменьшится в 5 раз.*
E) не изменится.

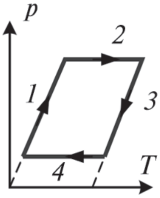
21. (04/9-26). При подъеме со дна водоема пузырек воздуха увеличился в объеме в 4 раза. Какова глубина водоема (в метрах)?

A) 40. *B) 4.* *C) 8.* *D) 20.* *E) 30.*

22. (99/2-18). В изохорном процессе ...

A) при постоянном p меняются V и T.
B) при постоянном T меняются p и V.
C) при постоянном V меняются T и p.
D) изменения V, T и p происходят без теплообмена с внешней средой.
E) НПО.

23. (00/5-28). На приведенной диаграмме укажите все изохоры.



A) 1 и 3. *B) только 1.*
C) 2 и 4.
D) только 3. *E) изохор нет.*

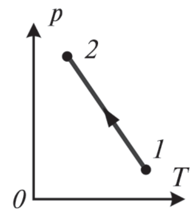
24. (00/7-31). Какова температура газа, находящегося в герметическом сосуде, если при нагревании его на 1 °С, давление газа увеличилось на 0,4% ?

A) 20 °C. *B) –30 °C.* *C) 0 °C.* *D) –27 °C.* *E) –23 °C.*

25. (00/7-33). Какова конечная температура газа (в K), если в процессе нагревания при постоянном объеме на 30 K, температура газа увеличилась в 3 раза?

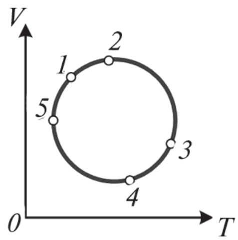
A) 90. *B) 30.* *C) 40.* *D) 45.* *E) 50.*

26. (99/1-21). Как изменится объем данного количества идеального газа при переходе из состояния 1 в состояние 2?



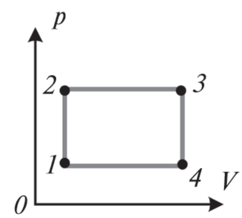
A) увеличится.
B) уменьшится.
C) возможно и увеличение и уменьшение.
D) не изменится.
E) такого процесса не бывает.

27. (01/12-19). Зависимость объема определенной массы идеального газа от температуры представлена на рисунке. Какая точка из приведенных на графике соответствует максимальному значению давления газа?



A) 5. *B) 4.* *C) 3.* *D) 2.* *E) 1.*

28. (03/1024). На рисунке приведена диаграмма некоторого процесса для идеального газа определенной массы в координатах p, V. Какая точка диаграммы соответствует состоянию с наибольшей температурой?



A) 1 и 3. *B) 1.* *C) 2.* *D) 3.* *E) 4.*

29. (03/11-12). В изотермическом процессе давление газа уменьшилось в 4 раза. Как изменилась концентрация молекул газа?

A) не изменилась. *B) уменьшилась в 4 раза.*
C) увеличилась в 4 раза. *D) уменьшилась в 16 раз.*
E) увеличилась в 16 раз.

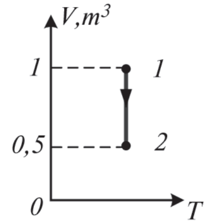
30. (01/12-18). При изотермическом процессе некоторой массы идеального газа его давление увеличилось в 2 раза. Как изменилась при этом среднеквадратическая скорость его молекул?

A) не изменилась *B) уменьшилась в 2 раза.*

C) увеличилась в 2 раза. *D) уменьшилась в* $\sqrt{2}$ *раза.*

E) увеличилась в $\sqrt{2}$ *раза.*

31. (03/12-6). Как изменится давление идеального газа при переходе из состояния 1 в состояние 2, как показано на рисунке?

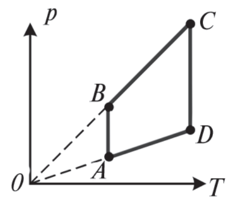


A) увеличится в 4 раза.
B) уменьшится в 4 раза.
C) не изменится.
D) уменьшится в 2 раза.
E) увеличится в 2 раза.

32. (99/8-49). Как изменится абсолютная температура идеального газа при увеличении его давления в 10,35 раза и уменьшении его объема в 3,45 раза?

A) уменьшится в 3,45 раза. *B) уменьшится в 3 раза.*
C) увеличится в 10,35 раза. *D) увеличится в 3 раза.*
E) увеличится в 3,45 раза.

33. (00/5-53). В какой точке приведенного цикла объем газа имеет наименьшее значение?



A) в точке D. *B) в точке C.*
C) в интервале B-C. *D) в точке A.*
E) в интервале A-D.

34. (00/9-63). Уравнение состояния идеального газа при некотором процессе имеет вид $pV^2 = const$. Как изменится абсолютная температура газа при уменьшении его объема в 3 раза:

A) уменьшится в 9 раз. *B) увеличится в 9 раз.*
C) уменьшится в 3 раза. *D) увеличится в 3 раза.*
E) не изменится.

35. (10-38). Уравнение состояния идеального газа при некотором процессе имеет вид $V^2/T = const$. Как изменится давление газа при увеличении его объема в 2 раза?

A) увеличится в 2 раза. *B) уменьшится в 2 раза.*
C) увеличится в 4 раза. *D) уменьшится в 4 раза.*
E) не изменится.

36. (02/1-20). Сравните парциальные давления азота и водорода с одинаковыми количествами вещества, находящимися в закрытом сосуде. $\mu_а$=28 г/моль; $\mu_в$ = 2 г/моль.

A) $P_в=14P_а$. *B)* $P_а=14P_в$. *C)* $P_а=P_в$.
D) $P_а=28P_в$. *E)* $P_в=28P_а$.

Глава X
ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

§ 68. Внутренняя энергия

Внутренней энергией термодинамической системы называется сумма кинетических энергий хаотического движения молекул и потенциальных энергий взаимодействия всех молекул системы.

Молекулы идеального газа не взаимодействуют, поэтому потенциальная энергия молекул считается равной нулю.

Внутренняя энергия U *идеального газа равна сумме кинетических энергий хаотически движущихся молекул:*

$$U = \bar{E}_k N = \frac{3}{2} kT \frac{m}{\mu} N_A = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} RT.$$

У реальных газов, жидкостей и твердых тел средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул не равна нулю. Средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул зависит от объема вещества, так как при изменении объема меняется среднее расстояние между молекулами.

Внутренняя энергия U реальных газов зависит от макроскопических параметров: температуры T и объема V.

Внутренняя энергия U идеального газа не зависит от объема V и прямо пропорциональна абсолютной температуре T.

§ 69. Работа газа

В отличие от твердых и жидких тел газы могут сильно изменять свой объем. При этом совершается механическая работа.

Если газ подвергается сжатию в цилиндре под поршнем, то внешние силы совершают над газом некоторую положительную работу A'. В то же время силы давления, действующие со стороны газа на поршень, совершают работу $A = -A'$ (рис. 10.1).

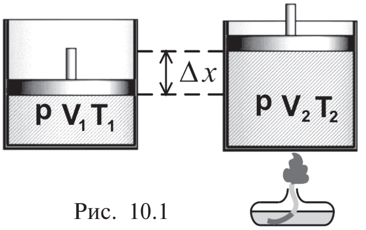


Рис. 10.1

Если объем газа изменился на величину ΔV, то газ совершает работу

$$A = F\Delta x = pS\Delta x = p\Delta V,$$

где: p – постоянное давление газа, S – площадь поршня, Δx – его перемещение.

При расширении работа, совершаемая газом, положительна, при сжатии – отрицательна.

В общем случае, когда давление $p\,(V)$ зависит от объема при переходе из некоторого начального состояния (1) в конечное состояние (2), работу можно математически выразить формулой $A = \int_{V_1}^{V_2} p(V)dV$.

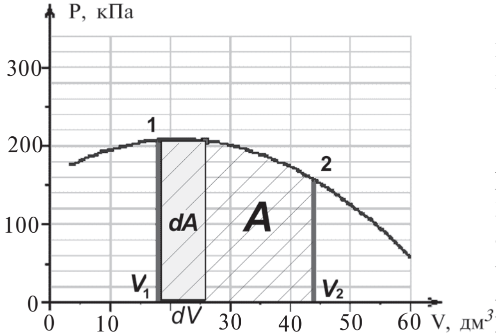


Рис. 10.2

Работа численно равна площади фигуры под графиком процесса на диаграмме (p, V). (рис.10.2).

На рис.10.3 изображены три различных процесса, переводящие газ из состояния (1) в состояние (2). Во всех трех случаях газ совершает различную работу равную площади фигуры под графиком.

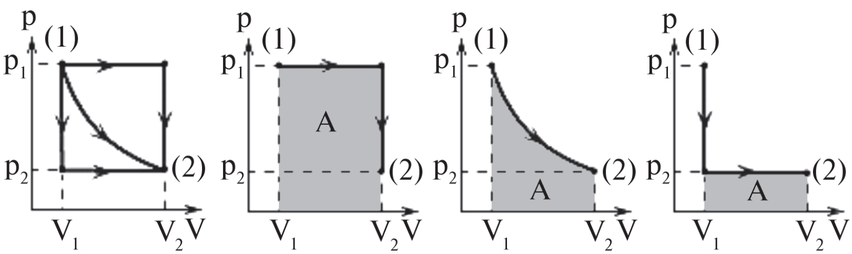


Рис. 10.3

Процессы, изображенные на рис.10.3, можно провести и в обратном направлении; тогда работа А просто изменит знак на противоположный. Процессы такого рода, которые можно проводить в обоих направлениях, называются *обратимыми*.

Физический смысл молярной газовой постоянной R.

Применяя уравнение состояния и работы газа, получим:

$$A = p\Delta V = \nu R\Delta T \Rightarrow R = \frac{A}{\nu\Delta T}\,; \qquad \left(\frac{Дж}{К \cdot моль}\right).$$

Молярная газовая постоянная численно равна работе, совершаемой одним молем идеального газа при его изобарическом нагревании на один градус.

§ 70. Количество теплоты

Процесс передачи энергии от одного тела к другому без совершения работы называют ***теплообменом*** или ***теплопередачей.***

Количеством теплоты Q называют энергию, полученную (или отданную) телом в процессе теплообмена.

Нагревание	**Охлаждение**
$Q = cm(t_2 - t_1)$; $t_2 > t_1$; $Q > 0$	$Q = cm(t_2 - t_1)$; $t_2 < t_1$; $Q < 0$
энергия поглощается	энергия выделяется

$c\left(\frac{Дж}{кг \cdot K}\right)$ – удельная теплоемкость вещества, равная количеству теплоты необходимому для нагревания тела массой 1 кг на один градус (табличная величина).

$C = cm\left(\frac{Дж}{K}\right)$ – теплоемкость тела массой m.

Плавление	**Кристаллизация**
процесс перехода вещества из твердого состояния в жидкое	процесс перехода вещества из жидкого состояния в твердое
$Q = \lambda m$	$Q = -\lambda m$
энергия поглощается	энергия выделяется
протекает при постоянной температуре, называемой температера плавления $t_{пл.}$	протекает при постоянной температуре, называемой температура кристаллизации $t_{кр.}$
Вещества отвердевают (кристаллизуются) при той же температуре, при которой плавятся; $t_{пл.} = t_{кр}$.	

λ $\left(\frac{Дж}{кг}\right)$ – удельная теплота плавления, равная количеству теплоты, необходимому для превращения 1 кг твердого вещества в жидкость при температуре плавления (табличная величина).

Парообразование	**Конденсация**
процесс превращения жидкости в пар	процесс превращения пара в жидкость
$Q = Lm$	$Q = -Lm$
энергия поглощается	энергия выделяется

$L\ (\frac{Дж}{кг})$ − удельная теплота парообразования, равная количеству теплоты, необходимому для превращения 1 кг жидкости в пар при температуре кипения (табличная величина).

Парообразование	
Испарение	**Кипение**
парообразование с поверхности жидкости	парообразование по всему объему жидкости
протекает при любой температуре	протекает при постоянной температуре, называемой температура кипения

График плавления и парообразования воды (рис. 10.4)

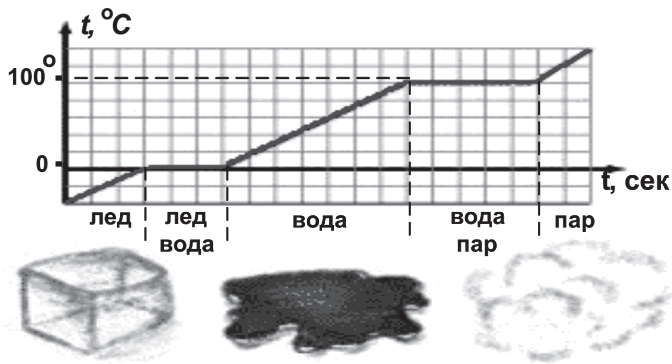


Рис. 10.4

Сгорание топлива	
Q = qm	$q(\frac{Дж}{кг})$ — удельная теплота сгорания топлива, равная количеству теплоты, выделяющемуся при сгорании 1 кг топлива
энергия выделяется	

§ 71. Первый закон термодинамики

Первый закон термодинамики − это закон сохранения энергии, при тепловых явлениях. Внутреннюю энергию можно изменить двумя способами: совершением работы или теплообменом с окружающими телами. В общем случае при переходе системы из одного состояния в другое возможны оба процесса одновременно

$$\Delta U = A + Q.$$

Изменение внутренней энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количеству теплоты, переданному системе. В случае, когда система совершает работу A' над внешними телами

$$A = -A' \quad Q = \Delta U + A'.$$

Количество теплоты, переданное системе, идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами.

Применение первого закона термодинамики к изопроцессам:

1) изобарический процесс.

Работа газа при изобарическом расширении или сжатии выражается соотношением: $A = p\,(V_2 - V_1) = p\,\Delta V$.

