

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

С.И. Кузнецов

**Краткий справочник по
физике
Часть I**

**Механика. Механические колебания и волны.
Молекулярная физика и термодинамика.**

2-е издание, переработанное и дополненное

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

**Издательство
Томского политехнического университета
2013**

УДК 53(075.8)

ББК 22.3я73

К 891

Кузнецов С.И.

К 891

Справочник по физике. Часть I. Механика. Механические колебания и волны. Молекулярная физика и термодинамика: учебное пособие / С.И. Кузнецов, – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 113 с.

Справочник по физике разработан на базе лекций по общей физике, более 20 лет читаемых авторами студентам технических вузов в полном соответствии с требованиями образовательного государственного стандарта.

В пособии приведены основные законы и формулы по всем разделам первой части физики с пояснениями, диаграммами, графиками и рисунками.

Цель пособия – помочь студентам освоить материал программы, научиться активно применять теоретические основы физики как рабочий аппарат, позволяющий решать конкретные задачи, приобрести уверенность в самостоятельной работе.

Пособие подготовлено по программе курса физики высших технических учебных заведений. Соответствует инновационной политике, направлено на активизацию научного мышления и познавательной деятельности студентов.

Предназначено для межвузовского использования студентами технических специальностей очной и дистанционной форм обучения.

УДК 53(075.8)

ББК 22.3я73

Рецензенты

Доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической физики ТГУ

А.В. Шаповалов

Доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой общей информатики ТГПУ

А.Г. Парфенов

© Томский политехнический университет, 2013

© Оформление. Издательство ТПУ, 2013

© Кузнецов С.И., 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕХАНИКА.....	5
1.1 Кинематика	5
1.2. Основные уравнения классической динамики	12
1.3. Силы в механике	15
1.4. Неинерциальные системы отсчета	18
1.5. Энергия. Работа. Мощность. Законы сохранения	20
1.6. Динамика вращательного движения твердого тела	25
1.7. Теория тяготения Ньютона	30
1.8. Законы Кеплера	31
1.9. Механика жидкостей и газов	33
1.10. Специальная теория относительности	37
1.11. Основные положения общей теории относительности.....	43
2. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.	45
2.1. Гармонические колебания.....	45
2.2. Сложение гармонических колебаний.....	50
2.3. Влияние внешних сил на колебательные процессы.....	53
2.4. Упругие волны.....	55
3. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА.....	61
3.1. Молекулярно-кинетическая теория.....	61
3.2. Статистические распределения.....	66
3.3. Элементы физической кинетики	71
3.4. Первое начало термодинамики	73
3.5. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам идеальных газов	77
3.6. Круговые процессы. Тепловые машины	80
3.7. Второе и третье начала термодинамики.....	83
3.8. Термодинамические свойства реальных газов	86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	91
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	92
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	94

*Дорога к мудрости проста,
найди её без толстых книжек:
мимо, и мимо, и мимо опять,
но ближе, и ближе, и ближе.*

Пит Хайн. Груки

ВВЕДЕНИЕ

«Справочник по физике» ставит своей целью дать студентам высших технических учебных заведений, преподавателям вузов, техникумов и средних школ краткое пособие, охватывающее все основные разделы современной физики: основы механики, молекулярной физики и термодинамики, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновую и квантовую оптику, элементы физики атомов, атомного ядра и элементарных частиц.

Учебное пособие подготовлено в соответствии с программой, связанной с переходом на многоуровневую систему подготовки специалистов и является результатом опыта чтения курса общей физики автором на протяжении 20 лет. Многолетний опыт чтения лекций по системе изложения, принятой в пособии, позволяет заключить, что избранный путь повышения уровня знаний будущих инженеров и специалистов в области физики дает положительные результаты.

Пособие не заменяет учебники, но является «путеводителем» по ним, что позволяет более рационально организовать изучение курса общей физики. Задача книги – помочь студентам освоить материал программы, научиться активно применять теоретические основы физики как рабочий аппарат, позволяющий решать конкретные задачи и приобрести уверенность в самостоятельной работе.

Материал пособия основан на содержании учебных пособий «Курс лекций по физике», электронные версии которых размещены на сайте научно технической библиотеки ТПУ <http://www.lib.tpu.ru>.

Для настоящего курса физики реализовано его мультимедийное сопровождение и создан электронный учебник, размещенный в электронном читальном зале НТБ ТПУ, в среде дистанционного обучения "MOODLE" <http://mdl.lcg.tpu.ru> и в корпоративной сети ТПУ **WEB СТ** <http://e-le.lcg.tpu.ru>. Наиболее полно материал курса изложен на персональном сайте <http://portal.tpu.ru/SHARED/s/SMIT>.

Авторы считают приятным долгом выразить свою благодарность коллективу кафедр физики ТПУ и АлтГТУ за помощь в составлении и оформлении учебного пособия.

Авторы с благодарностью примут все замечания и пожелания читателей, способствующие улучшению курса по адресам: smit@tpu.ru; krogozi@mail.ru.

1. МЕХАНИКА

1.1 Кинематика

Основные законы механики установлены итальянским физиком и астрономом Г. Галилеем и окончательно сформулированы английским физиком И. Ньютоном.

Механика Галилея и Ньютона называется *классической*, т. к. она рассматривает движение макроскопических тел со скоростями, которые значительно меньше скорости света в вакууме. Движение тел со скоростями, близкими к скорости света, рассматривает *релятивистская механика*, другое её название – *специальная теория относительности*. Рассмотрением движения элементарных частиц занимается *квантовая механика*.

1.1.1. Механика (от греч. *mechanike* – орудие, сооружение) – часть физики, которая изучает закономерности механического движения и причины, вызывающие или изменяющие это движение.

1.1.2. Механическое движение – это изменение с течением времени взаимного расположения тел или их частей.

1.1.3. Кинематика (от греч. *kineta* – движение) – раздел механики, в котором изучаются геометрические свойства движения тел без учета их массы и действующих на них сил.

1.1.4. Материальная точка – это тело, размерами которого, при рассмотрении данной задачи, можно пренебречь.

1.1.5. Абсолютно твердым телом называют тело, деформацией которого можно пренебречь в условиях данной задачи (хотя абсолютно твердых тел в природе не существует).

1.1.6. Система отсчета – совокупность системы координат и часов, связанных с телом, относительно которого изучается движение. Для описания движения практически приходится связывать с телом отсчета *систему координат* (декартова, сферическая, и т. д.).

1.1.7. Положение материальной точки в пространстве задается с помощью **радиус-вектора** точки $\vec{r}$ (рис. 1.1):

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k},$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные векторы (орты); x, y, z – координаты точки.

1.1.8. Вектор перемещения $\Delta\vec{r}$ есть приращение $\vec{r}_1$ за время Δt (рис. 1.2):

$$\Delta\vec{r} = \Delta x\vec{i} + \Delta y\vec{j} + \Delta z\vec{k}.$$

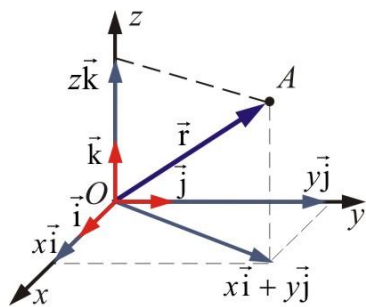


Рис. 1.1

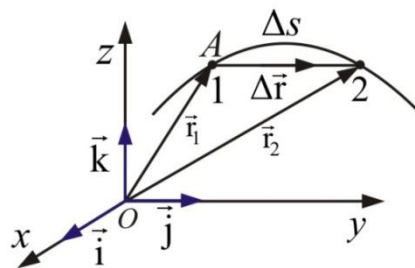


Рис. 1.2

1.1.9. Модуль вектора перемещения – это длина пройденного отрезка:

$$|\Delta \vec{r}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}.$$

Модуль перемещения совпадает с *пройденным путём* в том и только в том случае, если при движении направление перемещения не изменяется.

1.1.10. Скорость – векторная величина, характеризующая быстроту перемещения и направление движения материальной точки в пространстве относительно выбранной системы отсчёта.

- **Средняя скорость материальной точки** – это отношение вектора перемещения $\Delta \vec{r}$ ко времени Δt , за которое это перемещение произошло (рис.1.3):

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

- **Мгновенная скорость** $\vec{v}$ материальной точки – это вектор скорости в данный момент времени, равный первой производной от $\vec{r}$ по времени и направленный по касательной к траектории в данной точке в сторону движения (рис.1.3):

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k},$$

где $v_x = \frac{dx}{dt}$; $v_y = \frac{dy}{dt}$; $v_z = \frac{dz}{dt}$ – проекции скорости v на оси координат.

- **Модуль скорости:** $v = |\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}.$

1.1.11. Ускорение – векторная величина, показывающая, насколько изменяется вектор скорости точки (тела) при её движении за единицу времени.

- **Среднее ускорение материальной точки** – быстрота изменения скорости по времени и направлению (рис. 1.4).

$$\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

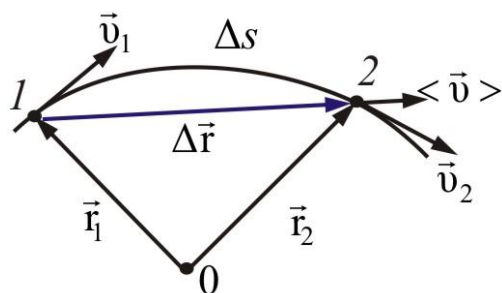


Рис.1.3

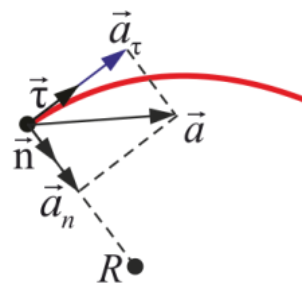


Рис.1.4

• **Мгновенное ускорение** (предел, к которому стремится среднее ускорение за бесконечно малый промежуток времени):

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad \text{или} \quad \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{i}a_x + \vec{j}a_y + \vec{k}a_z,$$

где $a_x = \frac{dv_x}{dt}$; $a_y = \frac{dv_y}{dt}$; $a_z = \frac{dv_z}{dt}$ – проекции вектора ускорения $\vec{a}$ на оси координат.

• **Модуль ускорения:** $|\vec{a}| = a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$.

1.1.12. Полное ускорение при криволинейном движении (рис.1.4):

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n; \quad a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}, \text{ где}$$

- $\vec{a}_\tau = \frac{dv}{dt} \vec{\tau}$ – **тангенциальная составляющая** ускорения;
- $|\vec{a}_n| = a_n = \frac{v^2}{r}$ – **нормальная составляющая** ускорения;
- r – **радиус кривизны** траектории в данной точке – радиус такой окружности, которая сливается с кривой в данной точке на бесконечно малом её участке.

1.1.13. Кинематическое уравнение прямолинейного равномерного движения вдоль оси x :

$$x = x_0 + vt.$$

1.1.14. . Путь s и скорость v для равнопеременного движения с начальной скоростью v_0 :

$$s = s_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2};$$

$$v = v_0 + at.$$

Кинематика вращательно движения

1.1.15. Угловая скорость – это вектор $\vec{\omega}$, численно равный первой производной от угла поворота по времени и направленный вдоль оси вращения в направлении $d\vec{\phi}$ (рис. 1.5). При этом $\vec{\omega}$ и $d\vec{\phi}$ всегда направлены в одну сторону:

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\phi}}{dt}.$$

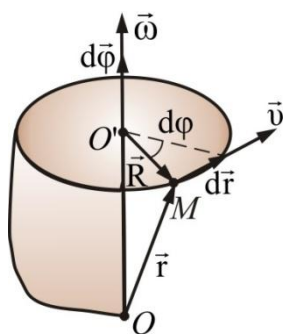


Рис. 1.5

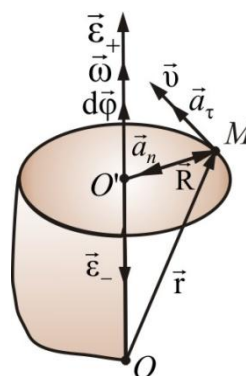


Рис. 1.6

1.1.16. Угловое ускорение – векторная величина, характеризующая быстроту изменения угловой скорости твердого тела (рис. 1.6):

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}.$$

Вектор углового ускорения направлен по оси вращения и совпадает с вектором угловой скорости при ускоренном вращении и противоположен ему при замедленном вращении.

1.1.17. Период вращения T – промежуток времени, в течении которого тело совершает полный оборот (т.е. поворот на угол $\phi = 2\pi$):

$$T = \frac{2\pi}{\omega},$$

где $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота вращения.

1.1.18. Частота ν – число оборотов тела за одну секунду:

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

1.1.19. Циклическая частота для равномерного вращательного движения:

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

1.1.20. Кинематическое уравнение равномерного вращения:

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t.$$

1.1.21. Угол поворота и угловая скорость для равнопеременного вращательного движения с начальной угловой скоростью ω_0 :

$$\varphi = \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2}; \quad \omega = \omega_0 \pm \varepsilon t.$$

1.1.22. Связь между линейными и угловыми величинами при вращательном движении:

$$\begin{aligned} s &= R\varphi; \quad v = R\omega; \\ \vec{a} &= \vec{a}_\tau + \vec{a}_n; \quad a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}; \\ a_n &= v^2/R = \omega^2 R; \\ a_\tau &= R \cdot \varepsilon. \end{aligned}$$

Движение тела в поле тяжести земли

Для описания движения тела в поле тяжести Земли вводится идеализированная модель, основные допущения которой следующие:

- 1) Тело – материальная точка;
- 2) Движение рассматривается вблизи поверхности Земли, когда высота подъема тела мала по сравнению с радиусом Земли;
- 3) Сопротивление воздуха не учитывается.

Ускорение свободного падения обозначается g и направлено всегда к центру Земли. Вблизи поверхности Земли $g \approx 9.8 \text{ м/с}^2$.

Свободное падение тела

1.1.23. Свободное падение тел – все тела, независимо от их массы, в отсутствие сил сопротивления воздуха падают на землю (вблизи поверхности) с одинаковым ускорением, называемым ускорением свободного падения (рис. 1.7).

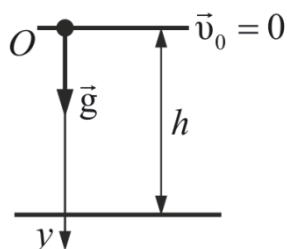


Рис. 1.7

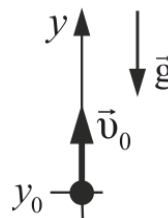


Рис. 1.8

1.1.24. Скорость v тела в момент времени t : $v = gt$.

1.1.25. Путь при свободном падении тела: $h = \frac{gt^2}{2}$.

Движение тела, брошенного вертикально вверх

1.1.26. Движение тела, брошенного вертикально вверх. Тело движется вертикально вверх с начальной скоростью $v(0)$ (рис. 1.8). На участке до наивысшей точки подъема является равнозамедленным, а после достижения точки подъема – свободным падением без начальной скорости (рис. 1.7).

1.1.27. Кинематическое уравнение проекции скорости:

$$v_y = v_0 - gt.$$

1.1.28. Кинематическое уравнение координаты: $y = y_0 + v_0 t - \frac{gt^2}{2}$.

1.1.29. Высота подъема тела, если начальная координата $y_0 = 0$:

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

1.1.30. Время подъема t_1 тела до наивысшей точки равно времени падения на прежний уровень: $t_1 = \frac{v_0}{g}$.

1.1.31. Максимальная высота подъема тела:

$$h_{\max} = \frac{gt_1^2}{2}, \quad h_{\max} = \frac{v_0^2}{2g}.$$

Движение тела, брошенного горизонтально, со скоростью v_0 .

1.1.32. Траекторией движения является парабола. Криволинейное движение по параболе обусловлено результатом сложения двух прямолинейных движений: равномерного движения по горизонтальной оси и свободного падения по вертикальной оси (рис. 1.9).

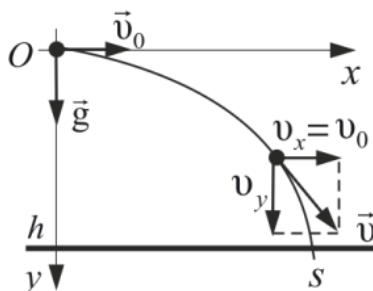


Рис. 1.9

Здесь v_0 – начальная скорость тела, v – скорость тела в момент времени t , s – дальность полета по горизонтали, h – высота над поверхностью земли, с которой тело брошено горизонтально с скоростью v_0 .

1.1.33. Кинематические уравнения проекции скорости:

$$v_x = v_0; \quad v_y = gt.$$

1.1.34. Кинематические уравнения координат:

$$h = \frac{gt_{\pi}^2}{2}; \quad x = v_0 t; \quad y = \frac{gt^2}{2};$$

1.1.35. Скорость тела в момент времени t :

$$v = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2}.$$

В момент t_{π} падения на землю $y = h$, $x = s$ (рис. 1.9).

1.1.36. Максимальная дальность полета по горизонтали:

$$s = v_0 t_{\pi}.$$

1.1.37. Высота над поверхностью земли, с которой тело брошено горизонтально:

$$h = \frac{gt_{\pi}^2}{2}.$$

Движение тела, брошенного под углом α к горизонту с начальной скоростью v_0

1.1.38. Траекторией является парабола (рис. 1.10). Криволинейное движение по параболе обусловлено результатом сложения двух прямолинейных движений: равномерного движения по горизонтальной оси и равнопеременного движения по вертикальной оси.