Первый закон термодинамики для изобарического процесса записывается в виде: $Q = U_2 - U_1 + p\,(V_2 - V_1) = \Delta U + p\,\Delta V$.

Здесь U_1 и U_2 внутренняя энергия газа в начальном T_1 и конечном T_2 состояниях, V_1 и V_2 – начальный и конечный объемы.

При изобарическом расширении $Q > 0$ – тепло поглощается и газ совершает положительную работу. При изобарическом сжатии $Q < 0$ – тепло отдается внешним телам. В этом случае $A < 0$;

2) изохорический процесс.

В изохорическом процессе газ не совершает работы: $A = 0$.

Первый закон термодинамики для изохорического процесса записывается в виде: $Q = U_2 - U_1 = \Delta U$.

Здесь U_1 и U_2 – внутренняя энергия газа в начальном T_1 и конечном T_2 состояниях.

При изохорическом нагревании тепло поглощается газом ($Q > 0$), и его внутренняя энергия увеличивается. При охлаждении тепло отдается внешним телам ($Q < 0$); внутренняя энергия газа уменьшается;

3) изотермический процесс.

Первый закон термодинамики для изотермического процесса записывается в виде: $Q = A$.

Так как внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры $\Delta U = 0$, тепло Q, полученное газом от теплового резервуара в процессе изотермического расширения, превращается в работу А. При изотермическом сжатии работа внешних сил, произведенная над газом, превращается в тепло, которое поглощается тепловым резервуаром.

§ 72. Адиабатический процесс

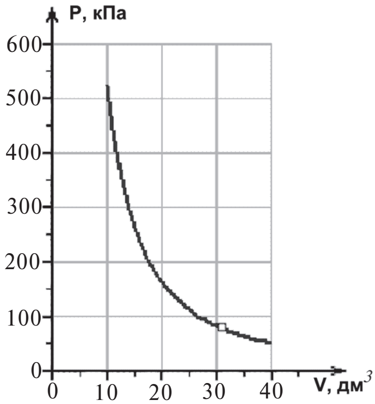


Рис. 10.5

Адиабатический процесс – *это процесс расширения или сжатия газа без теплообмена, Q = 0.*

Происходит в теплоизолированных системах или в процессах, протекающих очень быстро, так что теплопередача практически не происходит (рис. 10.5).

Первый закон термодинамики для адиабатического процесса принимает вид: $A = -\Delta U$,

В адиабатическом процессе газ совершает работу за счет изменения внутренней энергии.

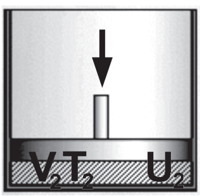
<table>
<tr><th>Адиабатное сжатие</th><th>Адиабатное расширение</th></tr>
<tr><td colspan="2">первоначальное состояние


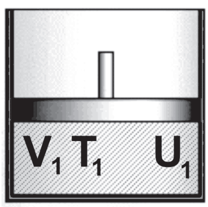
Рис. 10.6


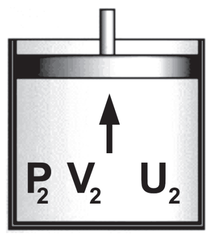
Рис. 10.7


Рис. 10.8</td></tr>
<tr><td>Работа внешних сил положительна
A > 0
Работа газа отрицательна</td><td>Работа внешних сил отрицательна
A < 0
Работа газа положительна</td></tr>
<tr><td>Внутреняя энергия увеличивается
$\Delta U = U_2 - U_1 > 0$</td><td>Внутренняя энергия уменьшается
$\Delta U = U_2 - U_1 < 0$</td></tr>
<tr><td>Температура возрастает
$\Delta T = T_2 - T_1 > 0$</td><td>Температура убывает
$\Delta T = T_2 - T_1 < 0$</td></tr>
<tr><td>Двигатель Дизеля</td><td>Расширение воздуха в верхних слоях атмосферы, образование облаков</td></tr>
</table>

§ 73. Термодинамические циклы

Круговым процессом или ***циклом*** *называется процесс, при котором система, пройдя ряд состояний, возвращается в исходное* (рис.10.9, 10.10).

Прямой цикл

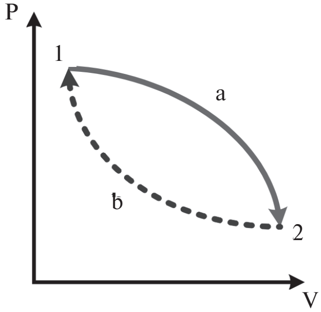


Рис. 10.9

По часовой стрелке.

A>0.

Тепловой двигатель.

Обратный цикл

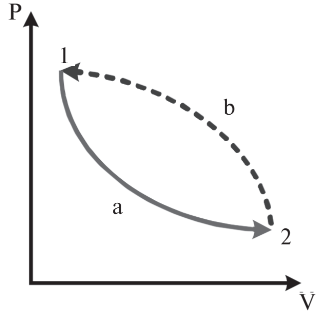


Рис. 10.10

Против часовой стрелки.

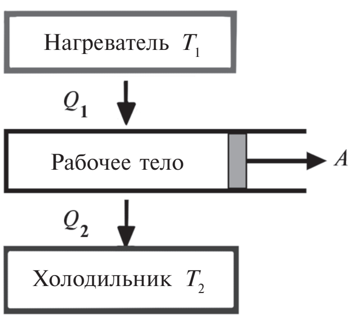
A<0.

Холодильная установка.

На диаграмме *p(V)* цикл изображается замкнутой кривой. Цикл можно разбить на процессы расширения (на рис. 1−2) и сжатия газа (2−1). Работа равна площади, охватываемой кривой.

Тепловыми двигателями называются устройства, в которых происходит превращение теплоты в работу. Рабочее вещество в любом тепловом двигателе последовательно приводится в тепловой контакт с горячими телами (нагреватели), получая от них некоторое количество теплоты Q_1, и с холодными телами (холодильники), отдавая им количество теплоты Q_2 ($Q_2 < Q_1$,) и периодически возвращается в первоначальное состояние ($\Delta U=0$), то есть процессы являются *циклическими* или *круговыми* (рис. 10.11, 10.12).

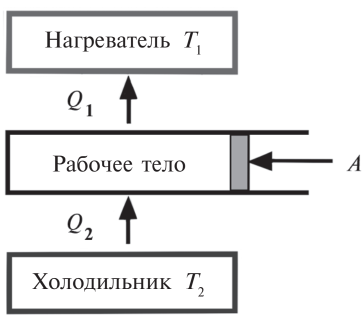
Тепловая машина



$Q_1 = Q_2 + A$

Рис. 10.11

Холодильная установка



$Q_2 + A = Q_1$

Рис. 10.12

Термодинамика утверждает, что невозможно всю теплоту Q_1, полученную в круговом процессе от нагревателей, превратить в работу (2-ой закон термодинамики). Согласно закону сохранения энергии

(1-ый закон термодинамики), так как $\Delta U = 0$, работа, производимая двигателем, равна: $A = Q_1 – Q_2$.

Коэффициентом полезного действия теплового двигателя называют отношение: $\eta = \dfrac{A}{Q_1} = 1 - \dfrac{Q_2}{Q_1} < 1$.

§ 74. Цикл Карно

Цикл Карно *представляет собой идеализированный круговой процесс, в котором рабочее вещество (идеальный газ) периодически приводится в тепловой контакт только с одним нагревателем T_1 и одним холодильником T_2.*

Цикл Карно состоит из двух изотерм ($1 \to 2$ и $3 \to 4$) и двух адиабат ($2 \to 3$ и $4 \to 1$). Французский инженер Карно доказал, что К.П.Д. всех машин, совершающих обратимые процессы, работающих при одинаковых температурах нагревателей T_1 и холодильников T_2, равны друг другу, не зависят от конструкции машины и определяются формулой: $\eta = \dfrac{T_1 - T_2}{T_1}$.

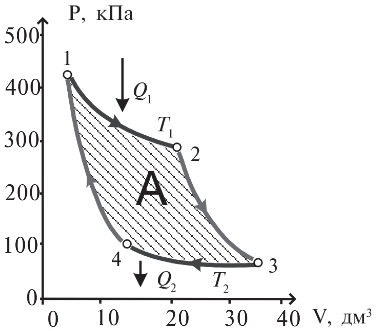


Рис. 10.13

Любой реальный тепловой двигатель, работающий с нагревателем температуры T_1 и холодильником температуры T_2., не может иметь к.п.д., превышающий

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Цикл Карно идеальной *тепловой машины* на *p(V)*-диаграмме происходит в направлении, совпадающем с направлением обхода по часовой стрелке (рис. 10.13). Однако он может быть проведен и в противоположном направлении (*холодильный цикл*). В этом случае система отбирает тепло Q_2 от холодного тела и передает тепло $Q_1 > Q_2$ горячему телу. Для того, чтобы такой процесс был возможен, над системой должна совершаться положительная работа А. Такой цикл реализуется в холодильных машинах (рис. 10.12).

Вопросы и задания

1. *Что называется внутренней энергией термодинамической системы?*
2. *От каких макроскопических параметров зависит внутренняя энергия идеального газа и реальных газов?*

3. Как определяется работа газа графически на диаграмме p(V)?
4. Что называется количеством теплоты?
5. Напишите формулы количества теплоты необходимого для: а) нагревания, б) плавления, в) парообразования.
6. Дайте определения удельной теплоемкости вещества, удельной теплоты плавления и удельной теплоты парообразования. В каких единицах они измеряются?
7. Как найти количество теплоты, выделяющееся при сгорании топлива?
8. Каков физический смысл удельной теплоты сгорания топлива?
9. Перечислите способы изменения внутренней энергии.
10. Сформулируйте первый закон термодинамики. Какой фундаментальный закон физики он отражает?
11. Какой процесс называется адиабатным. Как изменяется температура газа при быстром расширении (сжатии)?
12. Как определяется работа газа в различных изопроцессах?
13. Какой вид принимает первый закон термодинамики в различных изопроцессах?
14. Что называется круговым процессом (циклом). Чем отличаются прямой и обратный циклы?
15. Изобразите круговой процесс (цикл) графически в осях p(V). Чему равна работа газа в круговом процессе?
16. Какие устройства называются тепловыми двигателями?
17. Каковы принципы работы теплового двигателя и холодильной установки. Объясните их на основе первого закона термодинамики.
18. Что называется коэффициентом полезного действия теплового двигателя? Чему равен КПД идеальной тепловой машины?

Тестовые задания

1. (01/12-28). Как изменяется температура кристаллического тела с момента начала плавления до его окончания?

A) в начале плавления повышается, затем понижается.
B) в начале плавления понижается, затем повышается.
C) постепенно повышается. D) не изменяется.
E) постепенно понижается.

2. (01/12-12). Вода превращается в лед при постоянной температуре 0 °С. Поглощается или выделяется ли при этом энергия?

A) выделяется. B) поглощается.
C) не поглощается и не выделяется.
D) в зависимости от внешних условий может как поглощаться, так и выделяться.
E) при образовании первых кристалликов льда выделяется, а затем поглощается.

3. (01/12-13). Какое количество теплоты (Дж) необходимо для получения 10 кг пара воды при ее температуре кипения? Удельная теплота парообразования воды равна $2{,}2 \cdot 10^5$ Дж/кг.

A) $2{,}2 \cdot 10^{-5}$. *B) $10 \cdot 10^5$.* *C) 0.*
D) $2{,}2 \cdot 10^5$. *E) $2{,}2 \cdot 10^6$.*

4. (03/11-10). Как изменится внутренняя энергия газа при изотермическом расширении?

A) увеличится. *B) не изменится.* *C) уменьшится.*
D) внутренняя энергия может быть произвольной.
E) при высоком давлении увеличится, а при низком – уменьшится.

5. (03/4-19). Определите внутреннюю энергию (Дж) одного моля идеального одноатомного газа, находящегося при температуре –73 °С.

A) 1246. *B) 1662.* *C) 2077.* *D) 2493.* *E) 831.*

6. (03/9-46). Как изменится внутренняя энергия воздуха в комнате, если растопить печь?

A) уменьшится. *B) увеличится.* *C) не изменится.*
D) зависит от внешней температуры. *E) НПО.*

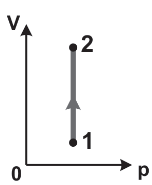
7. (03/5-22). Как изменится внутренняя энергия идеального газа при повышении его давления в 2 раза и уменьшении объема в 2 раза?

A) не изменится. *B) увеличится в 2 раза.*
C) уменьшится в 4 раза. *D) уменьшится в 2 раза.*
E) увеличится в 4 раза.

8.(03/10-34). Каково давление (Па) одноатомного идеального газа, если его объем равен 2 м^3, а внутренняя энергия – 1500 Дж?

A) 2000. *B) 1500.* *C) 1000.* *D) 300.* *E) 500.*

9. (03/11-13). В процессе, изображенном на диаграмме, внутренняя энергия идеального газа ...



A) сначала увеличится, а потом уменьшится.
B) увеличится. *C) не изменится.*
D) уменьшится. *E) НПО.*

10. (03/4-14). Во сколько раз уменьшилась внутренняя энергия идеального газа, находящегося в баллоне, если в результате выпускания половины газа из баллона его температура понизилась с 57 °С до 2 °С?

A) 5,6. *B) 1,2.* *C) 1,4.* *D) 2,4.* *E) 2,8.*

11. (03/10-32). Какова работа идеального газа при нагревании, если при этом давление *p* не изменяется, а начальный объем *V* увеличится на 30%?

A). 30 pV. *B) 3 pV.* *C) 0,3 pV.* *D) 0,7 pV.* *E) 1,3 pV.*

12. (03/10-33). Определите работу 1 моля идеального газа (Дж), совершаемую при нагревании его изобарно на 2 К.