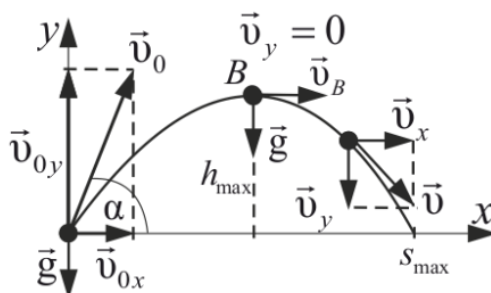


Рис. 1.10

(v_0 – начальная скорость тела, v_x , v_y – проекции скорости v на оси координат в момент времени t , τ – время полета тела, $h_{\max}$ – максимальная высота подъема тела, $s_{\max}$ – максимальная дальность полета тела по горизонтали).

1.1.39. Кинематические уравнения проекции вектора скорости:

$$v_x = v_0 \cdot \cos \alpha; \quad v_y = v_0 \cdot \sin \alpha - gt.$$

1.1.40. Кинематические уравнения координат:

$$x = v_0 t \cdot \cos \alpha; \quad y = v_0 t \cdot \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}.$$

1.1.41. Высота подъема тела до верхней точки траектории:

$$t_1 = \frac{v_{0y}}{g} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}.$$

В момент времени $t = t_1$, $y = h_{\max}$ (рис 1.11).

1.1.42. Максимальная высота подъема тела: $h_{\max} = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha}{2g}.$ **1.1.43. Время полета тела:** $\tau = 2t_1 = \frac{2v_0 \cdot \sin \alpha}{g}.$

В момент времени $t = \tau$, $s = s_{\max}$ (рис. 1.11).

1.1.44. Максимальная дальность полета тела по горизонтали:

$$s_{\max} = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha}{g}.$$

1.2. Основные уравнения классической динамики

Динамика (от греч. *dynamis* – сила) – раздел механики, посвященный изучению движения материальных тел под действием приложенных к ним сил. В основе классической динамики лежат **законы Ньютона**. Из них получаются все уравнения и теоремы, необходимые для решения задач динамики.

1.2.1. Инерциальная система отчета – это система отсчета, в которой тело находится в покое или движется равномерно и прямолинейно.

1.2.2. Сила – это результат взаимодействия тела с окружающей средой. Одно из простейших определений силы: влияние одного тела (или поля), вызывающее ускорение. В настоящее время различают четыре типа сил или взаимодействий:

- **гравитационные** (проявляются в виде сил всемирного тяготения);
- **электромагнитные** (существование атомов, молекул и макротел);
- **сильные** (ответственны за связь частиц в ядрах);
- **слабые** (ответственны за распад частиц).

1.2.3. Принцип суперпозиции сил: если на материальную точку действует несколько сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2 \dots \vec{F}_n$, то результирующую силу можно найти по правилу сложения векторов:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i.$$

1.2.4. Масса тела – мера инертности тела. Всякое тело оказывает сопротивление при попытках привести его в движение или изменить модуль или направление его скорости. Это свойство называется **инертность**.

1.2.5. Импульс $\vec{p}$ (количество движения) – это произведение массы m тела на его скорость $\vec{v}$:

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

1.2.6. Первый закон Ньютона: Всякая материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит её (его) изменить это состояние.

1.2.7. Второй закон Ньютона (основное уравнение динамики материальной точки): скорость изменения импульса тела равна действующей на него силе (рис. 1.11):

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} \quad \text{или} \quad m\vec{a} = \vec{F}.$$

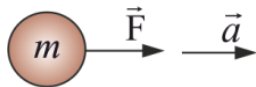


Рис. 1.11

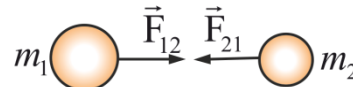


Рис. 1.12

Это же уравнение в проекциях на касательную и нормаль к траектории точки:

$$m\vec{a}_\tau = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_\tau \quad \text{и} \quad m\vec{a}_n = \frac{mv^2}{R} = m\omega^2 R = \vec{F}_n.$$

1.2.8. Третий закон Ньютона: силы, с которыми действуют друг на друга два тела, равны по величине и противоположны по направлению (рис. 1.12):

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

1.2.9. Закон сохранения импульса для замкнутой системы: импульс замкнутой системы не изменяется во времени (рис. 1.13):

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = \text{const},$$

где n – число материальных точек (или тел), входящих в систему.

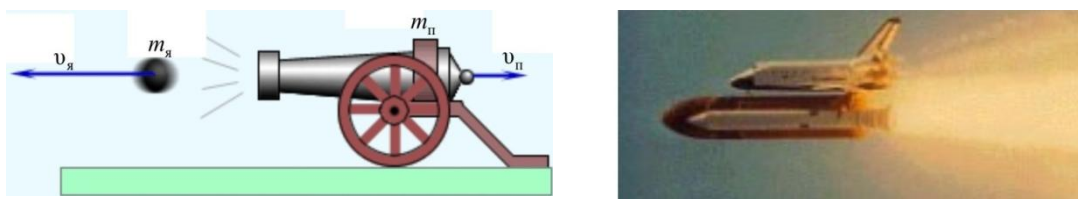


Рис. 1.13

Закон сохранения импульса не является следствием законов Ньютона, а является *фундаментальным законом природы*, не знающим исключений, и является следствием однородности пространства.

1.2.10. Основное уравнение динамики поступательного движения системы тел:

$$\vec{F} = m\vec{a}_C,$$

где $\vec{a}_C$ – ускорение центра инерции системы; $m = \sum_{i=1}^n m_i$ – общая масса системы из n материальных точек.

1.2.11. Центр масс системы материальных точек (рис. 1.14, 1.15):

$$\vec{r}_C = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \vec{r}_i m_i.$$

Закон движения центра масс: центр масс системы движется, как материальная точка, масса которой равна массе всей системы и на которую действует сила, равная векторной сумме всех сил, действующих на систему.

1.2.12. Импульс системы тел:

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

где $\vec{v}_C = \frac{d\vec{r}_C}{dt}$ – скорость центра инерции системы.

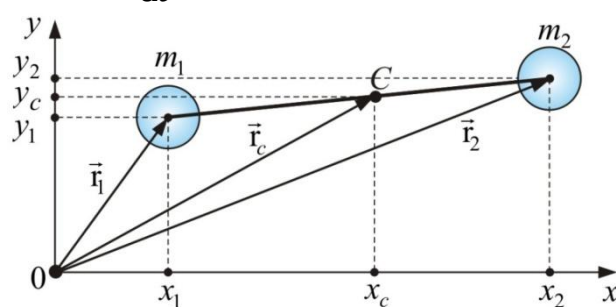


Рис. 1.14

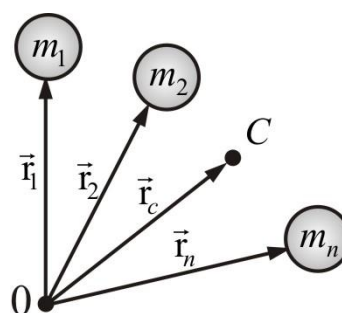


Рис. 1.15

1.2.13. Теорема о движении центра масс: если система находится во внешнем стационарном однородном поле сил, то *никакими действиями внутри системы невозможно изменить движение центра масс системы*:

$$\vec{a}_C = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \vec{F}_{i \text{ внеш.}}$$

1.3. Силы в механике

1.3.1. Связь веса тела $\vec{P}$ с силой тяжести и реакцией опоры $\vec{R}$:

$$\vec{P} = m\vec{g} = -\vec{R},$$

$\vec{g}$ – ускорение свободного падения (рис. 1.16).

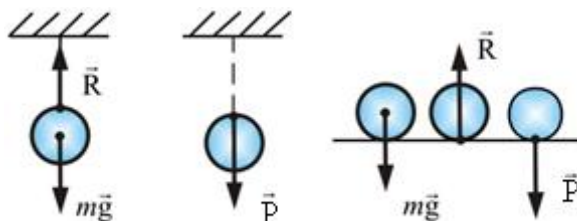


Рис. 1.16

Невесомость – состояние, при котором вес тела равен нулю. В гравитационном поле невесомость возникает при движении тела только под действием силы тяжести. Если $a = g$, то $P = 0$.

1.3.2. Соотношение между весом, силой тяжести и ускорением:

$$P = m(g \pm a).$$

1.3.3. Сила трения скольжения (рис. 1.17):

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где μ – коэффициент трения скольжения; N – сила нормального давления.

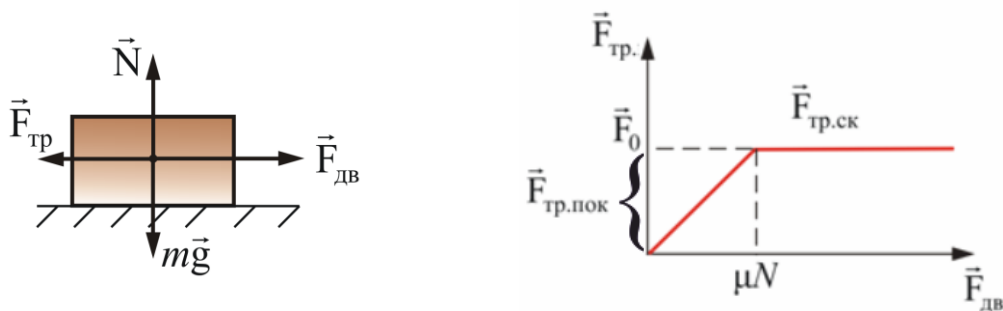


Рис. 1.17

1.3.4. Сила трения качения (рис. 1.18):

$$F_{\text{тр}} = \frac{\mu_k N}{r},$$

где μ_k – коэффициент трения качения; r – радиус катящегося тела.

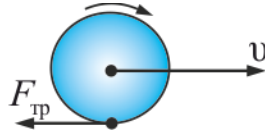


Рис. 1.18

1.3.5. Основные соотношения для тела на наклонной плоскости (рис. 1.19).:

- *сила трения:* $F_{\text{тр}} = \mu mg \cos \alpha$;
- *равнодействующая сила:* $F = mg \sin \alpha$;
- *скатывающая сила:* $F_{\text{ск}} = ma = F - F_{\text{тр}}$;
- *ускорение:* $a = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)$.

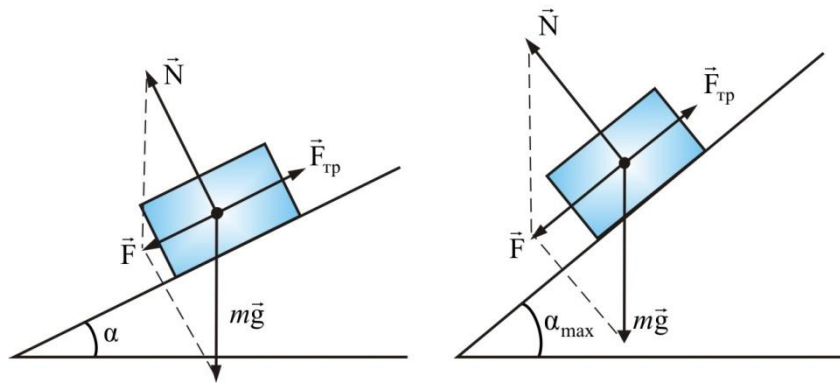


Рис. 1.19

1.3.6. Закон Гука для пружины: удлинение пружины x пропорционально силе упругости или внешней силе:

$$F_{\text{упр}} = -kx,$$

где k – жесткость пружины.

1.3.7. Работа, совершённая пружиной:

$$A = -\frac{kx^2}{2}.$$

1.3.8. Напряжение – мера внутренних сил, возникающих в деформируемом теле под влиянием внешних воздействий (рис. 1.20):

$$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S},$$

где $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь поперечного сечения стержня, d – его диаметр, l_0 – первоначальная длина стержня, Δl – приращение длины стержня.

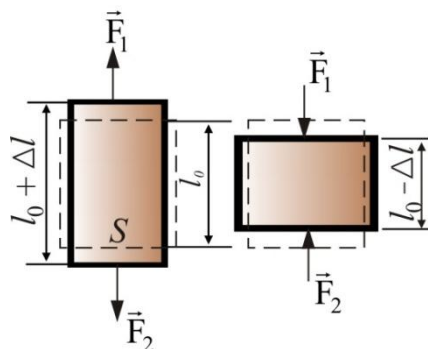


Рис. 1.20

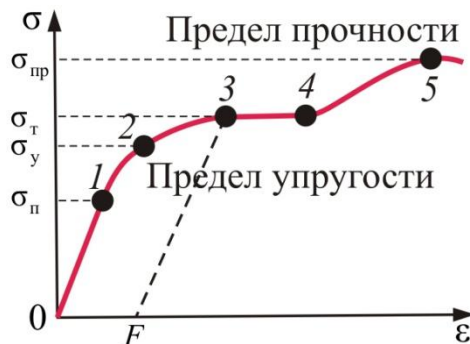


Рис. 1.21

1.3.9. Диаграмма деформации – график зависимости нормального напряжения $\sigma = F/S$ от относительного удлинения $\varepsilon = \Delta l/l$ при растяжении тела (рис. 1.21).

1.3.10. Модуль Юнга – величина, характеризующая упругие свойства материала стержня:

$$E = \frac{Fl_0}{S\Delta l}.$$

1.3.11. Приращение длины стержня Δl пропорционально напряжению:

$$\Delta l = \frac{l_0 \sigma}{E}.$$

1.3.12. Относительное продольное растяжение (сжатие):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\sigma}{E}.$$

1.3.13. Относительное поперечное растяжение (сжатие):

$$\varepsilon' = \frac{\Delta d}{d_0},$$

где d_0 – начальный поперечный размер стержня.

1.3.14. Коэффициент Пуассона – отношение относительного поперечного растяжения стержня $\Delta d/d_0$ к относительному продольному растяжению $\Delta l/l_0$:

$$\mu = \varepsilon'/\varepsilon.$$

1.3.15. Закон Гука для стержня: относительное приращение длины стержня прямо пропорционально напряжению и обратно пропорционально модулю Юнга:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma.$$

1.3.16. Объемная плотность потенциальной энергии:

$$w_0 = \frac{\sigma^2}{2E}.$$

1.3.17. Относительный сдвиг (рис 1.22, 1.23):

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x} = \frac{\tau}{G},$$

где Δx – абсолютный сдвиг.

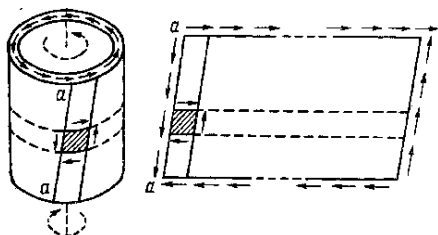


Рис. 1.22

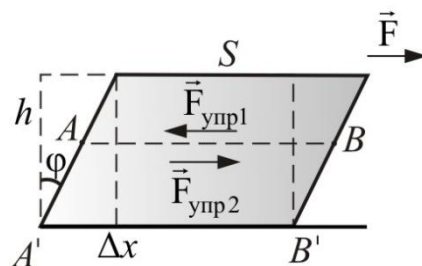


Рис. 1.23

1.3.18. Модуль сдвига G – величина, зависящая от свойств материала и равная такому тангенциальному напряжению, при котором $\gamma = \operatorname{tg} \varphi = 1$, а $\varphi = 45^\circ$ (если бы столь огромные упругие силы были возможны).

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}.$$

1.3.19. Тангенциальное упругое напряжение:

$$\tau = \frac{F_{\text{упр}}}{S}.$$

1.3.20. Закон Гука для сдвига:

$$\Delta x = \frac{Fh}{GS} \quad \text{или} \quad \tau = G\gamma.$$

1.3.21. Удельная потенциальная энергия тела при сдвиге:

$$w_s = \frac{\tau^2}{2G}.$$

1.4. Неинерциальные системы отсчета

Неинерциальная система отсчёта – произвольная система отсчёта, не являющаяся инерциальной. Примеры неинерциальных систем: система, движущаяся прямолинейно с постоянным ускорением, а также вращающаяся система.

Силы инерции обусловлены не взаимодействием тел, а свойствами самих неинерциальных систем отсчета. На силы инерции законы Ньютона не распространяются. Силы инерции инвариантны относительно перехода из одной системы отсчета в другую.

В неинерциальной системе также можно воспользоваться законами Ньютона, если ввести силы инерции. Они фиктивны. Их вводят специально, чтобы воспользоваться уравнениями Ньютона.

1.4.1. Уравнение Ньютона для неинерциальной системы отсчета

$$m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{\text{ин}},$$

где $\vec{a}'$ – ускорение тела массы m относительно неинерциальной системы; $\vec{F}_{\text{ин}}$ – сила инерции – фиктивная сила, обусловленная свойствами системы отсчета.

1.4.2. Центробежная сила – сила инерции второго рода, приложенная к вращающемуся телу и направленная по радиусу к центру вращения (рис. 1.24):

$$F_{\text{цб}} = ma_{\text{цб}} = m \frac{v^2}{R},$$

где $a_{\text{цб}}$ – центробежное ускорение.

1.4.3. Центробежная сила – сила инерции первого рода, приложенная к связи и направленная по радиусу от центра вращения (рис. 1.24, 1.25):

$$F_{\text{цб}} = ma_n = m\omega^2 R,$$

где a_n – центростремительное ускорение.

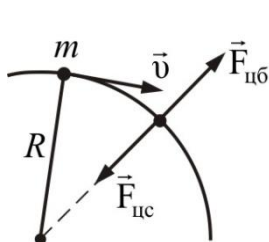


Рис. 1.24

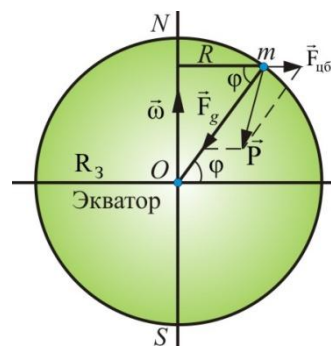
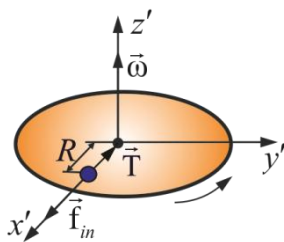


Рис. 1.25

1.4.4. Зависимость ускорения свободного падения g от широты местности ϕ приведена на рис. 1.25.

Сила тяжести есть результат сложения двух сил: $\vec{F}_g$ и $\vec{F}_{\text{цб}}$; таким образом, g (а значит и mg) *зависит от широты местности*:

$$\vec{P} = m\vec{g} = \vec{F}_g + \vec{F}_{\text{цб}},$$

где $F_{цб} = m\omega^2 R = m\omega^2 R_3 \cos\varphi$, ω – угловая скорость вращения Земли.

1.4.5. Сила Кориолиса – одна из сил инерции, существующая в неинерциальной системе отсчёта из-за вращения и законов инерции, проявляющаяся при движении в направлении под углом к оси вращения (рис. 1.26, 1.27).

$$\vec{F}_k = 2m[\vec{v}, \vec{\omega}],$$

где $\vec{\omega}$ – угловая скорость вращения.

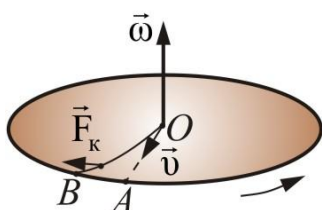


Рис. 1.26

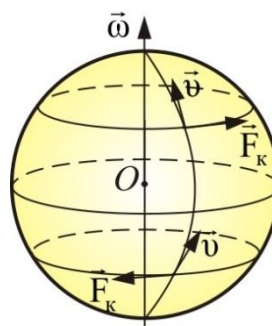


Рис. 1.27

1.4.6. Уравнение Ньютона для неинерциальных систем отсчета с учетом всех сил примет вид

$$m\vec{a}' = \vec{F}_{ин} + \vec{F}_{цб} + \vec{F}_k,$$

где $\vec{F}_{ин} = -m\vec{a}$ – сила инерции, обусловленная поступательным движением неинерциальной системы отсчета; $\vec{F}_{цб} = m\vec{a}_n$ и $\vec{F}_k = 2m[\vec{v}, \vec{\omega}]$ – две силы инерции, обусловленные вращательным движением системы отсчета; $\vec{a}'$ – ускорение тела относительно неинерциальной системы отсчета.

1.5. Энергия. Работа. Мощность. Законы сохранения

1.5.1. Энергия – универсальная мера различных форм движения и взаимодействия всех видов материи.

1.5.2. Кинетическая энергия – функция состояния системы, определяемая только скоростью её движения:

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

Кинетическая энергия тела – скалярная физическая величина, равная половине произведения массы m тела на квадрат его скорости.

1.5.3. Теорема об изменении кинетической энергии. Работа равнодействующих сил, приложенная к телу, равна изменению кинетической энергии тела, или, другими словами, *изменение кинетической энергии тела равно работе A всех сил, действующих на тело.*

$$\Delta E_k = A.$$

1.5.4. Связь кинетической энергии с импульсом:

$$E_k = \frac{p^2}{2m}.$$

1.5.5. Работа силы – количественная характеристика процесса обмена энергией между взаимодействующими телами. Работа в механике $A = \vec{F}\vec{l} = Fl \cos \beta$.

1.5.6. Работа постоянной силы:

Если тело движется прямолинейно и на него воздействует постоянная сила F , которая составляет некоторый угол α с направлением перемещения (рис. 1.28), то работа этой силы определяется по формуле:

$$A = F \Delta r \cdot \cos \beta,$$

где F – модуль силы, Δr – модуль перемещения точки приложения силы, β – угол между направлением силы и перемещения.

Если $\beta < \pi/2$, то работа силы положительна. Если $\beta > \pi/2$, то работа силы отрицательна. При $\beta = \pi/2$ (сила направлена перпендикулярно перемещению), то работа силы равна нулю.

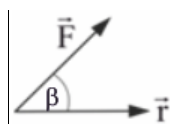


Рис. 1.28

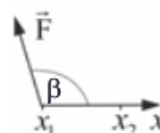


Рис. 1.29

Работа постоянной силы F при перемещении вдоль оси x на расстояние $\Delta x = x_2 - x_1$ (рис. 1.29) равна проекции силы $F_x = F \cos \beta$ на эту ось умноженной на перемещение Δx :

$$A = F \Delta x \cos \beta.$$

На рис. 1.27 показан случай, когда $A < 0$, т.к. $\beta > \pi/2$ – тупой угол.

1.5.7. Элементарной работой dA силы F на элементарном перемещении $d\vec{r}$ называется скалярная физическая величина, равная скалярному произведению силы на перемещение:

$$dA = (\vec{F}, d\vec{r}) = F dr \cos \beta.$$

1.5.8. Работа переменной силы на участке траектории 1 – 2 (рис. 1.30):

$$A = \int_1^2 F dr.$$

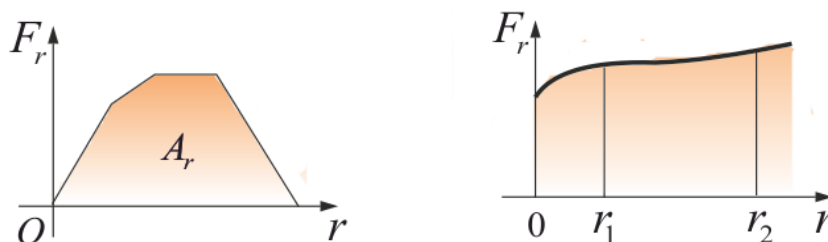


Рис. 1.30

1.5.9. Мгновенная мощность равна работе, совершаемой в единицу времени:

$$N = \frac{dA}{dt}.$$

$$N = \vec{F} \vec{v} = Fv \cos \beta.$$

1.5.10. Средняя мощность за промежуток времени Δt :

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

1.5.11. Потенциальная энергия тела в данной точке – скалярная физическая величина, *равная работе, совершаемой потенциальной силой при перемещении тела из этой точки в другую, принятую за нуль отсчета потенциальной энергии.*

Потенциальная энергия определяется с точностью до некоторой произвольной постоянной. Это не отражается на физических законах, так как в них входит или разность потенциальных энергий в двух положениях тела или производная потенциальной энергии по координатам. Поэтому потенциальную энергию в каком-то определенном положении считают равной нулю, а энергию тела отсчитывают относительно этого положения (нулевого уровня отсчета).

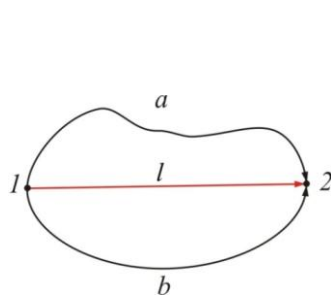
1.5.12. Принцип минимума потенциальной энергии. Любая замкнутая система стремится перейти в такое состояние, в котором ее потенциальная энергия минимальна.

1.5.13. Работа консервативных сил равна изменению потенциальной энергии

$$A = E_{n1} - E_{n2}.$$

1.5.14. Теорема о циркуляции вектора $\vec{F}$: если циркуляция какого-либо вектора силы равна нулю, то эта сила консервативна.

Работа консервативных сил вдоль замкнутого контура L равна нулю (рис. 1.31):



$$\oint_L F dr = 0.$$

$$\oint_L F dr = A_{12} + A_{21} = A_{12} - A_{12} = 0$$

Рис. 1.31

1.5.15. Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия между массами m и M (рис. 1.32):

$$E_{\text{п}} = -\gamma \frac{Mm}{r}.$$

1.5.16. Потенциальная энергия сжатой пружины (рис. 1.33):

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}.$$

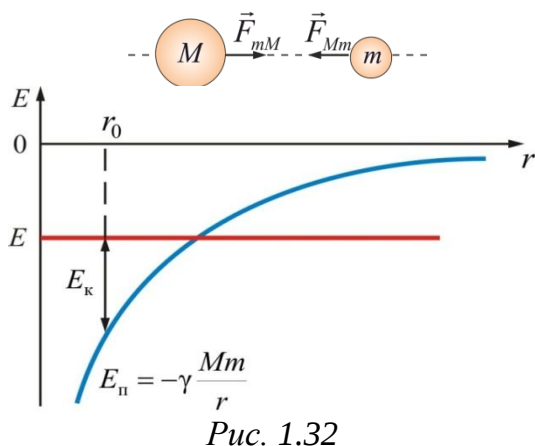


Рис. 1.32

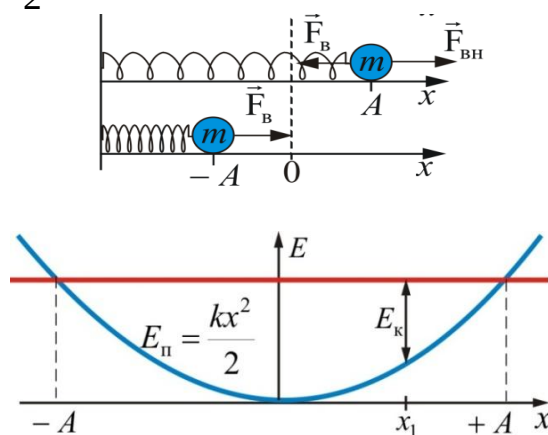


Рис. 1.33

1.5.17. Полная механическая энергия системы равна сумме кинетической и потенциально энергий:

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}}.$$

1.5.18. Потенциальная энергия тела на высоте h над землей

$$E_{\text{п}} = mgh.$$

1.5.19. Связь между потенциальной энергией и силой:

$$\vec{F} = -\frac{dE_{\text{п}}}{d\vec{r}} \quad \text{или} \quad F = -\left(\frac{\partial E_{\text{п}}}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial E_{\text{п}}}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial E_{\text{п}}}{\partial z} \vec{k} \right) \quad \text{или} \quad F = -\text{grad} E_{\text{п}}$$

1.5.20. Закон сохранения механической энергии (для замкнутой системы): полная механическая энергия консервативной системы материальных точек остается постоянной:

$$E_k + E_{\pi} = E = \text{const.}$$

1.5.21. Закон сохранения импульса для замкнутой системы тел:

$$\vec{p} = \sum_{i=1} m_i \vec{v}_i = \text{const}$$

1.5.22. Закон сохранения механической энергии и импульса при абсолютно упругом центральном ударе (рис. 1.34):

$$\begin{cases} \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2}, \\ m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2', \end{cases}$$

где m_1 и m_2 – массы тел; v_1 и v_2 – скорости тел до удара.

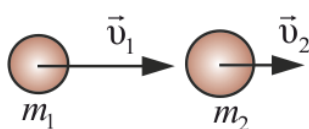


Рис. 1.34

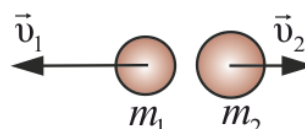


Рис. 1.35

1.5.23. Скорости тел после абсолютно упругого удара (рис. 1.35):

$$v_1' = \frac{2m_2 v_2 + (m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2}; \quad v_2' = \frac{2m_1 v_1 + (m_2 - m_1)v_2}{m_1 + m_2}.$$

1.5.24. Скорость движения тел после абсолютно неупругого центрального удара (рис. 1.36):

$$v = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

1.5.25. Закон сохранения импульса при движении ракеты (рис.1.37):

$$m_p v_p = m_r v_r,$$

где m_p и v_p – масса и скорость ракеты; m_r и v_r – масса и скорость выбрасываемых газов.

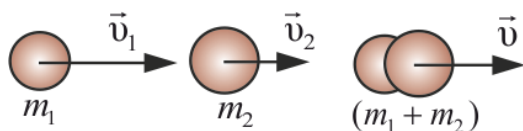


Рис. 1.36

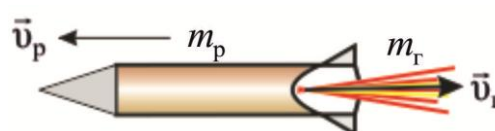


Рис. 1.37

1.5.26. Уравнение Мещерского для ракеты:

$$\vec{F}_p = \vec{v}_r \frac{dm}{dt}.$$

1.5.27. Формула Циолковского для определения скорости ракеты (характеристическая скорость):

$$v_p = -v_r \ln \frac{M_0}{M},$$

где M_0 и M – начальная и конечная массы ракеты.

1.6. Динамика вращательного движения твердого тела

Любое движение твердого тела сводится к поступательному (рис.1.38) и вращательному (рис.1.39). Это означает, что произвольное движение можно представить в виде суперпозиции поступательного движения тела, характеризуемого движением любой его точки (центра масс), и вращения тела вокруг этой точки, т.е. вокруг осей проходящих через неё.

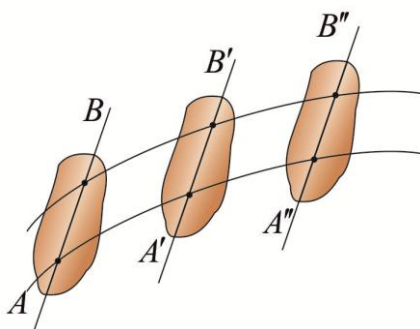


Рис. 1.38

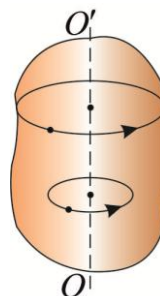


Рис. 1.39

1.6.1. Момент силы относительно неподвижной точки (рис.1.40):

$$\vec{M}_i = [\vec{r}_i, \vec{F}_i] \text{ или } M = Fr \sin \alpha = Fl,$$

где r – радиус-вектор, проведенный из этой точки в точку приложения силы $\vec{F}$; l – плечо силы F .

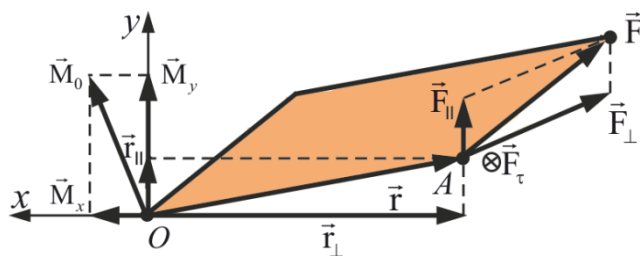
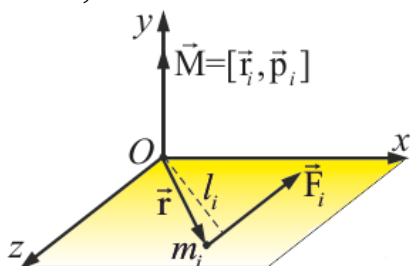


Рис. 1.40

1.6.2. Момент импульса относительно неподвижной точки (рис.1.41):

$$\vec{L} = [\vec{r}, \vec{p}] = [\vec{r}, m\vec{v}],$$

где $\vec{p} = m\vec{v}$ – импульс тела.

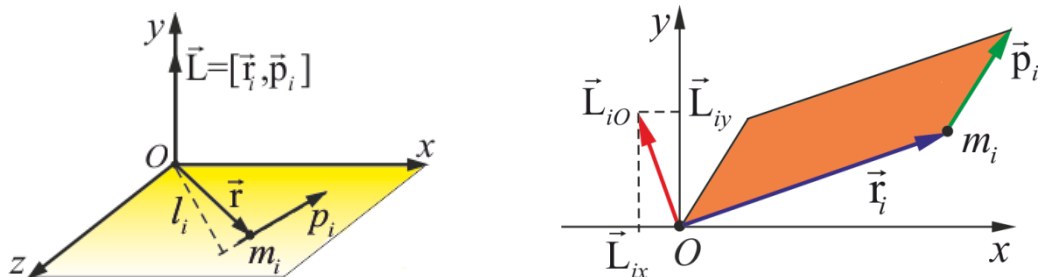


Рис. 1.41

1.6.3. Основной закон динамики вращательного движения относительно точки (уравнение моментов):

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}.$$

1.6.4. Момент инерции точки, находящейся на расстоянии R_i от оси вращения:

$$I_i = m_i R_i^2.$$

Момент инерции тела, состоящего из N точек:

$$I_i = \sum_{i=1}^N m_i R_i^2.$$

1.6.5. Момент импульса (момент количества движения) твердого тела относительно оси вращения (рис. 1.42, 1.43):

$$L = I\omega,$$

где ω – угловая скорость вращения тела.

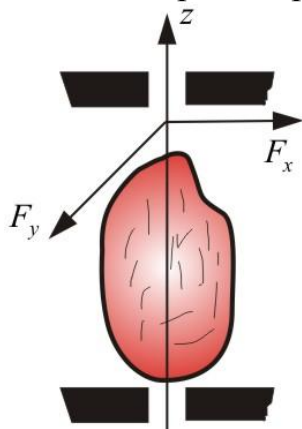


Рис. 1.42

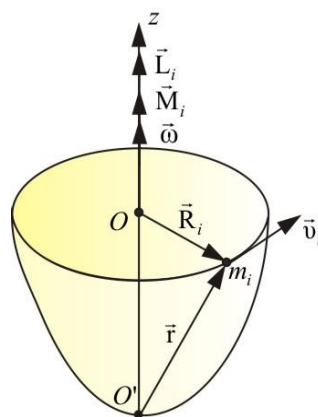


Рис. 1. 43

1.6.6. Уравнение динамики вращательного движения твердого тела:

$$M = I\varepsilon.$$

1.6.7. Закон сохранения момента импульса: момент импульса замкнутой системы тел относительно любой неподвижной точки не изменяется с течением времени:

$$\vec{L} = \text{const} \quad \text{или} \quad I\vec{\omega} = \text{const}.$$

1.6.8. Гироскоп – быстро вращающееся тело, имеющее три степени свободы (рис. 1.44).