A) 16,62. B) 8,31. C) 2. D) 1. E) 0.

13. (01/12-37). Объем газа, находящегося под давлением 10^5 Па, изобарно увеличился от 300 см^3 до 500 см^3. Определите работу, совершенную газом при расширении (Дж).

A) 200. B) 100. C) 50. D) 30. E) 20.

14.(01/12-41). При постоянном давлении 10^6 Па внешние силы совершили над газом работу 100 кДж. Как изменился объем газа в этом процессе?

A) уменьшился в 100 раз. B) уменьшился в 10 раз.
C) не изменился. D) уменьшился на 0,1 м^3.
E) увеличился на 0,1 м^3.

15. (03/10-28). Водород и гелий с одинаковыми массами нагрели при постоянном давлении на 10 К. Какой из газов при этом совершил большую работу?

A) работы одинаковы. B) гелий.
C) водород. D) недостаточно данных.
E) работа не совершается.

16. (01/12-39). Кислород и водород одинаковых масс нагревают при постоянном давлении на одинаковую разность температур. Какой из газов совершает большую работу?

A) водород. B) работы одинаковы.
C) кислород. D) работа не совершается.
E) для ответа данных недостаточно.

17. (03/11-14). Водород и гелий с одинаковыми массами и давлениями нагрели на 60 К. При нагревании водорода совершена работа A_1, а при нагревании гелия – A_2. Как соотносятся эти работы? ($p = const$).

A) $A_2 = 2A_1$. B) $A_1 = 2A_2$. C) $A_1 = A_2$.
D) $A_2 = 4A_1$. E) $A_1 = 4A_2$.

18. (03/11-7). Какое количество теплоты надо сообщить телу с удельной теплоемкостью 3800 Дж/(кг · К) и массой 0,4 кг, чтобы нагреть его с 4 до 24 °C?

A) 3040 Дж. B) 30,4 Дж. C) 18240 Дж.
D) 30,4 кДж. E) 15,2 кДж.

19. (03/4-22). Через какое время (мин) закипит 1 л воды, находящейся при температуре 10 °C, при нагревании с помощью кипятильника мощностью 600 Вт и КПД 84%? Удельная теплоемкость воды равна 4,2 кДж/(кг · К).

A) 6. B) 8. C) 9,5. D) 10,5. E) 12,5.

20. (03/6-41). Какова мощность (кВт) электрочайника с КПД 80 %, если он 2 л воды с температурой 20 °С доводит до кипения за 10 мин?

Удельная теплоемкость воды 4200 Дж/(кг · К).

A) 0,84. B) 0,7. C) 1,4.

D) 2,8. E) 4,2.

21. (03/7-41). На сколько (К) поднимется температура 2,9 $м^3$ воды в котле с КПД 50 %, если сжечь 42 кг каменного угля? Удельная теплота сгорания угля $q = 29 \cdot 10^6$ Дж/кг, удельная теплоемкость воды с = 4200 Дж/(кг · К).

A) 21. B) 29. C) 35. D) 40. E) 50.

22. (03/8-73). На сколько (К) поднимается температура воды за счет 60% работы, совершаемой ею при падении с высоты 420 м?

с = 4200 Дж/(кг · К)/

A) 0,42. B) 0,6. C) 2,1. D) 4,2. E) 2,52.

23. (03/5-23). Молоток массой 1,2 кг в течение 1,5 минут работы нагрелся на 20 К. Определите полную работу (кДж), считая, что 40% затраченной энергии превратилось в тепло.

Удельная теплоемкость железа равна 460 Дж/(кг · К).

A) 27,6. B) 13,8. C) 11,06. D) 8,6. E) 6,3.

24. (01/12-40). По какому выражению можно рассчитать удельную теплоемкость вещества?

A) $Q/(M \cdot \Delta T$. B) $Q/\Delta T$. C) $Q/(M\Delta T)$.

D) $Q/(V\Delta T)$. *E) НПО.*

25. (03/8-74). Поверхность воды водоема с площадью 1000 $м^2$ при 0 °С покрылась льдом толщиной 2 мм. Какое количество теплоты (МДж) выделилось при этом? Плотность льда – 900 кг/$м^3$, его удельная теплота плавления 330 кДж/кг.

A) 0,594. B) 2,97. C) 29,7. D) 594. E) 59,4.

26. (03/8-75). Какое количество теплоты (кДж) необходимо для превращения 1 кг льда с температурой –10 °С в воду с температурой 90 °С? Удельная теплоемкость льда 2,1 кДж/(кг · К), его удельная теплота плавления 330 кДж/кг, удельная теплоемкость воды 4,2 кДж/(кг · К).

A) 729. B) 693. C) 660. D) 393. E) 96.

27. (03/8-25). Сколько (г) спирта следует сжечь, чтобы получить 5,4 МДж теплоты? Удельная теплота сгорания спирта $2,7 \cdot 10^7$ Дж/кг.

A) 2. B) 20. C) 27. D) 54. E) 200.

28. (03/7-40). Двигатель мотороллера при скорости 60 км/ч достигает мощности 3,5 кВт. Какой путь (км) пройдет мотороллер израсходовав 3,6 л бензина, если КПД двигателя равен 25%? Удельная теплота сгорания бензина равна 46 МДж/кг, плотность – 0,7 г/см^3.

A) 160. *B) 69.* *C) 96.* *D) 138.* *E) 158.*

29. (01/12-35). Первый закон термодинамики представляет собой проявление в тепловых процессах ...

A) закона сохранения импульса.
B) закона сохранения энергии.
C) уравнения Менделеева-Клапейрона.
D) закона Бойля-Мариотта.
E) второго закона Ньютона.

30. (01/12-38). Какая часть количества теплоты Q, передаваемая при изобарном нагревании одноатомному идеальному газу, идет на изменение его внутренней энергии?

A) 0,2Q. *B) 0,3Q.*
C) 0,6Q. *D) 0,5Q.* *E) 0,4Q.*

31. (01/12-29). Газу передано 200 Дж теплоты, и внешние силы совершили над ним работу 300 Дж. Чему равно изменение внутренней энергии газа (Дж)?

A) 0. *B) 100.* *C) 200.*
D) 300. *E) 500.*

32. (03/6-55). При сообщении одноатомному газу, находящемуся в баллоне, 499 Дж теплоты, его температура поднялась на 40 K. Определите количество газа (моль). R = 8,3 Дж /моль·K.

A) 1. *B) 2.* *C) 0,5.* *D) 1,5.* *E) 3.*

33. (03/11-11). Тепловой двигатель получает от нагревателя 0,8 МДж теплоты, а отдает холодильнику 0,3 МДж. Каков КПД этого двигателя (%)?

A) 30. *B) 48.* *C) 50.* *D) 62,5.* *E) 83,5.*

34. (03/6-22). Температура нагревателя идеальной тепловой машины равна 237 °C, а температура холодильника этой машины равна 67 °C. Какую работу совершает машина за один цикл (Дж), если за один цикл она получает от нагревателя 1800 Дж теплоты?

A) 600. *B) 900.* *C) 1290.* *D) 450.* *E) 180.*

35. (01/12-32). По какому выражению можно рассчитать работу тепловой машины с КПД η, если машине передано от нагревателя количество теплоты Q?

A) ηQ. *B)* $(1+\eta)Q$. *C)* $(1-\eta)Q$. *D)* Q/η. *E)* Q.

Глава XI
РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ. ЖИДКОСТИ. ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

§ 75. Реальные газы. Фазовые переходы

Любое вещество может находиться в различных состояниях (фазах) – твердом, жидком и газообразном. Переход из одного состояния в другое называют фазовым переходом.

Рассмотрим фазовый переход пар – жидкость (рис. 11.1). Для этого в цилиндре под поршнем будем медленно (изотермически) сжимать реальный газ (пар).

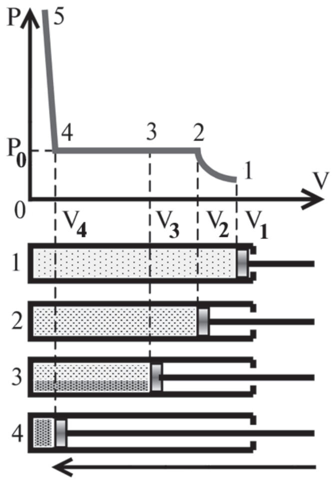


Рис. 11.1

При достаточно большом объеме газ разряжен и ведет себя как идеальный газ (участок 1–2). При достижении некоторого объема V_2 в сосуде появляются капельки жидкости. Участок 2–4 соответствует процессу превращения пара в жидкость, при уменьшении объема давление не меняется. Пар в присутствии своей жидкости является насыщенным. Когда весь пар превратится в жидкость V_4, дальнейшее сжатие практически невозможно. Незначительное уменьшение объема жидкости ведет к резкому возрастанию давления (4–5).

Полученная кривая 1, 2, 4 является изотермой реального газа.

Изотермы реального газа отличаются от изотерм идеального газа и содержат горизонтальные участки (рис. 11.1), соответствующие двухфазной системе.

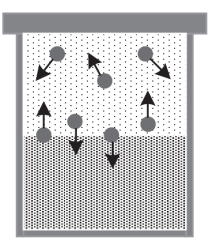


Рис. 11.2

Насыщенный пар. Часть объема замкнутого сосуда (рис. 11.2) занимает жидкость. Остальной объем занят паром этой жидкости. При любой температуре существует некоторое количество достаточно энергичных молекул внутри жидкости, которые способны вылететь из жидкости. В то же время в паре всегда существуют молекулы, которые влетают обратно в жидкость. В сосуде происходят два процесса – испарение и конденсация. Такую систему называют *двухфазной*.

Когда число молекул, покидающих жидкость, за единицу времени становится равным числу молекул, возвращающихся обратно, то наступает динамическое равновесие между жидкой и газообразной фазами (рис.11.2).

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют ***насыщенным.***

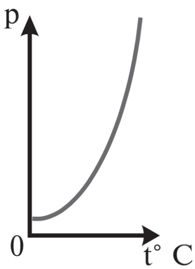


Рис. 11.3

Давление насыщенного пара существенно зависит от температуры: чем она выше, тем больше молекул имеют достаточную энергию, чтобы покинуть жидкость, следовательно, возрастает плотность насыщенного пара (рис.11.3).

Давление насыщенного пара определяется той же формулой, что и состояние идеального газа:

$$p = nkT.$$

Для идеального газа эта зависимость имеет линейный характер, так как концентрация n молекул не зависит от температуры. Зависимость давления насыщенного пара от температуры *нелинейная*, и более крутая, так как с ростом температуры T растет и концентрация n.

Если при неизменной температуре увеличить объем сосуда, часть жидкости дополнительно испарится, если уменьшить объем сосуда, часть пара сконденсируется в жидкость, но в любом случае давление насыщенного пара не изменится.

Давление насыщенного пара p(T) зависит только от его температуры и рода пара и не зависит от его объема.

Критическая температура. При повышении температуры давление насыщенного пара и его плотность возрастают, а плотность жидкости уменьшается из-за теплового расширения (рис.11.4). При некоторой температуре плотности пара и жидкости становятся одинаковыми (рис.11.5), то есть исчезает граница между жидкостью и паром.

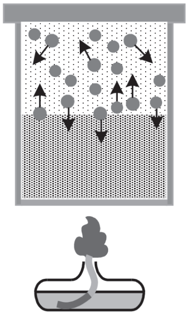


Рис. 11.4

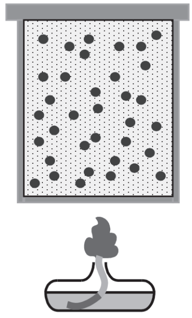


Рис. 11.5

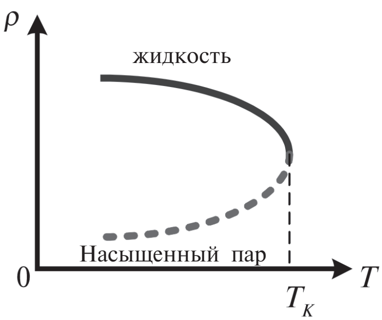


Рис. 11.6

Эту температуру называют *критической температурой Тк*. (рис.11.6). При $T > T_к$ исчезают физические различия между жидкостью и ее насыщенным паром. Критическая температура для воды равна 647,3 К, для азота − 123 К.

Особое значение критической температуры состоит в том, что *при температурах выше критической газ нельзя обратить в жидкость ни при каких давлениях.*

Уравнение Ван-дер-Ваальса.

Для реальных газов необходимо учитывать размеры молекул и их взаимодействие друг с другом, поэтому модель идеального газа и уравнение состояния Менделеева-Клапейрона в виде:

$pV_м = RT$ (для моля газа), для реальных газов непригодны.

Ван-дер-Ваальс (1837 — 1923) ввел две поправки в уравнение Менделеева − Клапейрона, учитывающие собственный объем молекул и силы межмолекулярного взаимодействия.

Фактический свободный объем, в котором могут двигаться молекулы реального газа, будет не $V_м$, а $(V_м - b)$, где b − объем, занимаемый самими молекулами.

Действие сил притяжения между молекулами реального газа приводит к появлению дополнительного давления на газ, называемого внутренним давлением. Внутреннее давление обратно пропорционально квадрату объема газа, т. е. $p' = a / V_м^2$, где a − постоянная Ван-дер-Ваальса, характеризующая силы межмолекулярного притяжения, $V_м$ — молярный объем.

Вводя эти поправки, получим уравнение Ван-дер-Ваальса для моля газа или уравнение состояния реальных газов:

$$\left(p + \frac{a}{V_м^2}\right) \cdot (V_м - b) = RT.$$

Для произвольной массы m газа, соответствующей ν молям газа ($\nu = m/M$), с учетом того, что $V = \nu V_м$, уравнение Ван-дер-Ваальса примет вид:

$$\left(p + \frac{\nu^2 a}{V^2}\right) \cdot \left(\frac{V}{\nu} - b\right) = RT \quad \text{или} \quad \left(p + \frac{\nu^2 a}{V^2}\right) \cdot (V - \nu b) = \nu RT,$$

где поправки a и b — постоянные для каждого газа величины, определяемые опытным путем.