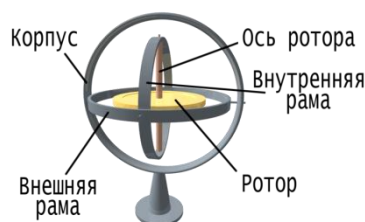


Рис. 1.44

Гироскоп (или волчок) – массивное симметричное тело, вращающееся с большой скоростью вокруг оси симметрии (рис. 1.44). Эту ось будем называть осью гироскопа. Она может изменять свое положение в пространстве (свободная ось). (Без вращения волчок падает, а когда вращается, то нет; здесь выполняется закон сохранения момента импульса: $\vec{L} = \text{const}$). Используется гироскоп в различных навигационных устройствах кораблей, самолетов, ракет (гирокомпас, гирогоризонт).

1.6.9. Момент инерции системы (тела):

$$I = \sum_{i=1}^n m_i R_i^2,$$

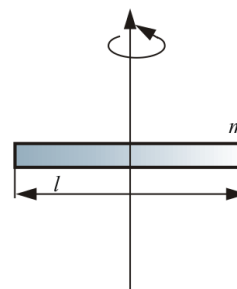
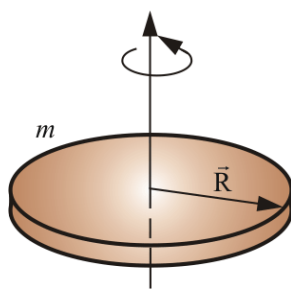
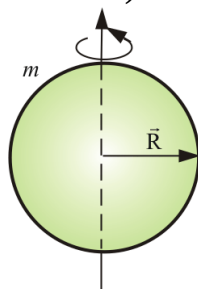
где R – расстояние материальной точки массой m_i до оси вращения.

Для сплошного однородного тела:

$$I = \int_0^m R^2 dm = \rho \int_0^V R^2 dV,$$

где ρ – плотность тела; V – объем тела.

1.6.10. Моменты инерции тел правильной геометрической формы (рис. 1.45):



Шар
 $k = \frac{2}{5}; \quad I_c = \frac{2}{5} mR^2$

Диск
 $k = \frac{1}{2}; \quad I_c = \frac{1}{2} mR^2$

Стержень
 $k = \frac{1}{12};$

Сфера $I_c = \frac{2}{3} mR^2$

Обруч $I_c = mR^2$

$I_c = \frac{1}{12} ml^2$

Рис. 1.45

1.6.11. Теорема Штейнера: момент инерции тела I относительно любой оси вращения равен моменту его инерции I_c относительно параллельной оси, проходящей через центр масс C тела, плюс произведение массы тела на квадрат расстояния между осями (рис. 1.46):

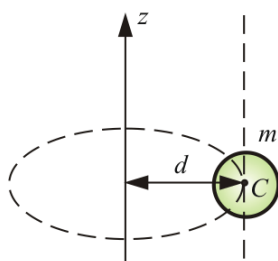


Рис. 1.46

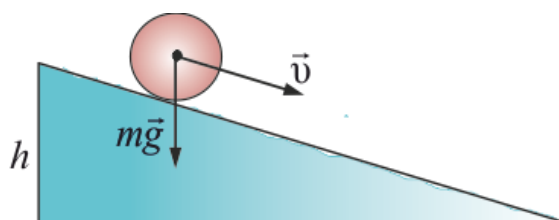


Рис. 1.47

$$I = I_c + md^2.$$

1.6.12. Кинетическая энергия тела, вращающегося с угловой скоростью ω вокруг неподвижной оси z :

$$E_{\text{к вращ.}} = \frac{I_z \omega^2}{2}.$$

1.6.13. Полная кинетическая энергия тела, катящегося по плоскости без скольжения:

$$E_{\text{к полн.}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}.$$

1.6.14. Закон сохранения энергии для тела катящегося с высоты h (рис. 1.47):

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}.$$

Сходство и различие линейных и угловых характеристик движения и связь между ними.

Поступательное движение	Вращательное движение
Кинематика	

Путь	$s = \int_0^t v dt$ $s = v_0 t + \frac{at^2}{2}$	Угол поворота	$\varphi = \int_0^t \omega dt$ $\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}$
Скорость	$v = \frac{ds}{dt}$ $v = v_0 + at$	Угловая скорость	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ $\omega = \omega_0 + \varepsilon t$
Ускорение	$a = \frac{dv}{dt}$	Угловое ускорение	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$
$s = R\varphi; v = R\omega; \vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n; a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}; a_n = v^2/R = \omega^2 R; a_\tau = R \cdot \varepsilon$			
Динамика			
Основное уравнение динамики поступательного движения	$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$ $m\vec{a} = \vec{F}$	Основное уравнение динамики вращательного движения	$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}$ $J\vec{\varepsilon} = \vec{M}$
Импульс	$\vec{p} = m\vec{v}$	Момент импульса	$\vec{L} = J\vec{\omega}$
Закон сохранения импульса	$m\vec{v} = \text{const}$	Закон сохранения момента импульса	$J\vec{\omega} = \text{const}$
Работа	$A = Fs$	Работа вращения	$A = M\varphi$
Мощность	$N = Fv$	Мощность	$N = M\omega$
Кинетическая энергия	$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{P^2}{2m}$	Кинетическая энергия вращ. тела	$E_k = \frac{J\omega^2}{2} = \frac{L^2}{2J}$

1.7. Теория тяготения Ньютона

Все тела в природе взаимно притягивают друг друга. Это взаимодействие называется гравитационным и является одним из фундаментальных взаимодействий в природе. Мы знаем о нем очень мало, гораздо меньше, чем, например, об электромагнитном взаимодействии. Тем не менее, на уровне механики мы можем описать гравитацию.

1.7.1. Закон всемирного тяготения: сила, с которой два тела притягиваются друг к другу, пропорциональна произведению масс этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними (рис.1.48):

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \text{ или } \vec{F} = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r},$$

где γ – гравитационная постоянная, равная $6,673 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$; m_1 и m_2 – масса первого и второго тела; r – расстояние между телами.

1.7.2. Потенциальная энергия тела массы m , расположенного на расстоянии r от большего тела массы M (рис 1.48):

$$E_{\text{п}} = -\gamma \frac{Mm}{r}.$$

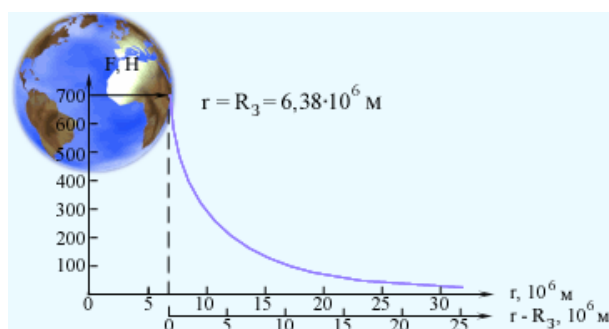
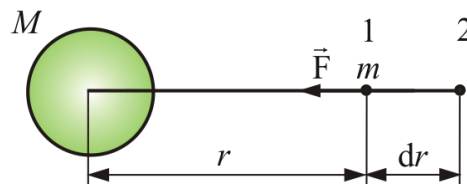


Рис. 1.48



1.7.3. Работа по перемещению тела массы m в гравитационном поле тела M (рис. 1.48):

$$A = m \left(\gamma \frac{M}{r_2} - \gamma \frac{M}{r_1} \right) = E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}}.$$

1.7.4. Вектор напряжённости поля тяготения численно равен силе действующей со стороны поля на материальную точку единичной массы и совпадает с этой силой по направлению (рис. 1.49).

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

Зависимость напряженности от расстояния показано на рис. 1.50.

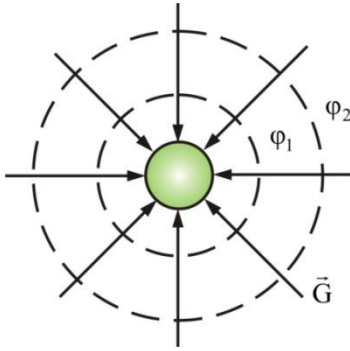


Рис. 1.49

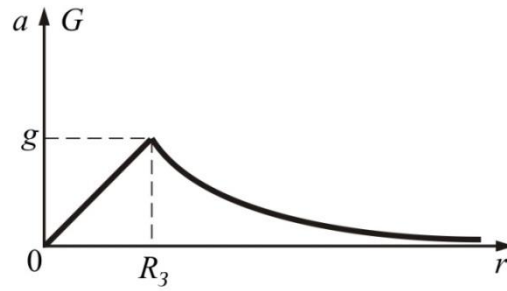


Рис. 1.50

1.7.5. Теорема о циркуляции векторов $\vec{F}$ и $\vec{G}$:

$$\oint_L \vec{F} d\vec{r} \equiv 0 \quad \text{и} \quad \oint_L \vec{G} d\vec{r} \equiv 0.$$

Работа консервативных сил, при перемещении тела вдоль замкнутого контура L тождественно равна 0.

1.7.6. Потенциал поля тяготения – величина, равная отношению потенциальной энергии $E_{\text{п}}$ материальной точки к массе m :

$$\varphi = \frac{E_{\text{п}}}{m} = -\gamma \frac{M}{R}.$$

На рисунке 1.49 показаны эквипотенциальные поверхности φ и линии напряженности $\vec{G}$.

1.7.7. Взаимосвязь между потенциалом поля тяготения и его напряжённостью:

$$\vec{G} = -\text{grad}\varphi.$$

1.7.8. Потенциальная энергия тела массой m на расстоянии r от Земли:

$$E_{\text{п}} - E_{\text{пз}} = mgR_3^2 \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{r} \right),$$

где $E_{\text{пз}}$ – потенциальная энергия гравитационного поля на поверхности Земли; R_3 – радиус Земли.

1.7.9. Полная энергия тела в гравитационном поле:

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \frac{mv^2}{2} - \gamma \frac{Mm}{r} = \text{const.}$$

1.8. Законы Кеплера

1.8.1. Первый закон Кеплера: Все планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которого находится Солнце (рис. 1.51).

1.8.2. Второй закон Кеплера: радиус вектор планеты описывает в равные промежутки времени равные площади (рис. 1.52):

$$\frac{dS}{dt} = \text{const.}$$

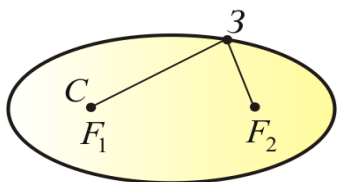


Рис. 1.51

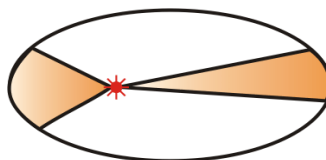


Рис. 1.52

1.8.3. Третий закон Кеплера: квадраты времен обращения планет относятся как кубы больших полуосей их орбит:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3}, \text{ или } T^2 \sim R^3$$

где T – период обращения; R – радиус орбиты.

1.8.4. Первая космическая скорость – это скорость движения тела по круговой орбите вблизи поверхности Земли (рис. 1.53):

$$v_1 = \sqrt{gR_3} = 7,9 \cdot 10^3 \text{ м/с.}$$

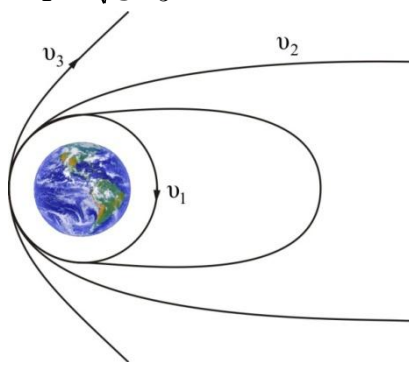


Рис. 1.53

1.8.5. Вторая космическая скорость – это минимальная скорость, которую нужно сообщить телу на поверхности Земли, чтобы оно, преодолев земное притяжение, стало искусственным спутником Солнца (рис. 1.54):

$$v_2 = \sqrt{2gR_3} = 11,2 \cdot 10^3 \text{ м/с.}$$

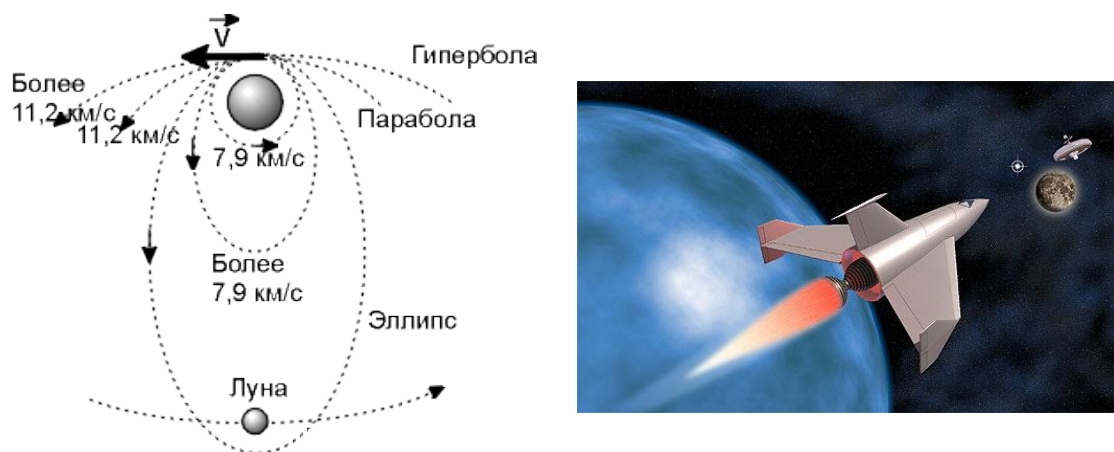


Рис. 1.54

1.8.6. Третьей космической скоростью называется скорость, при которой тело может покинуть пределы Солнечной системы, преодолев притяжение Солнца:

$$v_3 = 16,7 \cdot 10^3 \text{ м/с.}$$

1.9. Механика жидкостей и газов

1.9.1. Давление жидкости на дно и стенки сосуда:

$$P = \frac{F}{S},$$

где F – сила, действующая на поверхность S .

1.9.2. Уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости (рис. 1.55, 1.56):

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad \text{или} \quad Sv = \text{const.}$$

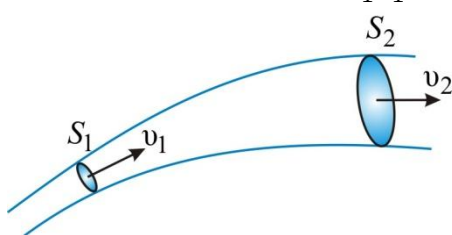


Рис. 1.55

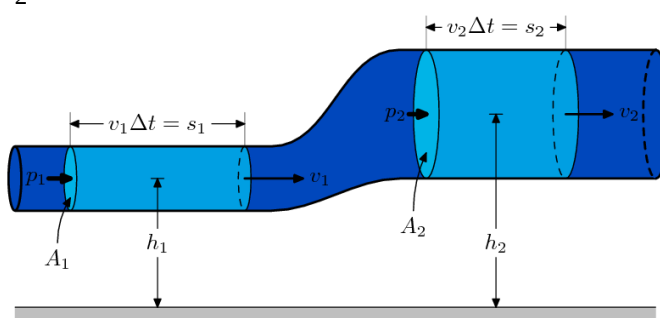


Рис. 1.56

1.9.3. Уравнение Бернулли:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + P = \text{const},$$

где ρ – плотность жидкости; h – высота, на которой расположено сечение; P – статическое давление жидкости для определенного сечения трубки тока.

В качестве примеров применения уравнения Бернулли можно привести установку для измерения скорости течения жидкости (рис. 1.57), или устройство для измерения скорости самолета – трубку Пито (рис. 1.58).

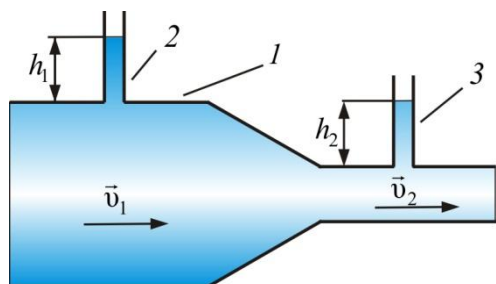


Рис. 1.57

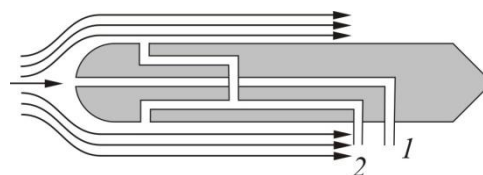


Рис. 1.58

1.9.4. Подъемная сила крыла самолета: профиль крыла самолета (рис. 1.59) имеет такую форму, что скорость обтекающего потока воздуха относительно крыла внизу меньше, а сверху больше: $v_2 > v_1$. Поэтому давление над крылом меньше, чем под крылом: $P_1 > P_2$. Это приводит к избыточной силе $\vec{F}$, которую можно разложить на две составляющие: подъемную силу $\vec{F}_n$ и силу сопротивления $\vec{R}$.

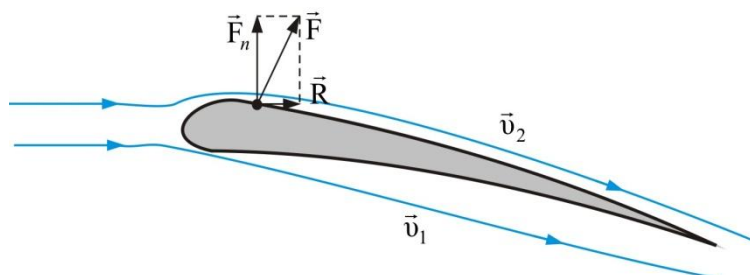


Рис. 1.59

1.9.5. Закон сообщающихся сосудов: в сообщающихся сосудах уровни однородных жидкостей, считая от наиболее близкой к поверхности земли точки (рис. 1.60), равны:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

1.9.6. Давление столба жидкости на глубине h :

$$P = P_0 + \rho gh.$$

В сообщающихся сосудах, заполненных разнородными жидкостями с плотностью ρ_1 и ρ_2 , давления жидкостей на одном уровне одинаковы (рис. 1.60):

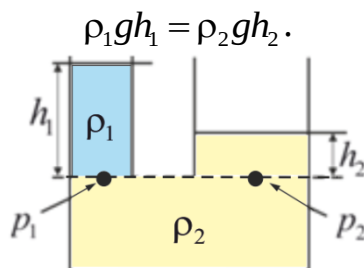


Рис. 1.60

1.9.7. Закон Архимеда: на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости:

$$F_A = \rho g V,$$

где F_A – выталкивающая сила; V – объем вытесненной жидкости.

1.9.8. Формула Торричелли, позволяющая определить скорость истечения жидкости из малого отверстия в открытом широком сосуде:

$$v = \sqrt{2gh},$$

где h – глубина, на которой находится отверстие относительно уровня жидкости в сосуде.

1.9.9. Формула Стокса, позволяющая определить силу сопротивления, действующую на медленно движущийся в вязкой среде шарик:

$$F = 6\pi\eta r v,$$

где r – радиус шарика; v – скорость шарика; η – коэффициент вязкости.

1.9.10. Формула Пуазейля, позволяющая определить объем жидкости, протекающий за время t через капиллярную трубку длиной l :

$$V = \pi R^4 \Delta P t / (8\eta l),$$

где R – радиус трубки; ΔP – разность давлений на концах трубки.

1.9.11. Поверхностное натяжение (рис. 1.61):

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad \text{или} \quad \sigma = \frac{\Delta E}{\Delta S},$$

где F – сила поверхностного натяжения, действующая на контур, ограничивающий поверхность жидкости; ΔE – поверхностная энергия, связанная с площадью ΔS поверхности пленки; l – длина контура, ограничивающего поверхностный слой жидкости.

1.9.12. Формула Лапласа, позволяющая определить избыточное давление для произвольной поверхности жидкости двоякой кривизны:

$$\Delta P = \sigma(1/R_1 + 1/R_2),$$

где R_1 и R_2 – радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных нормальных сечений поверхности жидкости; радиус кривизны положителен, если центр кривизны находится внутри жидкости (выпуклый мениск), и отрицателен (рис. 1.62), если центр кривизны вне жидкости (вогнутый мениск). Для сферической поверхности:

$$\Delta P = 2\sigma / R.$$

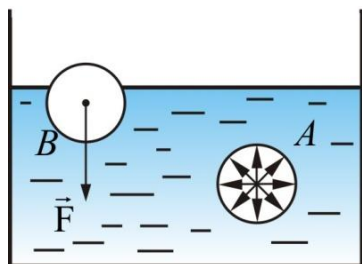


Рис. 1.61

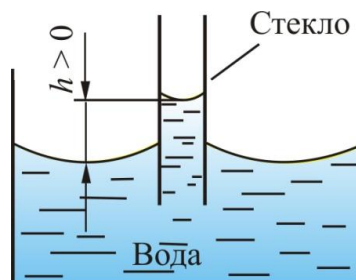


Рис. 1.62

1.9.13. Высота подъема жидкости в капиллярной трубке (рис.1.62):

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r},$$

где θ – краевой угол; r – радиус капилляра; ρ – плотность жидкости.

1.9.14. Насыщенный пар – пар, находящийся в термодинамическом равновесии со своей жидкостью. *Скорость преобразования пара равна скорости конденсации.*

Давление насыщенного пара при данной температуре – максимальное давление, которое может иметь пар над жидкостью при этой температуре.

Давление насыщенного пара не зависит от жидкости объема сосуда, в котором находится пар. При изотермическом уменьшении объема насыщенного пара, часть пара переходит в жидкость, давление насыщенного пара при этом не меняется.

1.9.15. Относительная влажность воздуха – процентное отношение плотности (парциального давления) водяного пара в воздухе к плотности (парциальному давлению) насыщенного пара при той же температуре: $\varphi = \rho / \rho(n) \cdot 100\%$ или $\varphi = p / p(n) \cdot 100\%$, где ρ , $\rho(n)$ – абсолютная влажность ненасыщенного и насыщенного водяного пара; p , $p(n)$ – парциальное давление ненасыщенного и насыщенного водяного пара соответственно.

1.9.16. Абсолютная влажность воздуха – величина, равная плотности ρ водяного пара в воздухе или равная парциальному давлению P водяного пара:

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ или } P = \frac{mRT}{\mu V},$$

где ρ – абсолютная влажность (плотность) водяного пара, m – масса водяного пара в объеме V , μ – молярная масса воды, P – парциальное давление водяного пара.

1.9.17. Точка росы – температура, при достижении которой ненасыщенный водяной пар становится насыщенным в результате изохорического охлаждения.

1.10. Специальная теория относительности

Г. Галилей установил, что во всех инерциальных системах отсчета законы классической динамики имеют одинаковую форму: в этом заключается суть механического принципа относительности. Противоречия между этим принципом и уравнениями электродинамики привело к отказу от преобразований Галилея и созданию *специальной теории относительности* (СТО), являющейся предметом этой главы.

1.10.1. Принцип относительности Галилея: Законы природы, определяющие изменение состояния движения механических систем, не зависят от того, к какой из двух инерциальных систем отсчета они относятся.

1.10.2. Преобразования Галилея (рис. 1.63):

$$x = x' + vt, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t' \quad \text{или} \quad \vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t.$$

1.10.3. Закон сложения скоростей в классической механике (рис. 1.64):

$$\vec{u} = \vec{v}' + \vec{v}$$

$$x, y, z, ct$$

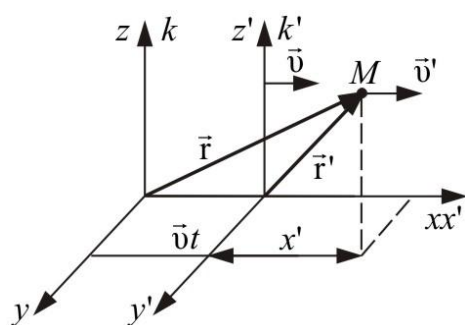


Рис. 1.63

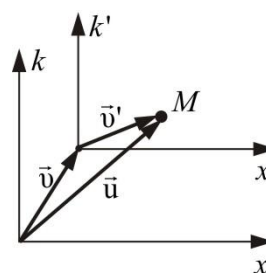


Рис. 1.64

1.10.4. Постулаты Эйнштейна:

- все законы природы одинаковы во всех инерциальных системах отсчета (принцип инвариантности систем отсчета);

- *скорость света в пустоте* (максимально возможная скорость) *одинакова во всех инерциальных системах отсчета и не зависит от скорости источника и приемника света.*

1.10.5. Событие в механике определяется координатами и временем, где и когда оно произошло. Событие изображается *мировой точкой* в четырехмерном пространстве, на осях которого откладываются x, y, z, ct . Для простоты будем считать, что $y = z = 0$ и в начальный момент событие произошло в мировой точке 0. (рис.) При изменении координат и времени мировая точка рисует *мировую линию* (рис. 1.65).

Абсолютно удаленные мировые точки не могут быть причинно связаны с событием 0, так как для попадания в них из 0 надо двигаться со скоростью, большей скорости света, что невозможно. Мировые точки, лежащие в конусах «абсолютное прошлое, будущее», могут быть причинно связаны с событием 0, являясь либо его причиной («абсолютное прошлое»), либо следствием («абсолютное будущее»).



Рис. 1.65

1.10.6. Интервал s_{12} — характеризует свойства пространства-времени — расстояние между двумя мировыми точками (событиями):

$$s_{12} = \sqrt{c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2}.$$

Если $s_{12}^2 \geq 0$, между событиями возможна причинная связь, а если $s_{12}^2 < 0$, — невозможна. Интервал имеет одинаковое значение (т.е. *инвариантен*) в любой инерциальной системе отсчета.

1.10.7. Преобразования Лоренца (предполагается, что система отсчета K' движется со скоростью v в положительном направлении оси x

системы отсчета K (рис. 1.63), причем оси x' и x совпадают, а оси y' и y и z' и z параллельны; c – скорость распространения света в вакууме):

$$x = \frac{x' + vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

$$y = y', \quad y' = y,$$

$$z = z', \quad z' = z,$$

$$t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

1.10.6. Следствия из преобразований Лоренца:

- *Интервал времени между событиями* (вспышки лампочек в точках A и B , как показано на рис. 1.66):

$$\Delta t' = \frac{v(x_1 - x_2)}{c^2 \sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

- *Лоренцево сокращение длины стержня* (рис. 1.67, 1.68):

$$l = l_0 \sqrt{1 - (v/c)^2},$$

где l_0 – собственная длина стержня; l – длина стержня, измеренная в системе отсчета, относительно которой он движется со скоростью v .

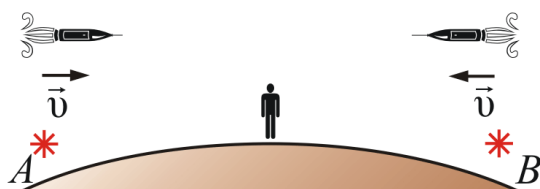


Рис 1.66

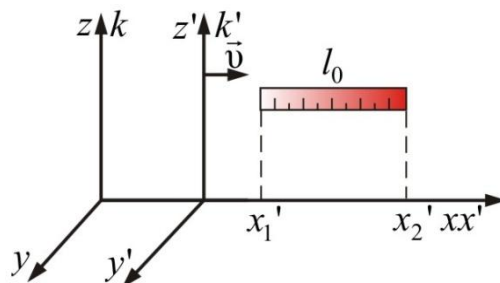


Рис 1.67

- *Релятивистское замедление времени:*

$$\Delta t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

где τ – собственное время; Δt – промежуток времени между двумя событиями, отсчитанный покоящимися часами (рис. 1.69).

Из этого уравнения следует, что **собственное время – минимально** (движущиеся часы идут медленнее покоящихся). Таким образом, вспышка на Земле будет казаться длиннее.

Это следствие из преобразований Лоренца объясняет известный «парадокс близнецов».

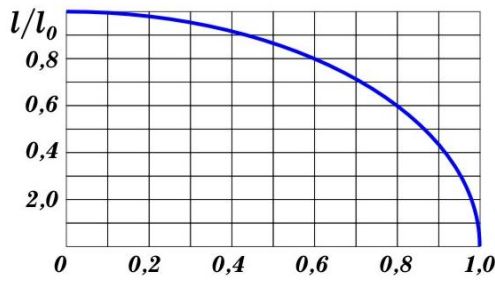


Рис 1.68

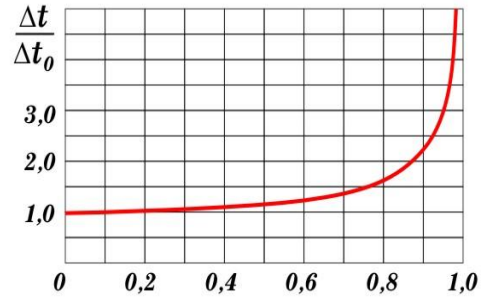


Рис 1.69

- Релятивистский закон сложения скоростей:

$$u = \frac{v' + v}{1 + v'v/c^2}.$$

1.10.7. Основной закон релятивистской динамики

$$F = \frac{dp}{dt}$$

где p – импульс частицы, t – время.

1.10.8. Масса релятивистской частицы:

$$m_r = \frac{m}{\sqrt{1 - (v/c)^2}},$$

где m – собственная масса (масса покоя), измеренная в той системе координат, где частица неподвижна.

При $v/c \ll 1$ различие между собственной m и релятивистской m_r массами несущественно.

1.10.9. Релятивистское выражение для импульса:

$$\vec{p} = m_r v = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad \text{или} \quad p = m_r v = \frac{vE}{c^2}.$$

При $v \rightarrow c$, $m_r \rightarrow \infty$ и $p \rightarrow \infty$, если $m \neq 0$ (рис. 1.70).

1.10.10. Полная энергия релятивистской частицы:

$$E = m_r c^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

При $v \rightarrow c$, $m_r \rightarrow \infty$ и $E \rightarrow \infty$ (рис. 1.71).

1.10.11. Кинетическая энергия релятивистской частицы:

$$E_k = E - E_0 = (m_r - m)c^2 \quad \text{или} \quad E_k = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right).$$

В пределе, когда $v/c \ll 1$, $E_k = \frac{mv^2}{2}$, как в классической физике (рис. 1.71).

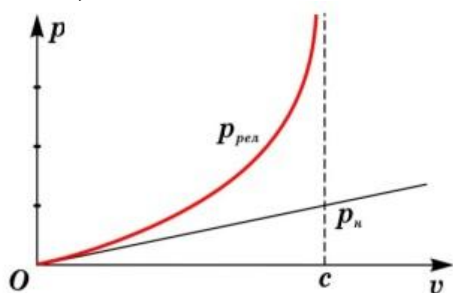


Рис 1.70

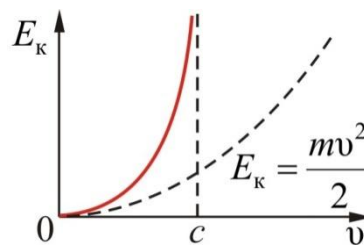


Рис 1.71

1.10.12. Связь между полной энергией и импульсом релятивистской частицы:

$$E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2} \text{ или } pc = \sqrt{E_k (E_k + 2mc^2)}.$$

1.10.13. Внутренняя энергия (энергия покоя) частицы пропорционально её массе:

$$E_0 = mc^2.$$

1.10.14. Взаимосвязь массы и энергии покоя:

$$\Delta E_0 = \Delta mc^2.$$

1.10.15. Масса образовавшейся частицы M больше суммы масс исходных частиц (рис. 1.72):

$$M = \frac{2m}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} > 2m.$$

1.10.16. Энергия связи – энергия, которую нужно затратить, чтобы разорвать связь между частицами и разнести их на расстояние, при котором взаимодействием частиц друг с другом можно пренебречь (рис. 1.73):

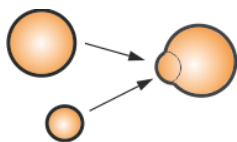


Рис. 1.72

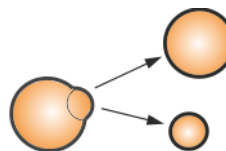


Рис. 1.73

$$E_{\text{св}} = c^2 \Delta M.$$

1.10.17. Дефект массы – разность между массой атома данного изотопа, и массовым числом, равным числу нуклонов в ядре данного изотопа.

$$\Delta M = \sum m_i - M.$$

1.10.18. Ядерным реактором называется устройство, в котором поддерживается управляемая реакция деления атомных ядер. Его основные элементы: ядерное топливо, замедлитель нейтронов, теплоноситель для отвода тепла и устройство для регулирования скорости реакции (рис. 1.74).

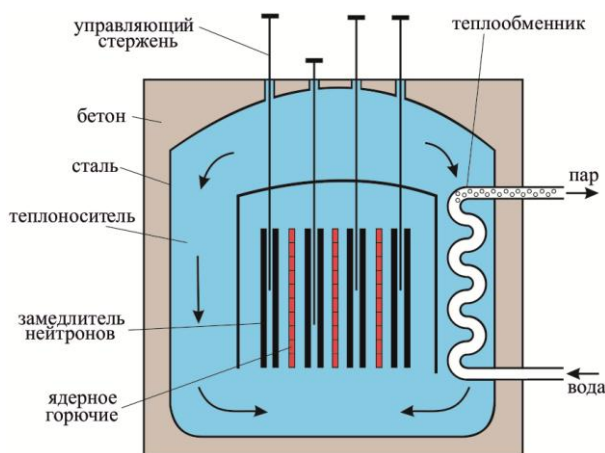


Рис. 1.74

1.10.19. Термоядерные реакции – это реакции синтеза легких ядер, протекающие при очень высоких температурах, необходимых для сообщения ядрам энергии, достаточной для сближения до расстояния, сравнимого с радиусом действия ядерных сил (10^{-15} м).

Термоядерная реакция синтеза дейтерия с тритием (рис. 1.75):

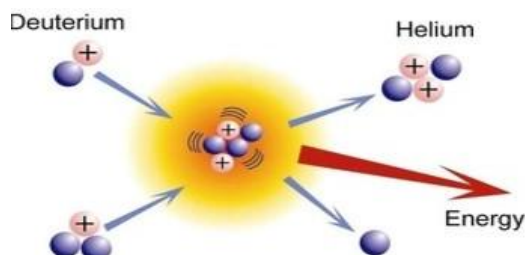
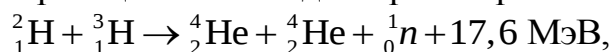
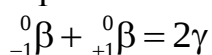


Рис. 1.75

1.10.20. Аннигиляция – реакция превращения частицы и античастицы при их столкновении в какие-либо иные частицы, отличные от исходных. При аннигиляции вся масса вещества и антивещества превращается в энергию.