Изотермы реального газа. На рис. 11.7 приведены изотермы реального газа при различных температурах $T_3 > T_2 > T_1$; $T_3 = T_{кр}$.

Если через крайние точки горизонтальных участков изотерм провести линию, то получится колоколообразная кривая, ограничивающая область двухфазных состояний. Эта кривая и критическая изотерма ($T_3 = T_{кр}$) делят диаграмму $p(V)$ на четыре области: 1 – газ; 2 – пар; 3 – двухфазное состояние, жидкость и пар; 4 – область жидкого состояния (рис.11.8).

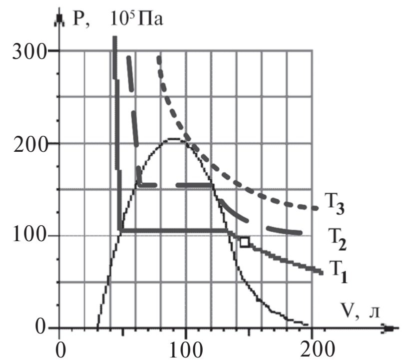


Рис. 11.7

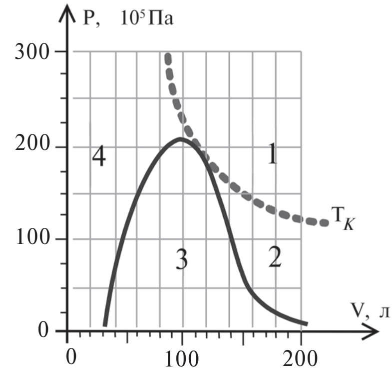


Рис. 11.8

Уточним понятия «пар» и «газ». Пар это газообразное состояние вещества при температуре ниже критической. Пар может одновременно существовать со своей жидкостью и простым сжатием пар можно превратить в жидкость. Газ это стойкое газообразное состояние вещества при температуре выше критической. Газ при температуре выше критической не может быть превращен в жидкость ни при каком давлении, в отличие от пара.

Фазовая диаграмма. Из газообразного и жидкого состояний любое вещество может перейти в твердое состояние. При заданной температуре T термодинамическое равновесие между двумя фазами одного и того же вещества возможно лишь при определенном значении давления в системе. Зависимость равновесного давления от температуры называется кривой фазового равновесия. Примером может служить кривая равновесия $p_0(T)$ насыщенного пара и жидкости. Если кривые равновесия между различными фазами данного вещества построить на плоскости (p, T), то они разбивают эту плоскость на отдельные области, в которых вещество существует в однородном агрегатном состоянии – твердом, жидком или газообразном. Эти кривые равновесия называются ***фазовой диаграммой*** (рис.11.9).

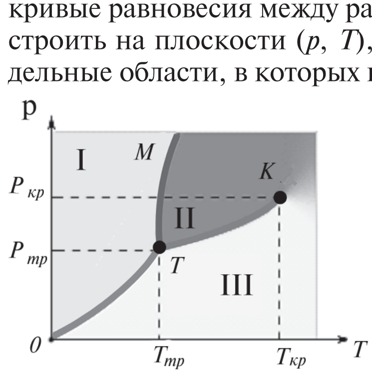


Рис. 11.9

К – критическая точка,
Т – тройная точка.
Область I – твердое тело,
область II– жидкость,
область III – газообразное вещество.

Кривая ОТ, соответствующая равновесию между твердой и газообразной фазами, называется *кривой сублимации*.

Кривая ТК равновесия между жидкостью и паром называется кривой испарения, она обрывается в критической точке К.

Кривая ТМ равновесия между твердым телом и жидкостью называется *кривой плавления*.

Кривые равновесия сходятся в точке Т, в которой могут сосуществовать в равновесии все три фазы. Эта точка называется *тройной точкой*.

§ 76. Влажность воздуха

В воздухе всегда содержится некоторое количество водяного пара. От его количества зависят многие процессы и явления.

Парциальное давление p водяного пара – это давление, которое производил бы водяной пар, если бы все остальные газы отсутствовали. Измеряется в *Па* или *мм. рт. ст.*

Абсолютная влажность воздуха это парциальное давление *p* водяного пара или масса (в граммах) водяного пара в единице объема (1 м^3) воздуха. $\rho = \frac{m}{V}$.

Относительная влажность φ – физическая величина, равная отношению парциального давления *p* водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению p_0 насыщенного пара при той же температуре, выраженное в процентах:

$$\varphi = \frac{p}{p_0}100\% \quad (1) \qquad \text{или} \qquad \varphi = \frac{\rho}{\rho_0}100\%,$$

где ρ – плотность водяного пара (абсолютная влажность), ρ_0 – плотность насыщенного водяного пара при данной температуре.

График зависимости давления насыщенного пара от температуры (рис. 11.10).

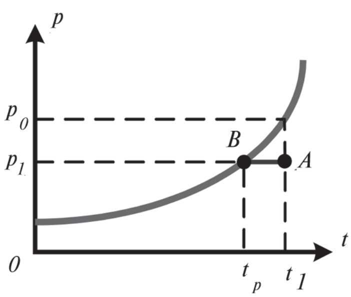


Рис. 11.10

Точка росы – температура t_p, при которой водяной пар становится насыщенным (конденсация пара).

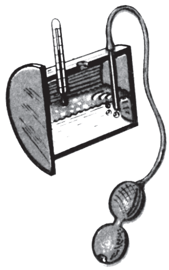


Рис. 11.11

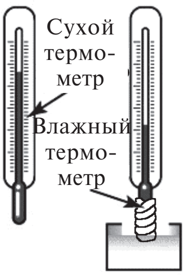


Рис. 11.12

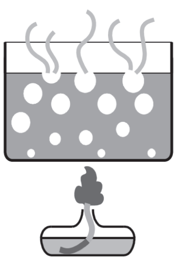


Рис. 11.13

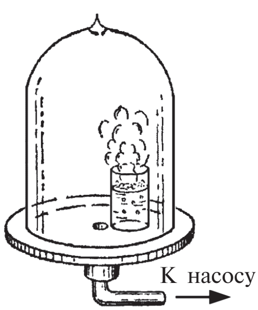


Рис. 11.14

Влажность измеряют с помощью приборов: *гигрометров* (рис. 11.11) и *психрометров* (рис. 11.12).

Конденсационный гигрометр позволяет определить точку росы, то есть температуру, при которой появляются капельки влаги (конденсат) на его полированной поверхности. Охлаждение поверхности достигается быстрым испарением эфира залитого в прибор. Зная точку росы t_p и температуру воздуха в комнате t_1, по таблице зависимости давления насыщенного пара от температуры определяют соответствующие давления p и p_0. По формуле (1) вычисляют относительную влажность φ.

Психрометр позволяет определить относительную влажность воздуха. Психрометр состоит из двух термометров, (сухого и влажного), а также психрометрической таблицы. Резервуар влажного термометра обмотан тканью, конец которой опущен в воду.

Кипение.

Кипение это процесс, при котором по всему объему жидкости происходит испарение и образуются быстро растущие пузырьки пара, всплывающие на поверхность (рис. 11.13).

Кипение начинается при температуре, при которой давление насыщенного пара в пузырьках равно давлению в жидкости.

$$p = p_{атм} + \rho gh \approx p_{атм}.$$

При нормальном атмосферном давлении вода кипит при температуре 373 К.

При откачивании воздуха из под колокола вода, имеющая температуру значительно ниже 100 °С, закипает (рис.11.14).

При подъеме в горы атмосферное давление уменьшается, поэтому понижается температура кипения воды (приблизительно на 10 °С на каждые 300 метров высоты). На высоте 7000 м давление составляет примерно $0{,}4 \cdot 10^5$ *Па*, и температура кипения воды понижается до 70 °С.

При каждом значении температуры в закрытом сосуде устанавливается равновесие между жидкостью и ее насыщенным паром. По кривой равновесия $p(t)$ (рис. 11.10) можно определить температуры кипения жидкости при различных давлениях.

Для удобства численные значения зависимости $p(t)$ сводятся в таблицу.

Давление и плотность насыщенного водяного пара при различных температурах

t, °C	p, мм рт. ст.	ρ, кг/м^3	t, °C	p, мм рт. ст.	ρ, кг/м^3	t, °C	p, мм рт. ст.	ρ, кг/м^3
− 20	0,77	0,88	18	15,48	15,4	60	149,4	130
− 10	1,95	2,14	20	17,54	17,3	80	355,1	293
0	4,58	4,84	40	55,32	51,2	100	760,0	598

Например, по таблице видно, что при 60 °C вода закипит, если давление понизить до 149,4 мм рт.ст. Обратная задача, при давлении 55,32 мм рт.ст . температура кипения равна 40 °C.

По такой же таблице определяется относительная влажность воздуха. Предположим показания сухого термометра 20 °C (p_0=17,54 мм рт.ст.), показания влажного термометра 18 °C (p =15,48 мм рт.ст.)

По формуле $\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\%$ определим относительную влажность:

$$\varphi = \frac{15,48\,\textit{мм рт. ст}}{17,54\,\textit{мм рт. ст}} \cdot 100\% = 88,26\%.$$

§ 77. Свойства жидкостей

Молекулы вещества в жидком состоянии расположены почти вплотную друг к другу. Каждая молекула жидкости «зажата» со всех сторон соседними молекулами и совершает тепловые колебания около положения равновесия. Однако, время от времени, любая молекула может переместиться в соседнее вакантное место.

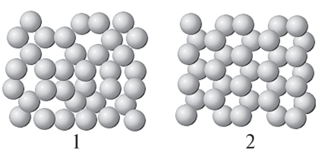


Рис. 11.15

Такие перескоки в жидкостях (рис. 11.15-1) происходят довольно часто; поэтому молекулы не привязаны к определенным центрам, как в кристаллах (рис.11.15-2), и могут перемещаться по всему объему жидкости, что является одной из причин текучести жидкостей.

Среднее расстояние между молекулами пара (рис.11.16-1) в десятки раз превышает среднее расстояние между молекулами воды (рис.11.16-2).

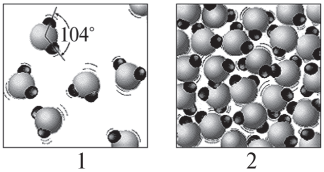


Рис. 11.16

Вследствие плотной упаковки молекул сжимаемость жидкостей, т.е. изменение объема при изменении давления, очень мала.

Жидкости, как и твердые тела, изменяют свой объем при изменении температуры. При температуре ниже 4 °С вода расширяется при понижении температуры. Максимум плотности $\rho_в = 10^3$ кг/м^3 вода имеет при температуре 4 °С. При замерзании вода расширяется, поэтому лед плавает на поверхности замерзающего водоема. В более плотных слоях воды у дна водоема температура оказывается порядка 4 °С. Благодаря этому может существовать жизнь в воде замерзающих водоемов.

§ 78. Поверхностное натяжение жидкости

Между жидкостью и газом (или паром) образуется граница раздела, которая находится в особых условиях по сравнению с остальной массой жидкости.

Рассмотрим две молекулы: молекула А находится внутри жидкости, молекула В на ее поверхности (рис.11.17). Молекула А окружена со всех сторон такими же молекулами, силы притяжения ее к соседям уравновешиваются

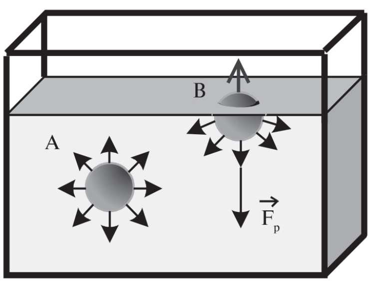


Рис. 11.17

$$F_p = 0.$$

Молекула *B* окружена сверху молекулами пара, снизу – молекулами жидкости.

Силы притяжения к молекулам пара значительно меньше чем к молекулам жидкости. Равнодействующая F_p всех сил притяжения направлена внутрь жидкости. Такая сила действует на все молекулы, оказавшиеся на поверхности. Молекулы под действием этой силы стремятся внутрь жидкости и на поверхности остается минимальное количество молекул. Поверхность стремится к сокращению. Из геометрии известно, что минимальную поверхность при одинаковом объеме имеет шар, поэтому жидкость стремится принять форму шара (капля дождя, капля росы ...).

Сила поверхностного натяжения *– это сила, обусловленная взаимодействием молекул жидкости, вызывающая сокращение площади ее свободной поверхности и направленная по касательной к этой поверхности.* $F = \sigma l$, *отсюда:* $\sigma = \frac{F}{l}\left(\frac{H}{м}\right)$,

где: $l\,(м)$ – длина границы поверхности, σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Коэффициент поверхностного натяжения – это сила, поверхностного натяжения, приходящаяся на единицу длины границы поверхности.

Коэффициент поверхностного натяжения – табличная величина, зависит от рода раствора жидкости и от температуры, с ростом температуры коэффициент поверхностного натяжения уменьшается.

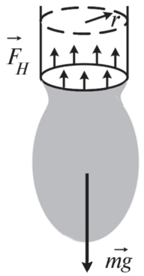


Рис. 11.18

Определение коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва капель.

Из пипетки капаем капли. Капля постепенно растет и отрывается в тот момент, когда ее сила тяжести станет равной результирующей сил поверхностного натяжения, действующих вдоль поверхности капли по длине окружности отверстия пипетки. Массу капли определяют, взвесив известное число капель (рис.11.18).

$$F_н = mg \Rightarrow \sigma l = mg \Rightarrow \sigma 2\pi r = mg;$$

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi r}.$$

Работа сил поверхностного натяжения.

Если в мыльный раствор опустить проволочную рамку, одна из сторон которой подвижна, то вся она затянется пленкой жидкости.

Силы поверхностного натяжения стремятся сократить поверхность пленки (рис. 11.19).

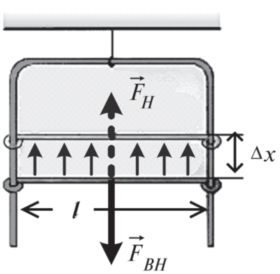


Рис. 11.19

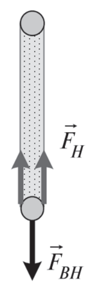


Рис. 11.20

Для равновесия подвижной стороны рамки к ней нужно приложить внешнюю силу

$$\vec{F}_{вн} = -\vec{F}_н.$$

Если под действием силы перемычка переместиться на Δx, то будет произведена работа:

$$\Delta A_{вн} = F_{вн}\Delta x = \Delta E_p = \sigma \Delta S,$$

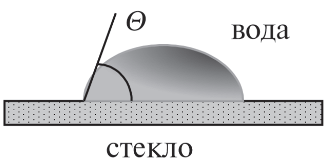
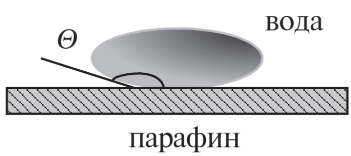
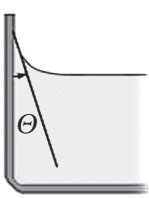
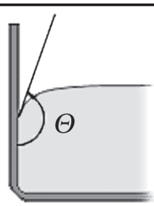
где $\Delta S = 2\,l\Delta x$ – приращение площади поверхности обеих сторон мыльной пленки. Двойка в формуле учитывает создание двух поверхностей пленки (рис. 11.20 – вид сбоку рамки).

Так как модули сил $\vec{F}_{вн}$ и $\vec{F}_{н}$ одинаковы, то работа сил поверхностного натяжения равна: $A = F_H \Delta x = \sigma 2 l \Delta x = \sigma \Delta S$.

где S ($м^2$) – площадь поверхности. Отсюда $\sigma = \dfrac{A}{\Delta S}$. $(\dfrac{Дж}{м^2})$.

Коэффициент поверхностного натяжения σ – это работа затрачиваемая на изменение площади свободной поверхности жидкости на одну единицу площади.

Смачивание *– явление, возникающее вследствие взаимодействия молекул жидкости с молекулами твердых тел и приводящее к искривлению поверхности жидкости у поверхности твердого тела.*

Смачивание	**Несмачивание**
Жидкость является смачивающей, если молекулы жидкости притягиваются друг к другу слабее, чем к молекулам твердого вещества.	Жидкость является не смачивающей, если молекулы жидкости притягиваются друг к другу сильнее, чем к молекулам твердого вещества.
 Рис. 11.21	 Рис. 11.22
Краевой эффект в широких сосудах	
 Рис. 11.23	 Рис. 11.24
Для смачивающих жидкостей краевой угол Θ острый $0 \le \Theta < \dfrac{\pi}{2}$	Для не смачивающих жидкостей краевой угол Θ тупой $\dfrac{\pi}{2} < \Theta < \pi$

Жидкость всегда находится внутри краевого угла.

Формула Лапласа.

Если поверхность жидкости не плоская, а искривленная, то она оказывает на жидкость избыточное давление. Это давление, обусловленное силами поверхностного натяжения, для выпуклой поверхности положительно и направлено внутрь жидкости, а для вогнутой поверхности – отрицательно и направлено в противоположную сторону.

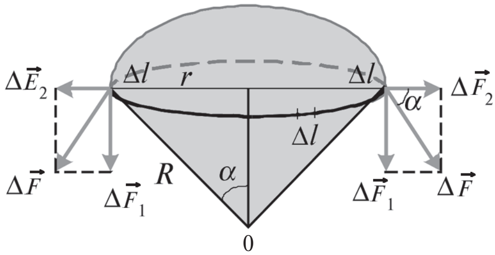


Рис. 11.25

Для расчета избыточного давления предположим, что свободная поверхность жидкости имеет форму сферы радиуса R, от которой мысленно отсечен шаровой сегмент, опирающийся на окружность радиуса $r = R\,sin\alpha$ (рис. 11.25).

На каждый бесконечно малый элемент длины Δl этого контура действует сила поверхностного натяжения $\Delta F = \sigma\Delta l$, касательная к поверхности сферы. Разложив ΔF на два компонента ΔF_1 и ΔF_2, видим, что геометрическая сумма сил ΔF_2 равна нулю, так как эти силы взаимно уравновешиваются. Поэтому равнодействующая сил поверхностного натяжения направлена перпендикулярно плоскости сечения внутрь жидкости и равна:

$$F = \sum \Delta F_1 = \sum \Delta F \sin\alpha = \sum \sigma \Delta l \frac{r}{R} = \frac{\sigma r}{R} \sum \Delta l = \frac{\sigma r}{R} 2\pi r.$$

Разделив эту силу на площадь основания πr^2, вычислим избыточное давление на жидкость, создаваемое силами поверхностного натяжения и обусловленное кривизной выпуклой поверхности:

$$\Delta p = \frac{F}{S} = \frac{2\sigma\pi r^2}{R\pi r^2} = \frac{2\sigma}{R}. \qquad (1)$$

Если поверхность жидкости вогнутая, то результирующая сил поверхностного натяжения направлена из жидкости и равна:

$$\Delta p = -\frac{2\sigma}{R}. \qquad (2)$$

Следовательно, давление внутри жидкости под вогнутой поверхностью меньше, чем в газе, на величину Δp.

Для произвольной поверхности жидкости двоякой кривизны:

$$\Delta p = \sigma\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right), \qquad (3)$$

где R_1 и R_2 – радиусы кривизны двух любых взаимно перпендикулярных нормальных сечений поверхности жидкости.

Формулы (1) и (2) являются частными случаями *формулы Лапласа* (3), определяющей избыточное давление.

Капиллярные явления *– явления, при которых жидкость поднимается или опускается в узких трубках (капиллярах), по сравнению с уровнем жидкости в широком сосуде, в результате действия сил поверхностного натяжения.*

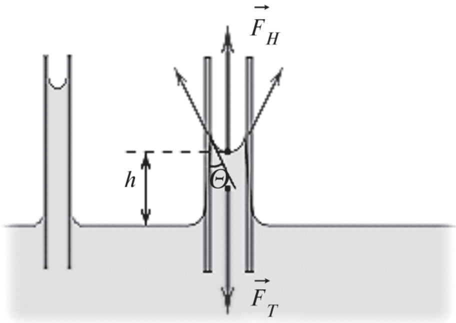


Рис. 11.26

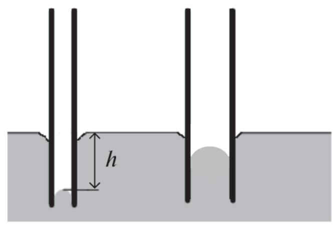


Рис. 11.27

Если жидкость смачивает материал трубки, то внутри трубки поверхность жидкости – *мениск* – имеет вогнутую форму (рис. 11.26), если не смачивает – выпуклую (рис. 11.27).

Под вогнутой поверхностью жидкости появится отрицательное избыточное давление, определяемое по формуле Лапласа (2). Наличие этого давления приводит к тому, что жидкость в капилляре поднимается, так как под плоской поверхностью жидкости в широком сосуде избыточного давления нет. Жидкость в капилляре с радиусом канала *r* поднимается или опускается на такую высоту *h*, при которой давление столба жидкости (гидростатическое давление) ρgh уравновешивается избыточным давлением Δp, т.е.

$$\frac{2\sigma}{r} = \rho gh.$$

Отсюда: $h = \dfrac{2\sigma}{\rho gr}$ – высота жидкости в капиллярной трубке.

Формулу высоты жидкости в капиллярной трубке можно получить и другим способом. Жидкость в капилляре при смачивании поднимается до тех пор, пока сила тяжести mg ее в столбике h не станет равной равнодействующей сил поверхностного натяжения $F_н$. Поэтому $F_н = mg$, $\sigma l = \rho Vg$, $\sigma 2\pi r = \rho\pi r^2 hg$;

Отсюда: $h = \dfrac{2\sigma}{\rho gr}$ – высота жидкости в капиллярной трубке.

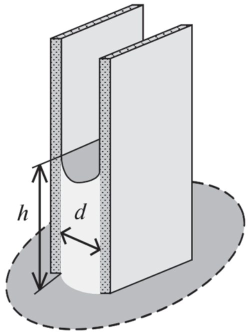


Рис. 11.28

Высота поднятия смачивающей жидкости между параллельными пластинами (рис.11.28), отстоящими друг от друга на расстоянии *d*, вдвое меньше, чем в трубке диаметром *d*=2*r*.

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g d}.$$

Практическое применение явлений смачивания и капиллярности: тела, пронизанные большим числом тонких каналов (капилляров), активно впитывают в себя воду и другие смачивающие жидкости. Примерами поверхностных явлений в природе служит движение растворов по капиллярам в почве и растениях; действие моющих средств, действие фильтров и фитилей и др.

§ 79. Кристаллические и аморфные тела

По своим физическим свойствам и молекулярной структуре твердые тела разделяются на два класса – ***кристаллические*** и ***аморфные*** тела.

Кристаллические тела. В кристаллических телах частицы располагаются в строгом порядке, образуя пространственные периодически повторяющиеся структуры – *кристаллические решетки*, в узлах которых располагаются центры атомов или молекул данного вещества. Частицы в кристаллах плотно упакованы, так что расстояние между их центрами приблизительно равно размеру частиц.

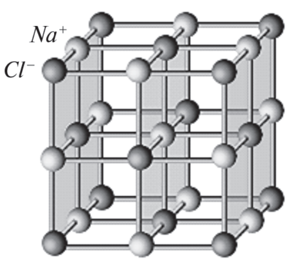


Рис. 11.29

В ионных кристаллах кристаллическая решетка строится из ионов (положительно и отрицательно заряженных) атомов, которые входят в состав молекулы данного вещества (рис. 11.29). Например, решетка поваренной соли содержит ионы Na^+ и Cl.

В каждой пространственной решетке можно выделить структурный элемент минимального размера, который называется *элементарной ячейкой*. Вся кристаллическая решетка может быть построена путем параллельного переноса (*трансляции*) элементарной ячейки по некоторым направлениям.

Доказано, что всего может существовать 230 различных пространственных кристаллических структур. Большинство из них обнаружены в природе, некоторые созданы искусственно.

Простые кристаллические решетки: (рис. 11.30)

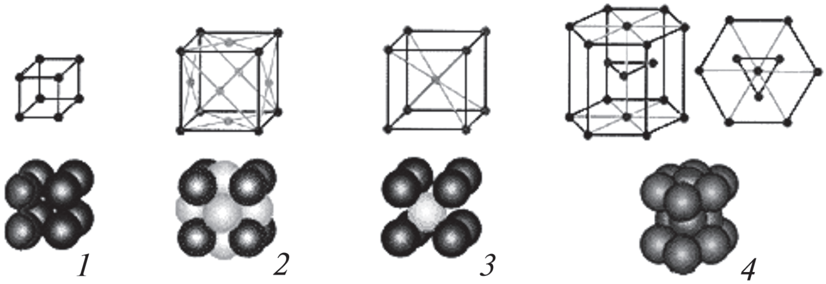


Рис. 11.30

1 – простая кубическая решетка (NaCl, KCl);
2 – гранецентрированная кубическая решетка (Cu, Ag, Pt, Au);
3 – объемноцентрированная кубическая решетка (Li, Na, K, W);
4 – гексагональная решетка (Mg, Zn, Re, Ti).

Кристаллические тела могут быть *монокристаллами и поликристаллами.*

Монокристаллы *– одиночные кристаллы, то есть, твердые тела, частицы которых образуют единую однородную кристаллическую решетку.* Углы между соответствующими гранями остаются постоянными. Большие монокристаллы редко встречаются в природе.

Поликристаллические тела состоят из многих сросшихся между собой хаотически ориентированных маленьких кристалликов, которые называются *кристаллитами.*

Основное свойство монокристаллов – это *анизотропия.* Поликристаллические тела – *изотропны.*

Анизотропия *– зависимость физических свойств от выбранного направления внутри кристалла.*

Физические свойства – это упругие, механические, тепловые, электрические, магнитные, оптические и другие свойства вещества.

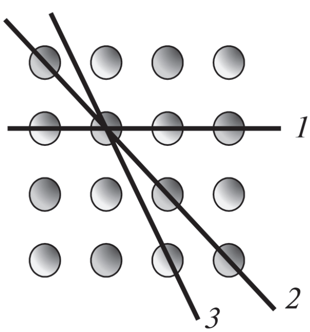


Рис. 11.31

Анизотропия монокристаллов объясняется тем, что плотность расположения частиц кристаллической решетки по разным направлениям (1, 2, и 3) не одинакова, что и приводит к различию свойств кристалла вдоль этих направлений (рис. 11.31).

В отличие от монокристаллов, поликристаллические тела изотропны, т.е. их свойства одинаковы во всех направлениях. Поликристаллическое строение твердого тела можно обнаружить с помощью микроскопа, а иногда оно видно и невооруженным глазом (чугун).

Многие вещества могут существовать в нескольких кристаллических модификациях (фазах), отличающихся физическими свойствами. Это явление называется *полиморфизмом*. Примером полиморфного перехода является превращение графита в алмаз. Этот переход при производстве искусственных алмазов осуществляется при давлениях 60–100 тысяч атмосфер и температурах 1500–2000 К.