Пример аннигиляции электрона и позитрона (рис. 1.75).



Треки частиц при аннигиляции антипротона на протоне (рис. 1.76).

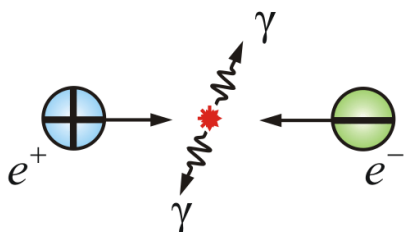


Рис 1.75



Рис 1.76

1.11. Основные положения общей теории относительности

Общая теория относительности (ОТО) – геометрическая теория тяготения, развивающая специальную теорию относительности (СТО), опубликованная А. Эйнштейном. В рамках общей теории относительности, как и в других теориях, постулируется, что гравитационные эффекты обусловлены не силовым взаимодействием тел и полей, находящихся в пространстве-времени, а деформацией самого пространства-времени, которая связана, в частности, с присутствием массы-энергии. Общая теория относительности отличается от других теорий тяготения использованием уравнений Эйнштейна для связи кривизны пространства-времени с присутствующей в нём материей.

1.11.1. Потенциальная энергия тела массы m в поле тяготения:

$$E_{\pi} = m\varphi.$$

1.11.2. Гравитационный потенциал:

$$\varphi = gx.$$

1.11.3. Слабое гравитационное поле – классическое гравитационное поле, для которого справедлив закон всемирного тяготения Ньютона:

$$\varphi \ll c^2.$$

1.11.4. Сильное гравитационное поле – описывается общей теорией относительности:

$$\varphi/c^2 \approx 1.$$

1.11.5. Уравнение движения тела в поле тяготения:

$$m_{in}\vec{a} = m_g\vec{g},$$

где $\vec{a}$ – ускорение, приобретаемое телом под действием поля тяготения; m_g – гравитационная масса; m_{in} – инертная масса.

1.11.6. Тожественность инерциальной и гравитационной масс:

$$m_{in} = m_g.$$

1.11.7. Принцип эквивалентности сил инерции и гравитационных сил:

$$F_{in} = F_g.$$

Согласно этому принципу, все физические процессы в истинном поле тяготения и в ускоренной системе отсчета, при отсутствии тяготения, протекают одинаковым образом.

1.11.8. Следствия из принципа эквивалентности:

- *Замедление времени* вблизи сильных гравитационных полей:

$$dt = dt_0 \left(1 + \frac{\Phi}{c^2} \right).$$

- *Изменение частоты света* в гравитационном поле:

$$\nu = \nu_0 \left(1 - \frac{\Phi}{c^2} \right),$$

где ν – частота света с точки зрения неподвижного наблюдателя; ν_0 – частота света в подвижной системе отсчета.

- *Условие существования черной дыры* (рис. 1.77):

$$\frac{mc^2}{2} \leq \gamma \frac{mM}{r_g},$$

где M – масса космического объекта.



Рис 1.77

- *Радиус Шварцшильда* – критический радиус черной дыры:

$$r_g \leq \gamma \frac{2M}{c^2}.$$

При этих условиях свет не сможет покинуть данный космический объект. Пространство внутри черных дыр сворачивается, время останавливается.

2. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.

2.1. Гармонические колебания

Колебанием называются процессы, отличающиеся той или иной степенью повторяемости во времени. Простейшим типом периодических колебаний являются так называемые **гармонические колебания**.

Простейшим примером периодического движения служат **колебания груза массой m на конце пружины** (рис. 2.1, а) или колебания маятника в поле тяжести Земли (рис. 2.1, б).

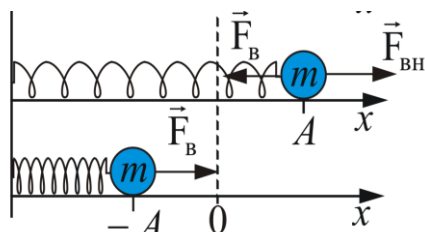


рис. 2.1, а

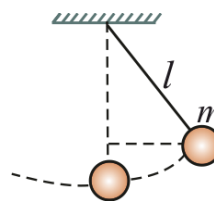


рис. 2.1, б

2.1.1 Возвращающая сила – сила возвращающая груз массой m в положение равновесия. Примером таких сил являются **упругие силы** или **квазиупругие силы**, удовлетворяющие уравнению:

$$F_x = -m\omega_0^2 x,$$

где ω_0 – циклическая частота колебаний; x – смещение колеблющейся величины от положения равновесия за время t .

Из этого уравнения следует, что сила F пропорциональна x и всегда направлена к положению равновесия. Силы, удовлетворяющие этому уравнению, называются **квазиупругими силами**.

$$F_x = -kx,$$

где k – коэффициент упругой силы.

2.1.2 Дифференциальное уравнение динамики гармонических колебаний материальной точки под действием упругих или квазиупругих сил:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = 0 \quad \text{или} \quad \frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0.$$

2.1.3 Уравнение гармонических колебаний:

$$x = A \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi) = A \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi'),$$

где A – амплитуда колебаний, φ – начальная фаза колебаний, $\varphi' = \varphi + \frac{\pi}{2}$.

2.1.4 Гармонические колебания в графическом виде (рис 2.2):

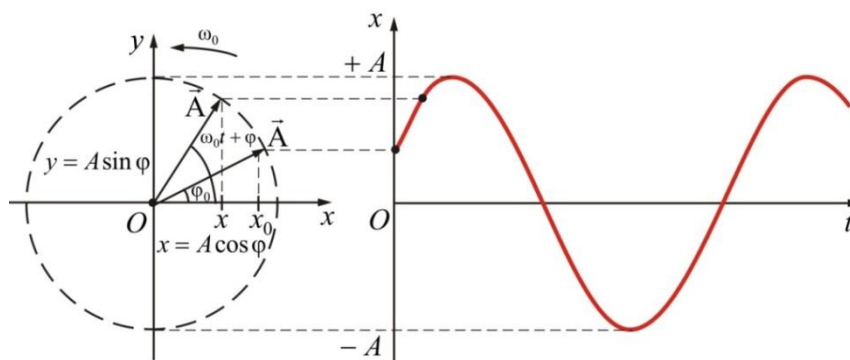


Рис. 2.2

2.1.5 Скорость колебаний:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = -\omega_0 A \sin(\omega_0 t + \varphi).$$

2.1.6 Ускорение колебаний:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = -\omega_0^2 A \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

Графики смещения скорости и ускорения гармонических колебаний приведены на рис. 2.3. Из графиков видно, что **скорость опережает смещение по фазе на $\pi/2$** , а **ускорение**, в свою очередь, **опережает скорость по фазе на $\pi/2$** .

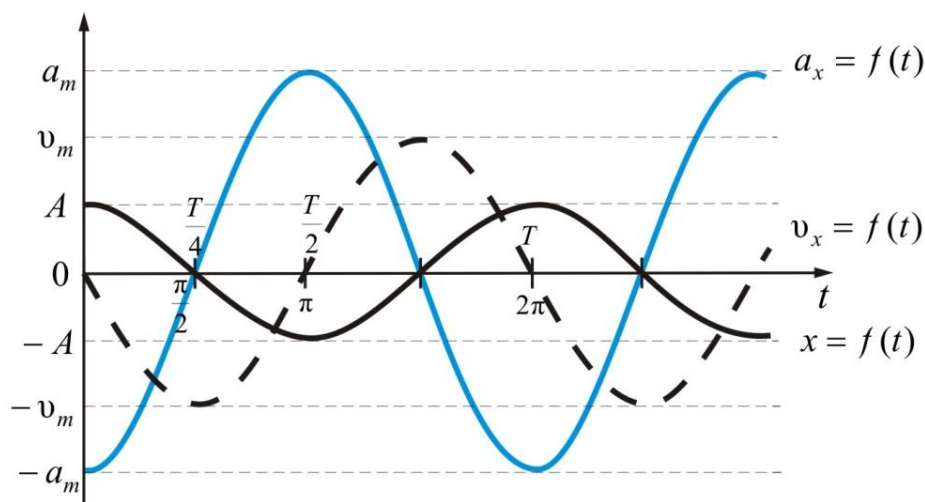


Рис. 2.3

2.1.7 Амплитуда скорости: $v_m = \omega_0 A$.

2.1.8 Амплитуда ускорения: $a_m = \omega_0^2 A$.

2.1.9 Частота колебаний – число последовательных колебаний в одну секунду:

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

2.1.10 Циклическая (круговая) частота колебаний – число полных колебаний за 2π секунд (для пружинного маятника рис. 2.1 а):

$$\omega_0 = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

2.1.11 Период колебаний – минимальный промежуток времени, по истечению которого повторяются значения всех физических величин, характеризующих колебания:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{1}{\nu} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

2.1.12 Потенциальная энергия $E_{\text{п}}$ тела, смещенного на расстояние x от положения равновесия, измеряется работой, которую производит возвращающая сила $F_x = -kx$, перемещая тело в положение равновесия (рис. 2.1).

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2} = \frac{1}{2}kA^2 \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

2.1.13 Кинетическая энергия – энергия тела массой m , движущегося со скоростью v :

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2}m\omega_0^2 A^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi).$$

2.1.14 Колебания грузов под действием силы тяжести (рис. 2.4). Запасенная потенциальная энергия переходит в кинетическую и наоборот, но их сумма в любой момент времени постоянна

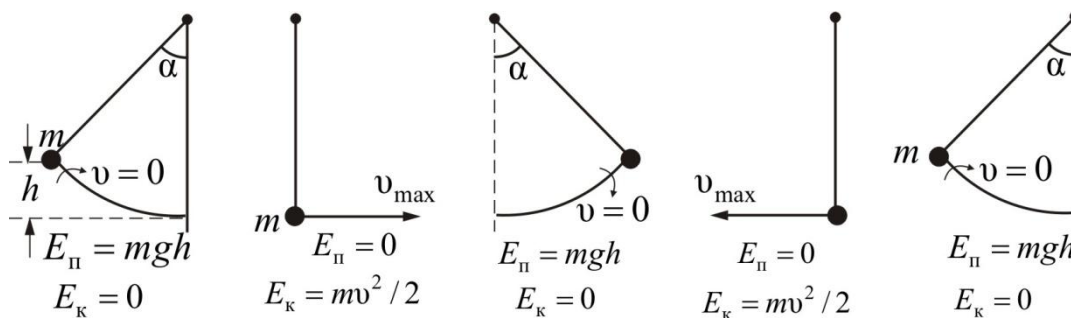


Рис. 2.4

2.1.15 Полная механическая энергия материальной точки, совершающей гармонические колебания, пропорциональна квадрату амплитуды колебания A^2 .

$$E = E_{\text{п}} + E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \text{const.}$$

2.1.16. Переход потенциальной энергии в кинетическую и наоборот происходит при колебаниях, совершающихся под действием потенциальных сил (рис. 2.5).

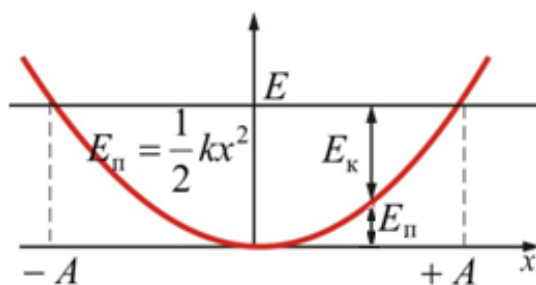


Рис. 2.5

2.1.17. Гармонический осциллятор (в классической механике) — это система, которая при смещении из положения равновесия испытывает действие возвращающей силы, пропорциональной смещению. Примерами могут служить: *пружинный* (рис. 2.1 а), *математический* (рис. 2.1 б, 2.6) и *физический* (рис. 2.7) маятники, а так же колебательный контур.

2.1.18. Математический маятник — идеализированная система, состоящая из невесомой нерастяжимой нити (рис. 2.6), на которую подвешена масса, сосредоточенная в одной точке (шарик на длинной тонкой нити).

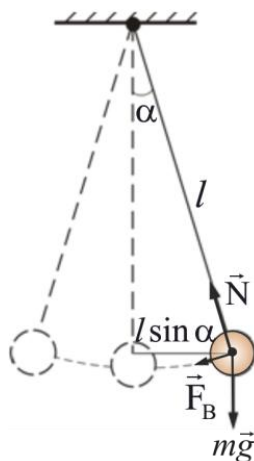


Рис. 2.6

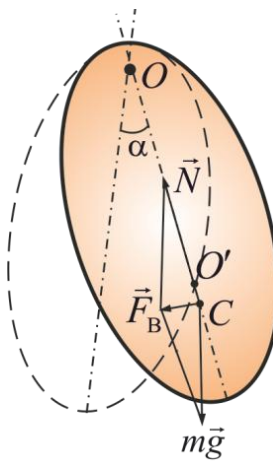


Рис. 2.7

2.1.19. Уравнение динамики вращательного движения математического маятника:

$$M = J\varepsilon.$$

2.1.20. Вращающий момент стремится вернуть маятник в положение равновесия, он возникает при отклонении тела от положения равновесия на угол α :

$$\vec{M} = [m\vec{g}, \vec{l}], \quad M = -mgl \sin \alpha.$$

где l – расстояние между точкой подвеса и центром масс маятника C .

2.1.21. Момент инерции маятника:

$$J = ml^2.$$

2.1.22. Угловое ускорение математического маятника:

$$\varepsilon = \frac{d^2\alpha}{dt^2}.$$

2.1.23. Дифференциальное уравнение маятника:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \omega_0^2\alpha = 0;$$

• *решение данного уравнения:*

$$\alpha = \alpha_m \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

При малых колебаниях угловое отклонение математического маятника изменяется во времени по гармоническому закону.

2.1.24. Циклическая частота математического маятника:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

2.1.25. Период колебаний математического маятника:

• *в инерциальной системе отсчета:*

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

• *в неинерциальной системе отсчета:*

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

2.1.26. Физический маятник – это твердое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг неподвижной горизонтальной оси, проходящей через точку O , не совпадающие с центром масс C (рис. 2.7).

2.1.27. Циклическая частота физического маятника:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{mgl}{J}}.$$

2.1.28. Период колебаний физического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgl}} = 2\pi\sqrt{\frac{l_{\text{пр}}}{g}}.$$

2.1.29. Приведенная длина физического маятника – длина такого математического маятника, период колебания которого совпадает с периодом колебаний данного физического маятника:

$$l_{\text{пр}} = \frac{J}{ml}.$$

2.2. Сложение гармонических колебаний

При всех сложениях колебаний различают сложение колебаний, совершающихся в *одном направлении* и сложение колебаний, совершающихся во *взаимно перпендикулярных направлениях*.

2.2.1. Сложение двух одинаково направленных гармонических колебаний (рис. 2.8):

$$x_1 = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1) \quad \text{и} \quad x_2 = A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_2).$$

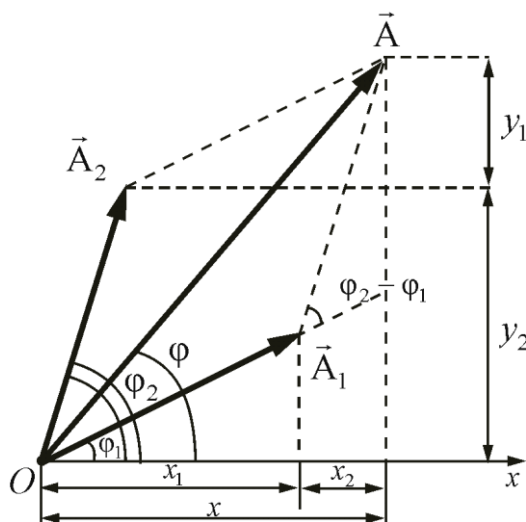


Рис 2.8

2.2.2. Результирующая амплитуда при сложении колебаний:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1),$$

где A_1 и A_2 – амплитуды складываемых колебаний; φ_1 и φ_2 – их начальные фазы.

Амплитуда A результирующего колебания зависит от разности начальных фаз $\varphi_2 - \varphi_1$.

2.2.3. Начальная фаза колебаний:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}.$$

Таким образом, тело, участвуя в двух гармонических колебаниях одного направления и одинаковой частоты, совершает также гармонические колебания в том же направлении и с той же частотой, что и складываемые колебания.

2.2.4. Модулированные колебания – колебания, параметры которых (амплитуда, фаза, частота, длительность и т. п.) изменяются во времени:

$$x = A(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)].$$

2.2.5. Биения – это периодические изменения амплитуды колебания, возникающие при сложении двух гармонических колебаний с близкими частотами. Биение является простейшим видом модулированных колебаний (рис. 2.9).

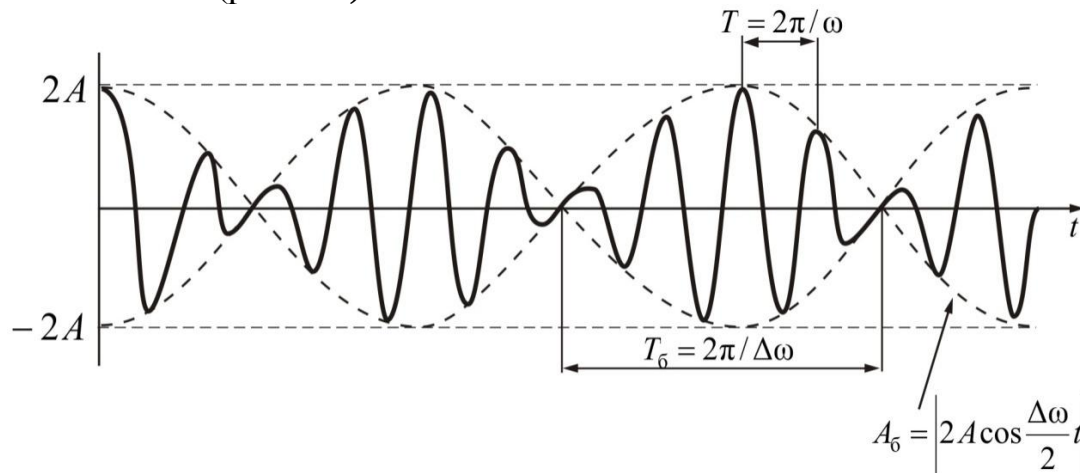


Рис. 2.9

Результирующее колебание: $x = A_б \cos \omega t$

Амплитуда биения изменяется по закону: $A_б = \left| 2A \cos \frac{\Delta \omega}{2} t \right|$.

2.2.6. Сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний:

$$x = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1) \quad \text{и} \quad y = A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_2).$$

2.2.7. Уравнение результирующего колебания – уравнение эллипса, оси которого ориентированы относительно x и y произвольно:

$$\frac{y^2}{A_2^2} + \frac{x^2}{A_1^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1).$$

Некоторые частные случаи решений уравнений:

- **Начальные фазы колебаний одинаковы:** $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$.

Уравнение результирующего колебания – это уравнение прямой, проходящей через начало координат (рис. 2.10 а, б):

$$y = \frac{A_2}{A_1} x \quad \text{или} \quad y = -\frac{A_2}{A_1} x.$$

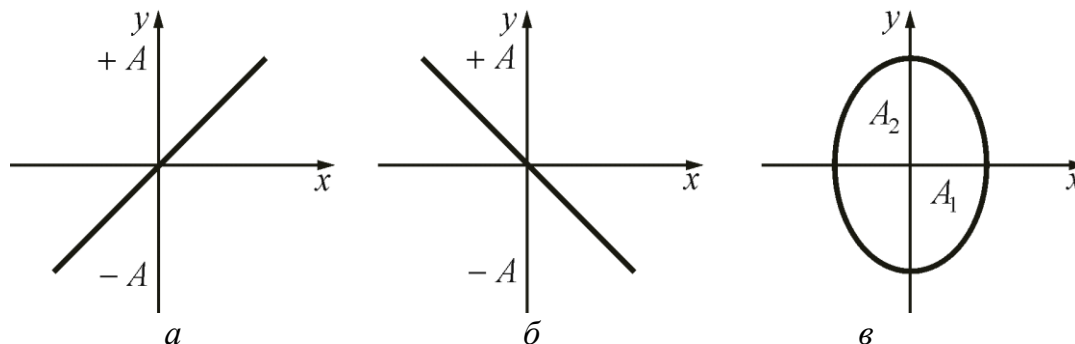


Рис. 2.10

- **Начальная разность фаз равна $\pi/2$** (рис. 2.10, в). Уравнение результирующего колебания – уравнение эллипса с полуосями A_1 и A_2 (случай эллиптически поляризованных колебаний):

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1.$$

- **Фигуры Лиссажу** – фигуры, получаемые при сложении взаимно перпендикулярных колебаний разных частот. В табл.1 приведены несколько фигур Лиссажу для разных соотношений частот колебаний и заданной разности фаз $\Delta\phi$.

Таблица 1

$\frac{\omega_1}{\omega_2}$	Угол сдвига фаз $\Delta\phi$				
	0°	45°	90°	135°	180°
1:1					
1:2					

2.3. Влияние внешних сил на колебательные процессы

Все реальные колебания являются затухающими. Энергия механических колебаний постепенно расходуется на работу против сил трения, и амплитуда колебаний постепенно уменьшается (затухает).

Свободными затухающими колебаниями называются колебания, механическая энергия которых расходуется на работу против диссипативных сил (сил трения).

Во многих случаях в первом приближении можно считать, что при небольших скоростях силы, вызывающие затухание колебаний, пропорциональны величине скорости (например, маятник).

2.3.1. Сила трения (сопротивления):

$$\vec{F}_{\text{тр}} = -r\vec{v},$$

где r – коэффициент сопротивления, $\vec{v}$ – скорость движения

2.3.2. Второй закон Ньютона для затухающих прямолинейных колебаний:

$$ma_x = -kx - rv_x,$$

где $-kx$ возвращающая сила, rv_x – сила трения.

2.3.3. Дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0;$$

- решение уравнения:

$$x = A_0 \exp(-\beta t) \cos(\omega t + \varphi),$$

где $A_0 \exp(-\beta t)$ – амплитуда затухающих колебаний, ω_0 – круговая частота собственных колебаний, ω – круговая частота свободных затухающих колебаний (рис. 2.11, 2.12).

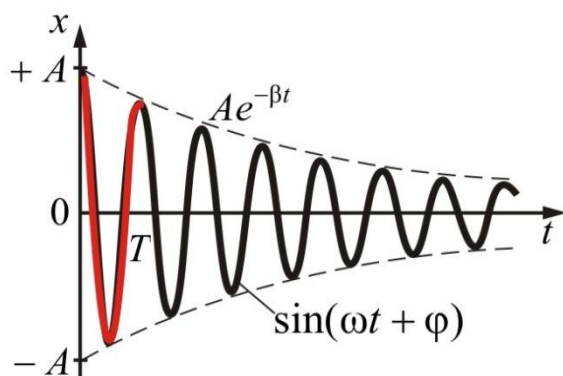


Рис. 2.11



Рис. 2.12

2.3.4. Коэффициент затухания β – физическая величина, обратная времени, в течение которого амплитуда уменьшается в e раз:

$$\beta = \frac{r}{2m} = \frac{1}{\tau},$$

где $\tau = NT$ – время релаксации – время, в течении которого амплитуда A уменьшится в e раз.

2.3.5. Логарифмический декремент затухания χ – физическая величина, обратная числу колебаний, по истечении которых амплитуда A уменьшается в e раз:

$$\chi = \ln \frac{A(t)}{A(T+t)} = \beta T = \frac{1}{N}.$$

2.3.6. Частота затухающих колебаний:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}.$$

2.3.7. Условный период затухающих колебаний:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}.$$

2.3.8. Вынужденные механические колебания – колебания, происходящие под действием внешней периодической силы.

Внешняя периодическая сила, называемая **вынуждающей**, сообщает колебательной системе дополнительную энергию, которая идет на восполнение энергетических потерь, происходящих из-за трения. Если вынуждающая сила изменяется во времени по закону синуса или косинуса, то вынужденные колебания будут гармоническими и незатухающими.

2.3.9. Второй закон Ньютона для вынужденных колебаний, происходящих вдоль оси x :

$$ma_x = -kx - r\dot{x} + F_x,$$

где F_x – вынуждающая сила.

2.3.10. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = F_0 \cos \omega t.$$

2.3.11. Уравнение установившихся вынужденных колебаний:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi).$$

2.3.12. Амплитуда вынужденных колебаний:

$$A = \frac{F_0}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}.$$

Таким образом, $A \sim F_0 / m$ и $\sim 1/\beta$.

При постоянных F_0 , m и β амплитуда зависит только от соотношения круговых частот вынуждающей силы ω и свободных незатухающих колебаний системы ω_0 .

2.3.13. Резонанс – явление возрастания амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты вынуждающей силы к $\omega_{\text{рез}}$ (рис. 2.13).

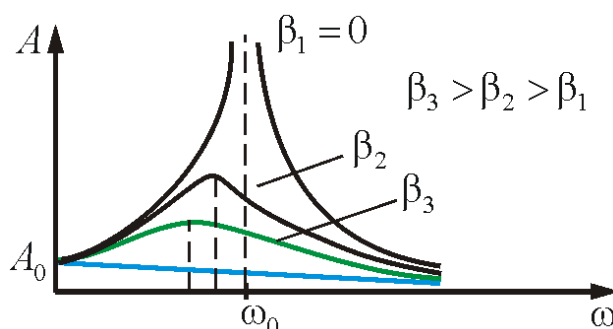


Рис. 2.13

2.3.14. Резонансная частота – частота вынужденных колебаний, при которых наблюдается резкое возрастание амплитуды:

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}.$$

2.3.15. Резонансная амплитуда:

$$A_{\text{рез}} = \frac{F_0}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 + \beta^2}}.$$

2.4. Упругие волны

Колеблющееся тело, помещенное в упругую среду, является источником колебаний, распространяющихся от него во все стороны. **Процесс распространения колебаний в среде называется волной.**

Волны переносят из одного места в другое. Импульс, энергию и фазу. Вещество не переносится.

Для существования волнового движения необходимы:

- источник колебаний;
- вещество или поле, через которые передаются колебания.

2.4.1. Длина волны – расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе (рис. 2.29):

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}.$$

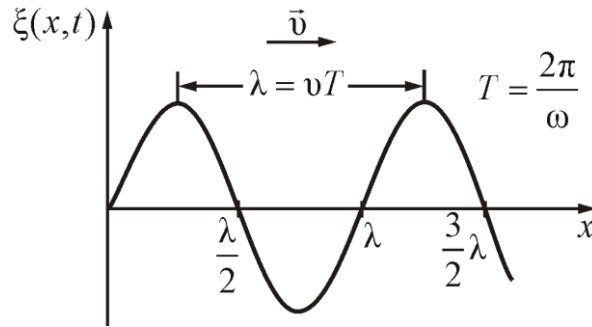


Рис. 2.29

2.4.2. Волновое уравнение – выражение, которое дает смещение ξ колеблющейся точки как функцию её координат и времени:

$$\nabla^2 \xi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}.$$

2.4.3. Уравнение плоской волны – смещение любой из точек с координатой x в момент времени t (рис. 2.30):

$$\xi = A \cos \omega \left(t - \frac{r}{v} \right) \quad \text{или} \quad \xi = A \cos \omega (\omega t - kx);$$

- *при затухании волны в среде:*

$$\xi = A \exp(-\beta t) \cos \omega (\omega t - kx),$$

где β – коэффициент затухания.

2.4.4. Волновой вектор – вектор, направление которого перпендикулярно фазовому фронту бегущей волны, а абсолютное значение равно волновому числу:

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{n}.$$

2.4.5. Волновое число – число длин волн, укладывающихся на отрезке 2π метров, т.е. это пространственный аналог круговой частоты ω :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi v}{v} = \frac{2\pi}{vT}.$$

2.4.6. Уравнение сферической волны (рис. 2.31):

$$\xi = \frac{A}{r} \cos \omega \left(t - \frac{r}{v} \right) \quad \text{или} \quad \xi = \frac{A}{r} \cos \omega (t - kr);$$

- *при затухании волны в среде:*

$$\xi = \frac{A}{r} \exp(-\beta t) \cos \omega (t - kr).$$

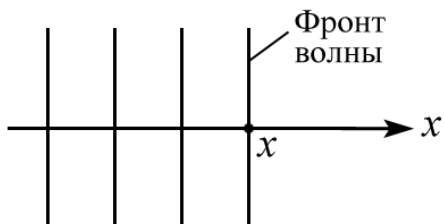


Рис. 2.30

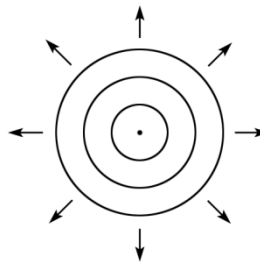


Рис. 2.31

2.4.7. Фазовая скорость – это скорость распространения фазы волны:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} = \lambda v.$$

2.4.8. Дисперсия – это зависимость фазовой скорости в среде от частоты.

2.4.9. Групповая скорость – скорость, с которой перемещается центр пакета (точка с максимальным значением A):

$$u = \frac{d\omega}{dk} = v + k \frac{\partial v}{\partial k} = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}.$$

2.4.10. Разность фаз колебаний двух точек среды:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x.$$

2.4.11. Волновой пакет или группа волн – это суперпозиция волн, мало отличающихся друг от друга по частоте (рис. 2.32):

$$\xi = \left[2A_0 \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}x\right) \right] \cos(\omega t - kx)$$

Чтобы суперпозицию можно было считать группой волн, необходимо условие: $\Delta\omega \ll \omega_0$.

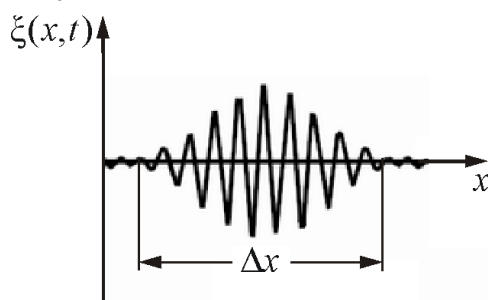


Рис. 2.32

2.4.12. Стоячей волной называется колебательный процесс, возникающей при наложении двух встречных плоских волн с одинаковой амплитудой (рис. 2.26)

2.4.13. Уравнение стоячей волны:

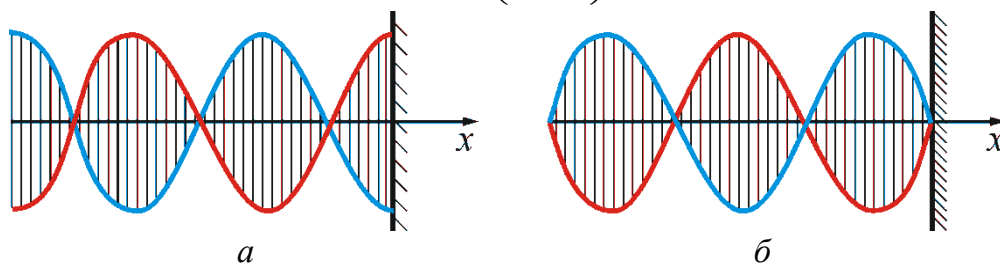
$$\xi = 2A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \cos \omega t \quad \text{или} \quad \xi = 2A \cos kx \cos \omega t.$$

2.4.14. Координаты пучностей стоячей волны (рис. 2.33,а):

$$x_{\text{пучн}} = \pm \frac{n\lambda}{2}.$$

2.4.15. Координаты узлов стоячей волны (рис. 2.33,б):

$$x_{\text{узн}} = \pm \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}.$$

*Рис. 2.33***2.4.16. Фазовая скорость** продольных волн в упругой среде:

- *в твердых телах:* $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ или $v = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$;
- *в газах:* $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}$ или $v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$,

где P – давление; ρ – плотность газа; γ – постоянная адиабаты.

2.4.17. Амплитуда звукового давления:

$$P_0 = 2\pi P \nu A.$$

2.4.18. Средняя объемная плотность энергии звукового поля:

$$\langle w \rangle = \frac{1}{2} \rho \xi_0^2 = \frac{1}{2} \frac{P_0^2}{\rho v^2} = \rho \omega^2 A^2.$$

2.4.19. Энергия звукового поля, заключенного в объеме V :

$$W = \omega V.$$

2.4.20. Поток звуковой энергии - количество энергии, переносимое любой волной, через некоторую поверхность в единицу времени.

$$\Phi = \frac{W}{t}.$$

2.4.21. Интенсивность звука (плотность потока звуковой энергии) – средняя по времени энергия, которую звуковая волна переносит в

единицу времени через единицу площади поверхности, расположенной перпендикулярно к направлению распространения волны:

$$I = \frac{\Phi}{S} = \langle w \rangle v.$$

2.4.22. Связь интенсивности с мощностью звука:

$$I = \frac{N}{4\pi r^2}.$$

2.4.23. Эффект Доплера – это изменение частоты волн, регистрируемых приемником, которое происходит вследствие движения источника этих волн и приемника (рис. 2.34):

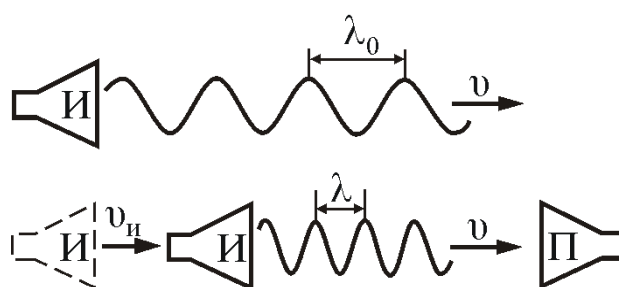


Рис. 2.34

- в акустике: $v = \frac{v \pm v_{\text{пр}}}{v \mp v_{\text{ист}}} v_0$;
- для электромагнитных волн в вакууме: $v = \frac{v_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + (v/c) \cos \theta}$;
- продольный оптический эффект Доплера: $v = v_0 \sqrt{\frac{1 \pm v/c}{1 \mp v/c}}$;
- поперечный оптический: $v = v_0 \sqrt{1 - (v/c)^2}$,

где v_0 – частота колебаний источника; v – фазовая скорость волн в среде.