Аморфные тела. Характерной особенностью аморфных тел является их *изотропность*, т.е. независимость всех физических свойств (механических, оптических и т.д.) от направления. Молекулы и атомы в аморфных телах располагаются хаотично. При низких температурах аморфные тела по своим свойствам напоминают твердые вещества. Текучестью почти не обладают. По мере повышения температуры постепенно размягчаются и их свойства все более приближаются к свойствам жидкостей. *Определенной температуры плавления* у аморфных тел нет. Примерами аморфных тел могут служить стекло, различные затвердевшие смолы (янтарь), пластики и т.д.

§ 80. Механические свойства твердых тел

Деформация – *это изменение формы и размеров тела.* Деформация твердого тела является результатом изменения под действием внешних сил взаимного расположения частиц, из которых состоит тело.

Существует несколько видов деформаций твердых тел (рис.11.32). *Например:*

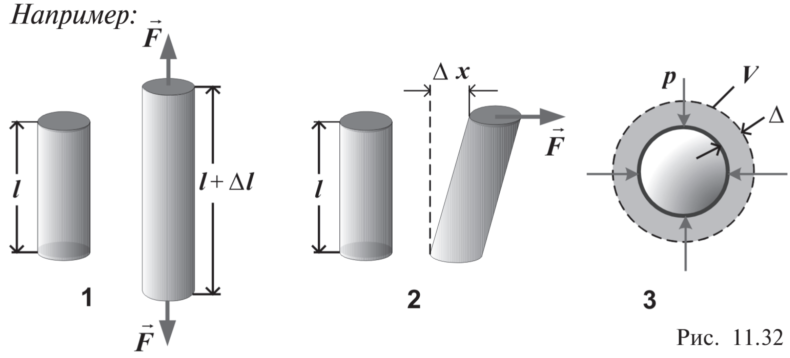


Рис. 11.32

1 – деформация растяжения;

2 – деформация сдвига;

3 – деформация всестороннего сжатия.

Деформация называется упругой, если после прекращения действия внешних сил, тело принимает первоначальные размеры и форму.

Деформации, которые сохраняются после прекращения действия внешних сил, называются *пластическими* или остаточными.

Деформация растяжения. Закон Гука.

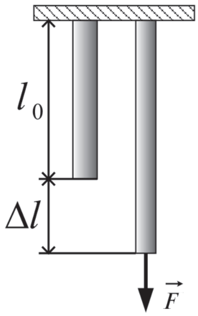


Рис. 11.33

Пусть однородный стержень удлиняется под действием силы $\vec{F}$ (рис. 11.33).

l_0 – начальная длина; l – конечная длина.

$\Delta l = l - l_0$ – абсолютное удлинение;

$\varepsilon = \dfrac{\Delta l}{l_0}$ – относительное удлинение;

при растяжении $\varepsilon > 0$, при сжатии $\varepsilon < 0$;

$\vec{F}$ – приложенная сила;

S – площадь поперечного сечения стержня;

$\sigma = \dfrac{F}{S}$ – механическое напряжение.

Закон Гука: *напряжение прямо пропорционально относительному удлинению при малых деформациях*

$$\sigma = E\varepsilon, \tag{1}$$

где: $E\left(\dfrac{Н}{м^2} = Па\right)$ – модуль упругости или модуль Юнга.

Модуль Юнга численно равен напряжению, при котором образец удлиняется в два раза ($\varepsilon = 1$). Покажем это:

если $\varepsilon = 1$, тогда $\dfrac{\Delta l}{l_0} = 1 \;\Rightarrow\; l - l_0 = l_0 \;\Rightarrow\; l = 2l_0$.

Реально большинство веществ не могут удлиниться в два раза, поэтому модуль Юнга это гипотетическая величина.

В механике закон Гука выражался в виде

$$F = kx. \tag{2}$$

Докажем, что две формулы закона Гука (1) и (2) равноправны:

$$\sigma = E\varepsilon \Rightarrow \frac{F}{S} = E\frac{\Delta l}{l_0} \;\Rightarrow\; F = \frac{SE}{l_0}\Delta l,$$

заменим $\dfrac{SE}{l_0} = k$ – жесткость образца, а $\Delta l = x$ – смещение,

получим: $F = kx.$

Все виды деформаций – растяжение (сжатие), сдвиг, изгиб, кручение – могут быть сведены к деформациям растяжения (сжатия) и сдвига. Деформация изгиба сводится к деформациям растяжения и сжатия (рис. 11.34).

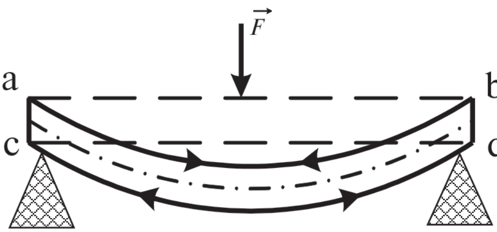


Рис. 11.34

Выпуклая сторона *cd* подвергается растяжению, вогнутая сторона *ab* подвергается сжатию. Внутренний слой не испытывает ни растяжения, ни сжатия и называется *нейтральным*.

Так как нейтральный слой не испытывает механической нагрузки, его можно сделать менее прочным, не уменьшая прочности тела в целом. Это позволяет облегчать конструкцию и экономить материал. Поэтому в технике вместо сплошных стержней и брусьев применяют трубы, рельсы, швеллеры и т.д. В природе кости животных и человека, стебли злаковых растений имеют трубчатую форму.

Диаграмма растяжения.

Графическое изображение зависимости между удлинением ε и механическим напряжением σ называется *диаграммой растяжения*. Типичный пример диаграммы растяжения для пластичных материалов (металлы медь или мягкое железо) представлен на рис.11.35.

При малых деформациях (меньших 1%) связь между σ и ε оказывается линейной (участок 0a на диаграмме), выполняется закон Гука.

Максимальное значение $\sigma_{пр}$, при котором сохраняется линейная связь между σ и ε, называется *пределом пропорциональности* (точка а).

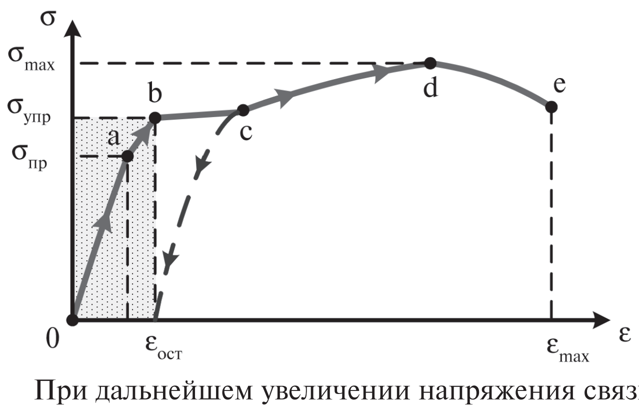


Рис. 11.35

При дальнейшем увеличении напряжения связь между σ и ε становится нелинейной (участок a*b*). При снятии напряжения восстанавливаются размеры тела, то есть деформация является упругой (весь участок *0b*) . Максимальное напряжение $\sigma_{упр}$ на этом участке называется *пределом упругости* (точка *b*). Выделенная полоса – область упругих деформаций.

Если $\sigma > \sigma_{упр}$, то образец после снятия напряжения уже не восстанавливает свои первоначальные размеры и у тела сохраняется *остаточная деформация* $\varepsilon_{ост}$. Такие деформации называются пластическими (участки *bc*, *cd* и *de*). На участке *bc* деформация происходит почти без увеличения напряжения. Это явление называется *текучестью* материала. В точке *d* достигается наибольшее напряжение σ_{max}, которое способно выдержать материал без разрушения (*предел прочности*). В точке *e* происходит разрушение материала.

Материалы, для которых область текучести значительна, называются *пластичными* (вязкими). У таких материалов обычно деформация, при которой происходит разрушение ε_{max}, в десятки раз превосходит ширину области упругих деформаций (многие металлы).

Материалы, у которых область текучести мала, называются *хрупкими*. Разрушение их происходит при деформациях, лишь незначительно превышающих область упругих деформаций, (стекло, фарфор, чугун).

§ 81. Тепловое расширение твердых тел

Механизм процесса теплового расширения кристаллических тел можно понять, используя график зависимости сил взаимодействия частиц друг с другом от расстояния между ними (рис. 11.36).

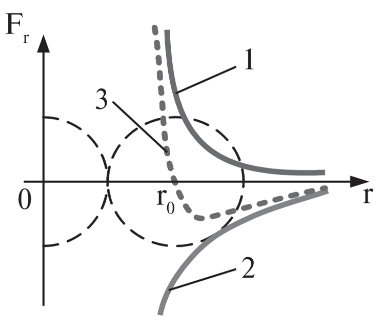


Рис. 11.36

Силы отталкивания зависят от расстояния между частицами в боль-шей степени, чем силы притяжения.

1 – сила отталкивания.

2 – сила притяжения.

3 – результирующая сила взаимодействия частиц.

Рассмотрим *колебания* частицы, окруженной «соседями».

С повышением температуры амплитуда колебаний рассматриваемой частицы возрастает, что, с одной стороны, приводит к сближению частицы с «соседями», а с другой — к удалению их друг от друга. Но силы отталкивания между рассматриваемой частицей и «соседями» при их сближении больше сил притяжения между частицей и «соседями» при их удалении друг от друга. В результате действия сил взаимного притяжения и отталкивания между частицами при повышении температуры каждая частица удаляется от своих «соседей» больше, чем приближается к ним. Среднее расстояние между частицами тела при повышении его температуры увеличивается, и мы наблюдаем явление теплового расширения тела. Таким образом, тепловое расширение по своему характеру тоже является деформацией, хотя и не вызванной механическим воздействием. Опыт показывает, что относительное изменение объема тела $\frac{\Delta V}{V_0}$ прямо пропорционально изменению температуры ΔT:

$\frac{\Delta V}{V_0} = \beta \Delta T$, где β – температурный коэффициент объемного расширения, ΔV — изменение объема тела по сравнению с его первоначальным объемом V_0.

При тепловом расширении тела изменяются все его размеры. Для описания теплового расширения удлиненных тел (проволок, труб и др.) и анизотропных тел используют температурный коэффициент линейного расширения $\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T}$, где Δl — изменение длины тела при изменении температуры на ΔT, l_0 — первоначальная длина тела.

Если тело изотропно, то $\beta = 3\alpha$ и справедливы формулы:

$$l = l_0(1+\alpha t); \qquad S = S_0(1+2\alpha t); \qquad V = V_0(1+3\alpha t).$$

Тепловое расширение тел учитывается при конструировании всех установок, приборов и машин. На тепловом расширении основано действие ряда физических приборов, например термометра, биметаллического реле и др. Биметаллические пластинки, состоящие из двух скрепленных разнородных металлических полос, используются для автоматического размыкания (замыкания) электрических цепей в термостатах, в противопожарных датчиках и т.п. (рис.11.37).

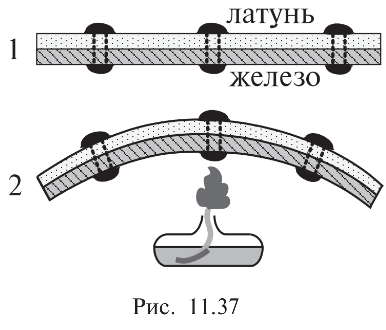


Рис. 11.37

При нагревании биметаллической пластинки, одна полоса удлиняется больше другой и вся пластинка изгибается и может, например, замкнуть электрический контакт.

$$\alpha_{железа} = 1{,}2 \cdot 10^{-5} K^{-1},$$

$$\alpha_{латуни} = 1.8 \cdot 10^{-5} K^{-1}.$$

В результате нагревания или охлаждения тела могут возникнуть внутренние механические напряжения, превышающие предел упругости и даже предел прочности материала, и тело может разрушиться. Во избежание подобных явлений при строительстве железных дорог, мостов, трубопроводов, линий электропередачи и т.д. делают тепловые зазоры и компенсаторы.

В технике и строительстве необходимо учитывать, что сочетания различных материалов с неодинаковыми коэффициентами теплового расширения могут привести к деформации и разрушению конструкций.

Вопросы и задания

1. *Что называется насыщенным паром?*
2. *Как зависит давление насыщенного пара от объема и от температуры?*
3. *Сравните зависимости давления от температуры для насыщенного пара и для идеального газа.*
4. *Начертите изотерму реального газа. Сопоставте ее с изотермой для идеального газа.*
5. *Какой участок изотермы реального газа соответствует фазовому переходу?*
6. *Что такое критическая температура? Поясните на графике зависимости плотности от температуры.*
7. *В каком агрегатном состоянии может находиться вещество при температуре выше критической (ниже критической)?*
8. *Что такое кипение? Как зависит температура кипения от давления?*
9. *Дайте определение абсолютной и относительной влажности воздуха. В чем она измеряется?*
10. *Что такое точка росы? Поясните на графике зависимости давления насыщенного пара от температуры.*
11. *Какими приборами и как определяют влажность воздуха? Объясните принцип их работы.*
12. *Объясните происхождение сил поверхностного натяжения.*
13. *Каков физический смысл коэффициента поверхностного натяжения? От чего он зависит?*
14. *Почему жидкость стремится принять форму шара?*
15. *Сравните явления смачивания и не смачивания.*
16. *Сравните капиллярные явления для смачивающей и несмачивающей жидкостей.*
17. *Под действием каких сил жидкость поднимается (опускается) в капиллярных трубках?*
18. *От каких физических величин зависит высота жидкости в капиллярной трубке?*
19. *Назовите основные свойства кристаллических твердых тел.*

20. Что называется анизотропией? Объясните анизотропию кристаллов.

21. Сравните понятия: монокристаллы и поликристаллы.

22. Назовите основные свойства аморфных твердых тел.

23. Что называется деформацией? Назовите виды деформаций.

24. Сформулируйте закон Гука. Каков физический смысл модуля Юнга?

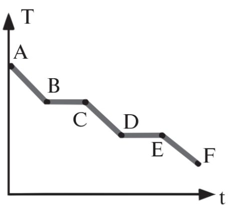
25. Какие деформации называются упругими (не упругими)?

Тестовые задания

1. (96/10-27). Как зависит давление насыщенного пара от его объема?

A) пропорционально объему.
B) не зависит от объема.
C) обратно пропорционально объему.
D) пропорционально квадрату объема.
E) обратно пропорционально квадрату объема.

2. (98/9-10). В процессе охлаждения вещество сначала переходит из газообразного состояния в жидкое, далее из жидкого состояния в твердое. Какой участок графика зависимости температуры вещества от времени, показанного на рисунке, соответствует переходу пар-жидкость?



A) C-D.   *B) A-B.*   *C) E-F.*
D) D-E.   *E) B-C.*

3. (98/3-27). От каких параметров зависит давление насыщенного пара?

A) от температуры и объема.
B) ни от температуры, ни от объема не зависит.
C) от объема.
D) от температуры и рода пара.
E) только от температуры.

4. (00/9-65). В первом закрытом сосуде находится вода и водяной пар, во втором – только насыщенный водяной пар. Как изменится давление в этих сосудах при повышении температуры?

A) во втором увеличится больше.
B) в первом увеличится больше.
C) увеличится одинаково.
D) в первом не изменится, во втором увеличится.
E) в первом увеличится, во втором не изменится.

5. (00/9-27). В плотно закрытой бутылке, заполненной водой, имеется пузырек воздуха. При какой температуре объем пузырька

наибольший? Температурным изменением объема бутылки пренебречь.

A) 0 °C.   B) 20 °C.   C) 15 °C.   D) 4 °C.   E) 8 °C.

6. (00/9-64). Вода в открытом сосуде закипела при 95 °C. В чем причина этого?

A) атмосферное давление больше нормального.
B) воду нагрели медленно.
C) воду нагрели быстро.
D) атмосферное давление меньше нормального.
E) НПО.

7. (00/10-39). Вода в герметически закрытом сосуде закипела при 105 °C. В чем причина этого?

A) давление в сосуде больше нормального атмосферного.
B) воду нагрели быстро.
C) давление в сосуде меньше нормального атмосферного.
D) воду нагрели медленно.
E) НПО.

8. (98/6-32). Что такое точка росы?

A) относительная влажность, при которой водяной пар насыщается.
B) давление, при котором водяной пар насыщается.
C) температура кипения воды при данном давлении.
D) критическая температура водяного пара.
E) температура, при которой водяной пар, присутствующий в атмосфере, становится насыщенным.

9. (96/3-22). Продолжите определение: «парциальное давление водяного пара в воздухе есть давление, ...»

A) которое показывает барометр на воздухе.
B) при котором водяной пар насыщается.
C) при котором водяной пар нагрет до критической температуры.
D) которое может создать водяной пар при отсутствии других газов.
E) при котором водяной пар конденсируется.

10. (01/7-51). Сколько кг водяного пара содержится в школьном коридоре длиной 70 м, шириной 7 м и высотой 4 м, если в 1 $м^3$ воздуха имеется 15 г водяного пара?

A) 25.   B) 28,6.   C) 39,2.   D) 29,4.   E) 15.

11. (96/7-26). Температура 19 °C, парциальное давление водяного пара 1,1 кПа. Какова относительная влажность воздуха? Давление насыщенного пара при 19 °C равно 2,2 кПа.

A) 30%.   B) 40%.   C) 50%.   D) 60%.   E) 70%.

12. (96/15-109). Каким будет отношение плотностей водяного пара в воздухе в июле при температуре 35 °С и в ноябре при температуре 0 °С если в это время относительная влажность воздуха 40% и 95% соответственно? Давление насыщенных водяных паров при температуре 0 °С равно 4,6 мм.рт.ст., а при 35 °С равно 42 мм.рт.ст.

A) 0,33. *B) 0,5.* *C) 1.* *D) 2.* *E) 3,8.*

13. (03/7-42). Какова абсолютная влажность воздуха (г/м^3), если относительная влажность равна 50%, а температура 16 °С? Плотность насыщенного пара при 16 °С равна р = 13,6 г/м^3.

A) $4{,}81\cdot10^{-3}$. *B)* $6{,}8\cdot10^{-4}$. *C)* $6{,}81\cdot10^{-3}$.

D) $1{,}8\cdot10^{-2}$. *E)* $8{,}8\cdot10^{-4}$.

14. (99/10-45). Чему равна относительная влажность воздуха при температуре 20 °С, если точка росы равна 9 °С. Давление насыщенного пара при 9 °С равно 1,15 кПа, а при 20 °С − 2,33 кПа.

A) 50. *B) 90.* *C) 100.* *D) 45.* *E) 25.*

15. (01/8-22). Относительная влажность в закрытом сосуде с температурой 15 °С равна 80%. Какой станет относительная влажность (в %), если температуру поднять до 29 °С? Упругость насыщенных водяных паров при 0 °С равна 9,2 мм рт.ст., а при 29 °С − 23,8 мм рт.ст.

A) 40. *B) 35.* *C) 15.* *D) 29.* *E) 32.*

16. (02/3-42). Как изменятся абсолютная и относительная влажности воздуха при повышении температуры?

A) увеличатся.

B) абсолютная влажность увеличится, относительная − уменьшится.

C) абсолютная влажность не изменится, относительная − уменьшится.

D) уменьшатся. *E) не изменятся.*

17. (99/6-2). Через трубку с поглощающим влагу веществом пропущено 10 л воздуха. При этом определили, что абсолютная влажность воздуха равна 30 г/м^3. На сколько увеличилась при этом масса трубки?

A) 3 мг. *B) 30 мг.* *C) 3 г.* *D) 300 мг.* *E) 30 г.*

18. (99/9-2). Через трубку с поглощающим влагу веществом пропущено 20 л воздуха. При этом масса трубки увеличилась на 400 мг. Определите абсолютную влажность воздуха (в г/м^3).

A) 40. *B) 30.* *C) 20.* *D) 50.* *E) НПО.*

19.(10-37). Какова относительная влажность воздуха (в %) при температуре 20 °С, если в 5 м^3 воздуха содержится 50 г водяных паров? Плотность насыщенных водяных паров при 20 °С равна 17,3 г/м^3.

A) 50. B) 58. C) 62. D) 65. E) 70.

20. (03/4-5). Укажите единицу коэффициента поверхностного натяжения. 1) Н/м; 2) Н/м^2; 3) Дж/м; 4) Дж/м^2; 5) Пас.

A) 1; 5. B) 1. C) 2; 3.

D) 1; 3; 5. E) 1; 4.

21. (96/5-97). Восемь одинаковых шарообразных капелек ртути сливаются в одну каплю. Как при этом изменится их температура и почему?

A) не изменится, т.к. поверхностная энергия не изменится.

B) уменьшится, т.к. поверхностная энергия уменьшится.

C) уменьшится, т.к. поверхностная энергия увеличится.

D) увеличится, т.к. поверхностная энергия уменьшится.

E) увеличится, т.к. поверхностная энергия увеличится.

22. (03/5-24). Сколько капель образуется из 1 см^3 воды, если она капает из трубки диаметром 1,8 мм? Коэффициент поверхностного натяжения воды равен 0,072 Н/м.

A) 49. B) 36. C) 30. D) 25. E) 12.

23. (03/4-9). Определите массу капли спирта (мг), отрывающейся от пипетки с диаметром кончика в 1 мм. Коэффициент поверхностного натяжения спирта равен 22 мН/м.

A) 6,9. B) 11. C) 13,8. D) 34,6. E) 69.

24. (99/9-3). В дне чайника имеется круглое отверстие диаметром 0,146 мм. До какой высоты (в см) можно налить воду, чтобы она не выливалась через отверстие? Коэффициент поверхностного натяжения воды 73 мН/м, а плотность 1000 кг/м^3.

A) 73. B) 60. C) 40. D) 20. E) 10.

25. Проволочное кольцо радиусом 5 см и массой 7,5 г горизонтально погружено в мыльный раствор. Коэффициент поверхностного натяжения мыльного раствора 40 мН/м. Какую силу нужно приложить, чтобы кольцо оторвать от раствора?

A) 0,025 Н. B) 0,075 Н. C) 0,1 Н. D) 0,05 Н.

26. (00/1-33). В каких единицах выражается коэффициент поверхностного натяжения?

A) Дж·с. B) Дж/м. C) Дж/м^3.

D) Н/м^2. E) Н/м.

27. (96/3). Какую работу (мДж) нужно совершить, чтобы увеличить радиус мыльной пленки от 1 см до 6 см? Коэффициент поверхностного натяжения мыльного раствора 45- мН/м.

A) 4,5. B) 4,0. C) 3,6. D) 1,89. E) 0.

28. (03/4-7). На какую высоту (см) поднимается вода по капиллярной трубке диаметром 0,73 мм? Коэффициент поверхностного натяжения воды $\sigma_в$=73 мН/м.

A) 1. B) 2. C) 4. D) 8. E) 12.

29. (03/4-6). Капиллярная трубка диаметром 1,5 мм опускается в воду, а трубка диаметром 0,5 мм опускается в керосин. Каково отношение высот подъема h_B / h_K этих жидкостей по трубкам? Плотности и коэффициенты поверхностного натяжения воды и керосина равны соответственно:

$\rho_в$= 1 г/см^3, $\rho_к$=0,8 г/см^3 и $\sigma_в$=72 мН/м, $\sigma_к$=24 мН/м.

A) 0,5. B) 0,8. C) 1,25. D) 1,5. E) 3.

30. (03/1-45). Каков коэффициент поверхностного натяжения жидкости (в мН/м) с плотностью 0,8 г/см^3, если она поднимается по капилляру с диаметром 2 мм на высоту 7,5 мм?

A) 73. B) 24. C) 40. D) 30. E) 64.

31. (02/12-46). Две капиллярные трубки опущены в две жидкости. Радиус второй трубки в 4 раза меньше, чем первой. Во сколько раз высота жидкости во второй трубке больше, чем в первой, если коэффициент поверхностного натяжения второй жидкости в 2 раза больше, чем у первой?

A) 8. B) 4. C) 2. D) 16. E) Высоты равны.

32. (04/). Две параллельные пластины и капиллярная трубка вертикально опущены в жидкость, смачивающую их. Расстояние между пластинами равно радиусу капилляра. Каково соотношение высот h_1 и h_2 подъема жидкости в них?

A) $h_1 = 1,5\, h_2$. *B)* $2\, h_1 = h_2$. *C)* $h_1 = 2\, h_2$.
D) $1,5\, h_1 = h_2$. *E)* $h_1 = h_2$.

33. (01/12-28). Как изменяется температура кристаллического тела с момента начала плавления до его окончания?

A) в начале плавления повышается, затем понижается,
B) в начале плавления понижается, затем, повышается.
C) постепенно повышается.
D) не изменяется.
E) постепенно понижается.

34. (03/4-10). Как изменится относительное удлинение проволоки, если ее согнуть вдвое и нагрузить тем же грузом?

A) не изменится.
B) уменьшится в 4 раза.
C) увеличится в 2 раза.
D) уменьшится в 2 раза.

E) увеличится в 4 раза.

35. (03/4-11). Как изменится абсолютное удлинение проволоки, если ее согнуть вдвое и нагрузить тем же грузом?

A) не изменится.
B) уменьшится в 4 раза.
C) увеличится в 2 раза.
D) уменьшится в 2 раза.
E) увеличится в 4 раза.

36. (03/4-4). Две проволоки, сделанные из одного и того же материала, подвергаются одинаковому механическому напряжению. Относительное удлинение какой из них больше и во сколько раз, если первая из них в 2 раза длиннее второй?

A) одинаковы.
D) второй, в 4 раза.
B) второй, в 2 раза.
E) первой, в 2 раза.
C) первой, в 4 раза.

37. (98/1-23). На рисунке представлена диаграмма растяжения материала. На каком участке диаграммы выполняется закон Гука?

A) 4-5. B) 1-2. C) 2-3. D) 3-4. E) 0-1.

38. (98/5-23). На рисунке представлена диаграмма растяжения материала. Какая точка на диаграмме соответствует пределу прочности данного материала?

A) 1. B) 2. C) 3. D) 4. E) 5.

39. (98/12). Проволока плотностью ρ и пределом прочности σ подвешена вертикально. Какова должна быть максимальная длина проволоки, чтобы она не рвалась под действием собственной силы тяжести?

A) $\sigma \rho g$. *B)* $\frac{\sigma}{\rho g}$. *C)* $\frac{\rho g}{\sigma}$. *D)* $\frac{\sigma}{g}$. *E)* $\frac{\sigma}{\rho}$.

40. (02/3-36). Какую силу надо приложить, чтобы стальную проволоку длиной 4 м и поперечным сечением 1 мм^2 удлинить на 2 мм? Модуль упругости для стали 200 ГПа.

A) 10 Н. B) 1000 Н. C) 100 кН.
D) 100 Н. E) 1000 кН.

41. (01/11-24). Какой может быть наибольшая высота кирпичной стены, если плотность кирпича равна 1,8 г/см^3, а предел прочности — 0,36 МПа?

A) 20. B) 25. C) 64. D) 30. E) 50.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Физические величины и их единицы в СИ

Основные единицы				
Наименование величины	**Единица**			
		Обозначение		**Определение**
	Наименование	международное	русское	
Длина	Метр	m	м	Метр равен расстоянию, проходимому в вакууме плоской электромагнитной волной за 1/299 792 458 долей секунды.
Масса	Килограмм	kg	кг	Килограмм равен массе международного прототипа килограмма
Время	Секунда	s	с	Секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соотвествующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.
Сила электрического тока	Ампер	A	А	Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную 2-1-7 Н.

Термодинамическая температура	Кельвин	K	К	Кельвин равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды.
Количество веществ	Моль	mol	моль	Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углеводе-12 массой 0,012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другим частицами или специфицированными группами частиц.
Сила света	Кандела	cd	кд	Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 101^{2}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср.
Дополнительные единицы				
Плоский угол	Радиан	rad	рад	Радиан равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу.
Телесный угол	Стерадиан	sr	ср	Стерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.
Производные единицы пространства и времени				
Площадь	Квадратный метр	m^2	$м^2$	Квадратный метр равен площади квадрата со сторонами, длины которых равны 1 м.
Объем, вместимость	Кубический метр	m^3	$м^3$	Кубический метр равен объему куба с ребрами, длины которых равны 1 м.
Скорость	Метр в секунду	m/s	м/с	Метр в секунду равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой точка за время /с перемещается на расстояние 1 м.
Ускорение	Метр на секунду в квадрате	m/s^2	$м/с^2$	Метр на секунду в квадрате равен ускорению прямолинейно и равноускоренно движущейся точки, при котором за время 1 с скорость точки возрастает на 1 м/с.

Угловая скорость	Радиан в секунду	rad/s	рад/с	Радиан в секунду равен угловой скорости равномерно вращающегося тела, при которой за время 1 с совершается поворот тела относительно оси вращения на угол 1 рад.
Период	Секунда	s	с	Время одного полного оборота. Время одного полного колебания.
Частота периодического процесса	Герц	Hz	Гц	Герц равен частоте периодического процесса, при которой за время 1 с происходит один цикл периодического процесса.
Производные единицы механических величин				
Плотность	Килограмм на кубический метр	kg/m^3	кг/м^3	Килограмм на кубический метр равен плотности однородного вещества, масса которого при объеме 1 м^3 равна 1 кг.
Импульс (количество движения)	Килограмм на кубический метр	kg·m/c	кг·м/с	Килограмм-метр в секунду равен импульсу (количеству движения) тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с.
Сила	Ньютон	N	Н	Ньютон равен силе, сообщающей телу массой 1 кг ускорение 1 м/с^2 в направлении действия силы.
Импульс силы	Ньютон-секунда	N·s	Н·с	Ньютон-секунда равна импульсу силы, создаваемому силой 1Н, действующей в течение 1 с.
Момент силы, момент пары сил	Ньютон-метр	N·m	Н·м	Ньютон-метр равен моменту силы, создаваемому силой 1 Н относительно точки, расположенной на расстоянии 1 м от линии действия силы.
Давление, напряжение (механическое)	Паскаль	Pa	Па	Паскаль равен давлению (механическому напряжению), вызываемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м^2.
Работа, энергия	Джоуль	J	Дж	Джоуль равен работе, совершаемой при перемещении точки приложения силы 1 Н на расстояние 1 м в направлении действия силы.

Мощность	Ватт	W	Вт	Ватт равен мощности, при которой совершается работа 1 Дж за время 1 с.
Поверхностное натяжение	Ньютон на метр	N/m	Н/м	Ньютон на метр равен поверхностному напряжению, создаваемому силой 1 Н, приложенной к участку контура свободной поверхности длиной 1 м и действующей нормально к контуру и по касательной к поверхности.
Производные единицы тепловых величин				
Температура Цельсия	Градус Цельсия	°C	°C	По размеру градус Цельсия равен кельвину
Количество теплоты	Джоуль	J	Дж	Джоуль равен количеству теплоты, эквивалентному работе 1 Дж.
Теплоемкость	Джоуль на кельвин	J/K	Дж/K	Джоуль на кельвин равен теплоемкости системы, температура которой повышается на 1 K при подведении к системе количества теплоты 1 Дж.
Удельная темлоемкость	Джоуль на килограмм-кельвин	J/(kg·K)	Дж/(кг·K)	Джоуль на килограмм-кельвин равен удельной теплоемкости вещества, имеющего при массе 1 кг теплоемкость в 1 Дж/K.
Производные единицы величин молекулярной физики				
Молярная масса	Килограмм на моль	kg/mol	кг/моль	Килограмм на моль равен молярной массе вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль массу 1 кг.
Производные единицы электрических и магнитных величин				
Количество электричества, электрический заряд	Кулон	C	Кл	Кулон равен количеству электричества, проходящего через поперечное сечение при токе силой 1 А за время 1 с.
Напряженность электрического поля	Вольт на метр	V/m	В/м	Вольт на метр равен напряженности однородного электрического поля, при которой между двумя точками, находящимися на линии напряженности поля на расстоянии 1 м, создается разность потенцииалов 1 В.

Электрическое напряжение, электрический потенциал; разность электрических потенциалов; электродвижущая сила	Вольт	V	В	Вольт равен электрическому напряжению на участке электрической цепи, при котором в участке проходит постоянный ток силой 1 А и затрачивается мощность в 1 Вт.
Электрическая емкость	Фарад	F	Ф	Фарад равен электрической емкости конденсатора, при которой заряд 1 Кл создает на конденсаторе напряжение 1 В.
Магнитная индукция	Тесла	T	Тл	Тесла равен магнитной индукции, при которой магнитный поток сквозь поперечное сечение площадью 1 $м^2$ равен Вб.
Магнитный поток	Вебер	Wb	Вб	Вебер равен магнитному потоку, при убывании которого до нуля в сцепленной с ним электрической цепи сопротивлением 1 Ом через поперечное сечение проводника проходит количество электричества 1 Кл
Индуктивность	Генри	H	Гн	Генри равен индуктивности электрической цепи, с которой при силе постоянного тока в ней 1 А сцепляется магнитный поток 1 Вб.
Электрическое сопротивление	Ом	Ω	Ом	Ом равен электрическому сопротивлению участка электрической цепи, при котором постоянный ток силой 1 А вызывает падение напряжения 1 В.
Удельное электрическое сопротивление	Ом-метр	Ω·m	Ом·м	Ом-метр равен удельному сопротивлению вещества, при котором участок выполненной из этого вещества электрической цепи длиной 1 м площадью поперечного сечения 1 $м^2$ имеет сопротивление 1 Ом.
Производные единицы световых величин				
Энергия излучения	Джоуль	J	Дж	Джоуль равен энергии излучения, эквивалентной работу 1 Дж.
Поток излучения, мощность излучения	Ватт	W	Вт	Ватт равен потоку излучения, эквивалентному механической мощности 1 Вт.

Световой поток	Люмен	lm	лм	Люмен равен световому потоку, испускаемому точечным источником в телесном угле 1 ср при силе света 1 кд.
Световая энергия	Люмен-секунда	im·s	лм·с	Люмен-секунда равна световой энергии, соответствующей световому потоку 1 лм, излучаемому или воспринимаемому в течение 1 с.
Яркость	Кандела на квадратный метр	cd/m^2	$кд/м^2$	Кандела на квадратный метр равна яркости светящейся поверхности площадью 1 $м^2$ при силе света 1 кд.
Светимость	Люмен на квадратный метр	lm/m^2	$лм/м^2$	Люмен на квадратный метр равен светимости поверхности площадью 1 $м^2$ при световом потоке падающего на нее излучения, равном 1 лм.
Освещенность	Люкс	lx	лк	Люкс равен освещенности поверхности площадью 1 $м^2$ при световом потоке падающего на нее излучения, равном 1 лм
Производные единицы величин ионизирующих излучений				
Поглощенная доза излучения	Грэй	Gy	Гр	Грэй равен поглощенной дозе излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия любого ионизирующего излучения 1 Дж
Мощность поглощенной дозы излучения (мощность дозы излучения)	Грэй в секунду	Gy/s	Гр/с	Грэй в секунду равен мощности поглощенной дозы излучения, при которой за время 1 с облученным веществом поглощается доза излучения 1 Дж/кг
Активность нуклида в радиоактивном источнике	Бекке-рель	Bq	Бк	Беккерель равен активности нуклида, при которой за время 1 с происходит один акт распада

Коды ответов к тестовым заданиям

Глава I. «ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ»

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
D	E	D	E	D	A	B	B	E	E	D
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
D	E	A	E	D	C	B	C	D	E	E
23	24	25	26	27	28	29				
C	D	A	D	B	A	D				

Глава II. «ОСНОВЫ ДИНАМИКИ»

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
B	A	A	E	D	A	A	C	C	C	B	E
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
D	B	E	D	A	D	D	A	C	A	A	B
25	26	27	28								
B	D	A	B								

Глава III. «ЭЛЕМЕНТЫ СТАТИКИ»

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
C	B	B	D	C	E	B	D	E	C	A	A	B	A

Глава IV. «ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ»

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
B	E	C	D	A	D	D	B	D	B	E	E	E	D	C
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
D	A	B	E	A	C	D	E	A	D	E	D	B	B	C

Глава VI. «ГИДРОАЭРОМЕХАНИКА»

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
C	D	B	A	D	E	A	A	C	A	D	E	A	B
15	16	17	18	19	20	21	22	23					
C	E	D	A	E	D	A	E	C					

Глава VII. «МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ»

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	C	A	B	E	A	C	E	D	E	C	A	E	B	C
16	17	18	19	20	21	22	23							
D	E	B	C	A	A	D	E							

Глава VIII. «МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ»

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
C	B	E	B	B	E	C	A	C	A	D	D	C	D	B
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
B	C	E	D	C	B	C	D	C	D	D	C	B	A	

Глава IX. «ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ»

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	C	E	D	B	E	D	B	E	C	A	C
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
D	A	A	C	B	E	E	D	E	C	B	E
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
D	B	C	D	B	A	E	D	C	D	A	C

Глава X. «ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ»

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D	A	E	B	D	C	A	E	B	D
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
C	A	E	D	C	A	B	D	E	C
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
E	B	A	C	D	A	E	D	B	C
31	32	33	34	35					
E	A	D	A	A					

Глава XI. «РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ. ЖИДКОСТИ. ТВЕРДЫЕ ТЕЛА»

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
B	E	D	B	D	D	A	E	D	D	C
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
E	C	A	E	C	D	C	B	E	D	D
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
A	D	C	E	B	C	B	D	A	E	D
34	35	36	37	38	39	40	41			
D	B	A	E	D	B	D	A			

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кикоин И. К. Кикоин А.К.* Физика 9. – М.: Просвещение. 1990.

2. *Шахмаев Н. М. Шахмаев С. Н. Шодиев Д. Ш.* Физика 9. – М.: Просвещение, 1995.

3. *Савельев И. В.* Курс физики Т3. – М.: Наука, 1989.

4. *Шаталов В. Ф. Шейман В. М. Хайт А. М.* Опорные конспекты по кинематике и динамике. – М.: Просвещение, 1989.

5. *Жданов Л. С. Жданов Г. Л.* Физика для средних специальных учебных заведений. – М.: Наука, 1989.

6. *Трофимова Т.И.* Курс физики. – М.: Высшая школа, 1985.

7. Сборник тестовых вопросов для поступающих в учебные заведения. Вестник. – Т.: 1998–2004.

8. *Кошкин Н.И.* Элементарная физика. Справочник. – М.: Наука, 1991.

9. *Турдиев Н.Ш.* Физика. Методическое пособие для учителей. – Т.: 2003.

10. *Гладкова Р. А., Жданов Л.С.* Сборник задач и вопросов по физике для средних специальных учебных заведений. – М.: Наука, 1983.

11. *Хабибуллаев П., Бойдедаев А., Бахромов А.* Физика 7. Механика. – Т.: 2005.

12. *Гольдфарб Н.И.* Сборник вопросов и задач по физике. – М.: Высшая школа, 1982.

13. *Ландсберг Г.С.* Элементарный учебник физики. – Т.: I–III. М.: Наука, 1970.

14. *Тарасов Л.В.* Современная физика в средней школе. – М.: Просвещение, 1990.

15. «Открытый Колледж» www.physics.ru.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава V. ВРАЩЕНИЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Глава VI. ГИДРОАЭРОМЕХАНИКА

Глава VII. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Глава VIII. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Раздел II. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА ТЕРМОДИНАМИКА

Глава IX. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Глава X. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Глава XI. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ. ЖИДКОСТИ. ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

ОПЛАЧКО Тамара Михайловна,
ТУРСУНМЕТОВ Камилжан Ахметович

Физика

ЧАСТЬ I

МЕХАНИКА.
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА.
ТЕРМОДИНАМИКА

Учебное пособие для академических лицеев и профессиональных колледжей

Пятое издание

Редактор ***Георгий Хубларов***
Художественный редактор ***Алёна Делягина***
Технический редактор ***Елена Толочко***
Корректор ***Умида Раджабова***

Номер лицензии AI № 163. 09.11.2009. Подписано в печать 15 августа 2016 года. Формат 60×90[1]/[16]. Гарнитура Таймс. Офсетная печать. Условных печатных листов 13,0. Учетно-издательских листов 12,98. Тираж 1610 экз. Договор № 118—2016. Заказ № 173.

Издательско-полиграфический творческий дом имени Чулпана Узбекского агентства по печати и информации. 100129. г. Ташкент, ул. Навои, 30.
Телефон (371) 244-10-45. Факс (371) 244-58-55.

Отпечатано в отделе оперативной печати издательско-полиграфического творческого дома имени Чулпана Узбекского агентства по печати и информации. 100129, г. Ташкент, ул. Навои, 30.

Оплачко Т.М.
О-61 Физика [текст]: Т.М. Оплачко, К.А. Турсунметов. М-во высш. и сред. спец. образования Республики Узбекистан. Центр сред. спец. проф. образования – Т.: ИПТД им. Чулпана, 2016.
Ч. I: Механика. Молекулярная физика. Термодинамика: Учебное пособие для академических лицеев и профессиональных колледжей. Пятое издание. – 208 с.
I. Турсунметов К. А.
ISBN 978-9943-05-866-8

УДК 53(075)
ББК 22.3я723