2.4.24. Закон Хаббла – эмпирический закон, связывающий красное смещение галактик и расстояние до них линейным образом (рис. 2.35):

$$v \cos \theta \approx cz = Hr.$$

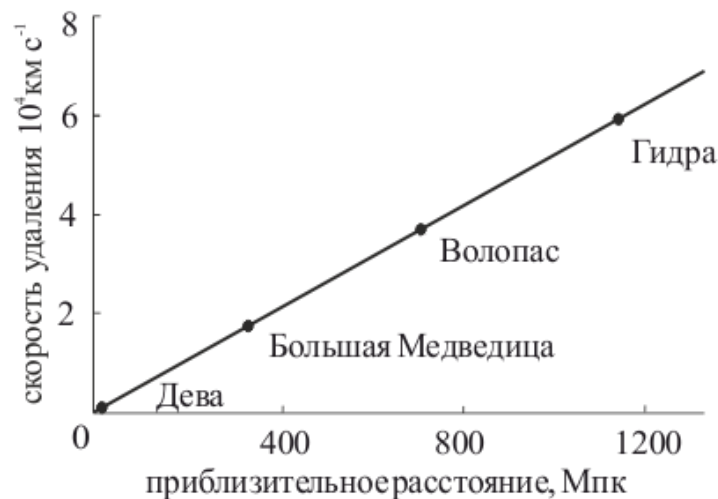


Рис. 2.35

Чем дальше находится галактика, тем больше её красное смещение, а поэтому, тем больше скорость её удаления.

2.4.25. Постоянная Хаббла – коэффициент, который связывает расстояние до внегалактического объекта (галактики, квазара) со скоростью его удаления. Наиболее точная оценка постоянной Хаббла на 2010 год составляет $70,4 \text{ (км/с)/Мпк}$, таким образом, в современную эпоху две галактики, разделённые расстоянием в 1 Мпк, в среднем разлетаются со скоростью $\sim 70 \text{ км/с}$.

2.4.26. Время расширения Вселенной – величина, обратная постоянной Хаббла. Для указанного значения постоянной Хаббла время жизни Вселенной составляет около $4,38 \times 10^{17} \text{ с}$ или $13,9 \times 10^9 \text{ лет}$.

3. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

3.1. Молекулярно-кинетическая теория

Молекулярная физика – раздел физики, который изучает физические свойства тел на основе рассмотрения их молекулярного строения. Задачи молекулярной физики решаются методами физической статистики, термодинамики и физической кинетики, они связаны с изучением движения и взаимодействия частиц (атомов, молекул, ионов), составляющих физические тела.

Термодинамика – раздел физики, изучающий соотношения и превращения теплоты и других форм энергии. В отдельные дисциплины выделились химическая термодинамика, изучающая физико-химические превращения, связанные с выделением или поглощением тепла, а также теплотехника. Термодинамика – наука аксиоматическая. В ее основе лежат принципы, являющиеся обобщением всей совокупности экспериментальных данных о превращении теплоты в механическую работу. Термодинамика изучает в основном общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями.

3.1.1. Моль – единица измерения количества вещества, находящегося в газообразном, жидком или твердом состоянии.

3.1.2. Количество вещества – физическая величина, характеризующая количество однотипных структурных единиц, содержащихся в веществе. Под структурными единицами понимаются любые частицы, из которых состоит вещество (атомы, молекулы, ионы, электроны или любые другие частицы).

3.1.3. Молярная масса вещества – масса одного моля вещества:

$$\mu = A m_{\text{ед}} N_A \text{ или } \mu = \frac{m}{\nu}; \text{ для смеси газов: } \mu = \frac{\sum m_i}{\sum \nu_i}.$$

Для отдельных химических элементов молярной массой является масса одного моля отдельных атомов этого элемента. В этом случае молярная масса элемента, выраженная в г/моль, численно совпадает с массой атома элемента, выраженной в атомной единице массы.

Молярная масса и молекулярная масса равны лишь численно и отличаются по размерности.

3.1.4. Атомная единица массы (а. е. м.) – единица массы, равная 1/12 массы изотопа углерода ^{12}C – m_C :

$$m_{\text{ед}} = 1/12 m_C = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

3.1.5. Атомная масса – значение массы атома, выраженное в атомных единицах массы. Находится как отношение массы данного элемента m_A к 1/12 массы изотопа углерода C^{12} :

$$m_A = A m_{\text{ед}}.$$

3.1.6. Число Авагадро – число частиц в киломоле любого вещества:

$$N_A = 1/m_{\text{ед}} = 6,022 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1} = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

3.1.7. Число Лошмидта – число молекул идеального газа, содержащихся в 1 м^3 при нормальных условиях ($P_0 = 10^5 \text{ Па}$; $T_0 = 273,15 \text{ К}$):

$$N_L = \frac{P_0}{kT_0} = 2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

3.1.8. Универсальная газовая постоянная – это величина, численно равная работе расширения одного моля идеального одноатомного газа в изобарном процессе при увеличении температуры на 1 К :

$$R = kN_A = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}},$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$ – постоянная Больцмана.

3.1.9. Концентрация частиц – физическая величина, равная отношению числа частиц N к объему V , в котором они находятся:

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

3.1.10. Давление на поверхность – физическая величина, характеризующая состояние сплошной среды и численно равная силе F , действующей на единицу площади S поверхности перпендикулярно этой поверхности (рис. 3.1, 3.2).

$$P = \frac{\Delta F}{\Delta S}.$$

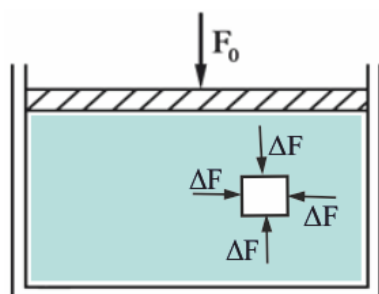


Рис. 3.1

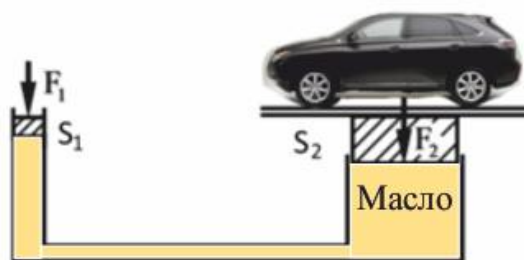


Рис. 3.2

3.1.11. Давление газа на стенку сосуда – это следствие столкновения газовых молекул со стенками сосуда:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{1}{3} n m_0 v_x^2 = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle,$$

где v_x^2 – среднеквадратичная скорость молекул $\langle v_x^2 \rangle$; m_0 – масса одной молекулы.

3.1.12. Закон Паскаля: если к некоторой части поверхности, ограничивающей газ или жидкость, приложено давление P_0 , то оно одинаково передается любой части этой поверхности.

Следствием закона Паскаля является то, что на одинаковой глубине давление жидкостей или газа одинаково действует во всех направлениях.

3.1.13. Гидравлический домкрат – устройство для подъема тяжестей, работа которого основана на законе Паскаля (рис. 3.2).

Соотношение для домкрата:

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

Используя домкрат для подъема автомобиля достаточно давить на малый поршень площадью S_1 с силой, составляющей лишь 1 % веса автомобиля.

3.1.14. Основное уравнение МКТ:

$$P = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle = nkT,$$

где $\langle E_k \rangle$ – средняя энергия одной молекулы; n – концентрация молекул.

3.1.15. Абсолютная температура – это мера кинетической энергии теплового движения частиц идеального газа:

$$T = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{3k}.$$

3.1.16. Температурные шкалы – шкалы, градуированные в единицах температуры. Температурные шкалы различаются в зависимости от начальной точки отсчета и величины градуса (рис. 3.3).

3.1.17. Шкала сравнения температур различных источников изображена на рис. 2.4:

3.1.18. Идеальный газ – это газ, для которого:

- радиус взаимодействия молекул газа меньше среднего расстояния между ними (молекулы взаимодействуют только при столкновении);
- столкновение молекул между собой и со стенками сосуда – абсолютно упругие (выполняются законы сохранения энергии и импульса);
- объем всех молекул газа много меньше объема, занятого газом.

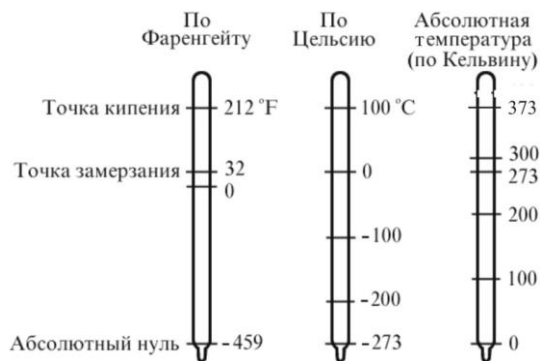


Рис. 3.3

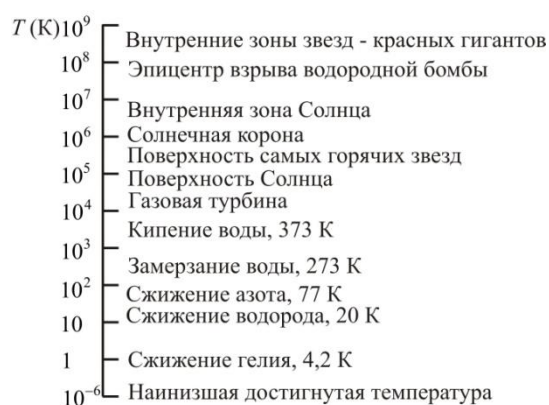


Рис. 3.4.

3.1.19. Законы идеальных газов:

1. **Изохорический процесс** – процесс, протекающий при **постоянном объеме** V (рис. 3.5).

Закон Шарля: при постоянном объеме и неизменных значениях массы газа и его молярной массы, отношение давления газа к его абсолютной температуре остаётся постоянным:

$$P/T = \text{const.}$$

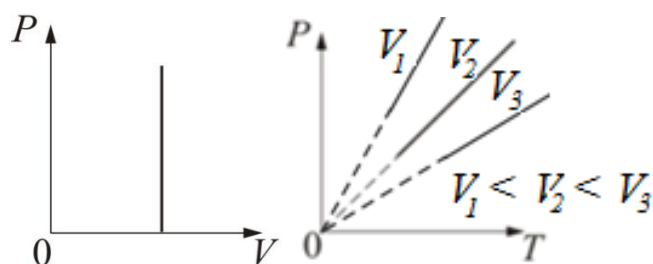


Рис. 3.5

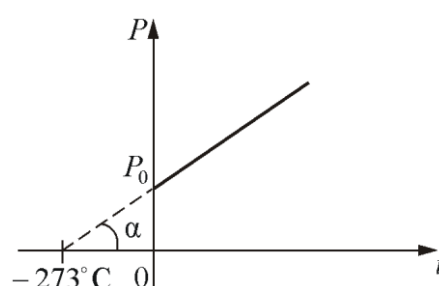


Рис. 3.6

Если температура газа выражена в градусах Цельсия, то уравнение изохорического процесса записывается в виде (рис. 3.6):

$$P = P_0(1 + \alpha t),$$

где P_0 – давление при 0°C, $\alpha = 1/273$ град⁻¹ – температурный коэффициент.

2. **Изобарический процесс** – процесс, протекающий при **постоянном давлении** (рис. 3.7).

Закон Гей-Люссака: при постоянном давлении и неизменных значениях массы и газа и его молярной массы, отношение объема газа к его абсолютной температуре остаётся постоянным

$$V/T = \text{const.}$$

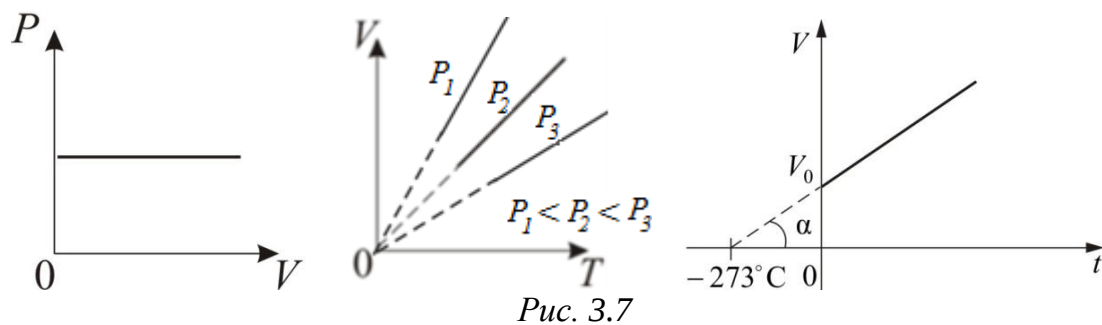


Рис. 3.7

3. **Изотермический процесс** – процесс, протекающий при **постоянной температуре** T (рис. 3.8, 3.9).

Закон Бойля – Мариотта: при постоянной температуре и неизменных значениях массы газа и его молярной массы, произведение объёма газа на его давление остаётся постоянным: $PV = \text{const}$.

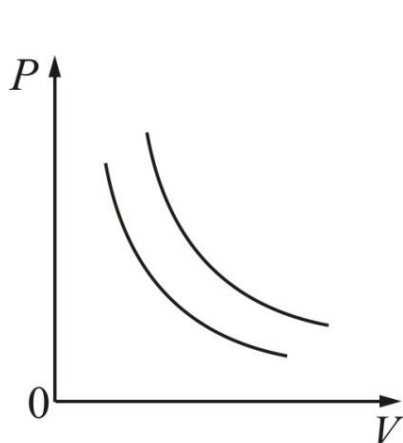


Рис. 3.8.

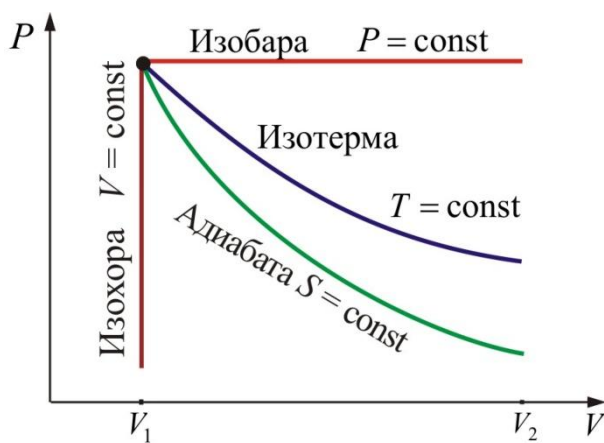


Рис. 3.9.

4. **Адиабатический процесс** (изоэнтропийный ($\Delta S = 0$, $S = \text{const}$)): Адиабатический процесс – термодинамический процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой (рис 3.9).

Уравнение адиабаты: $V^\gamma P = \text{const}$, где γ – показатель адиабаты.

5. **Политропический процесс** – процесс, при котором теплоёмкость газа остаётся постоянной. Политропический процесс – общий случай всех перечисленных выше процессов.

6. **Закон Авогадро:** моли любых газов, при одинаковых температуре и давлении, занимают одинаковые объёмы. При нормальных условиях объём моля равен:

$$V_\mu = 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}.$$

Моль – это стандартизированное количество любого вещества, равное его молекулярной массе.

7. **Закон Дальтона:** давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений P , входящих в нее газов:

$$P_{\text{см}} = P_1 + P_2 + \dots + P_n.$$

8. **Объединенный газовый закон** (закон Клапейрона):

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad \text{или} \quad \frac{PV}{T} = \text{const.}$$

3.1.20. **Уравнение состояния идеального газа** (уравнение Менделеева – Клапейрона):

$$PV = \frac{m}{\mu} RT; \text{ для смеси газов: } PV = \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \dots + \frac{m_n}{\mu_n} \right) RT.$$

3.2. Статистические распределения

С точки зрения атомно-молекулярного строения вещества величины, встречающиеся в макроскопической физике, имеют смысл *средних значений*, которые принимают некоторые функции от микроскопических переменных системы. Величины такого рода называются *статистическими*. Примерами таких величин являются давление, температура, плотность и др. Большое число сталкивающихся атомов и молекул обуславливает важные закономерности в поведении статистических переменных, не свойственные отдельным атомам и молекулам. Такие закономерности называются *вероятностными*, или *статистическими*.

Задача статистической физики заключается в отыскании функции распределения случайной величины и в вычисление её среднего значения. Совпадение экспериментальных и теоретических средних значений является критерием правильности теории исследуемого явления.

3.2.1. **Вероятность** какого-либо события – это предел, к которому стремится отношение числа случаев, приводящих к осуществлению события, к общему числу случаев при бесконечном увеличении последних:

$$W_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_i}{n}.$$

Здесь n_i – число случаев, когда событие произошло, а n – общее число опытов. W может принимать значения от нуля до единицы: $0 \leq W \leq 1$.

3.2.2. **Условие нормировки вероятности** – сумма вероятностей всех возможных значений величины n_i равна единице:

$$\sum W_i = \sum n_i / n = 1.$$

3.2.3. **Теорема о сложении вероятностей:** $W = \sum W_i$.

3.2.4. Среднее значение величины $\langle x \rangle$ по результатам произведенных измерений, определяется как отношение суммы всех полученных значений x_i к числу измерений n :

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

В пределе, когда $n \rightarrow \infty$, среднее значение величины можно найти по формуле:

$$\langle x \rangle = \sum W_i x_i.$$

Если значения одной из величин x не зависят от того, какое значение другая y , то эти величины называются **статистически независимыми**.

Вероятность одновременного появления статистически независимых событий равна произведению вероятностей этих событий:

3.2.5. Теорема об умножении вероятностей: вероятность одновременного появления статистически независимых событий равна произведению вероятностей этих событий:

$$W(x, y) = W(x) \cdot W(y).$$

3.2.6. Скорости газовых молекул (рис. 3.10):

- *наиболее вероятная* – это скорость, вблизи которой на единичный интервал скоростей приходится наибольшее число молекул:

$$v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad \text{или} \quad v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}};$$

- *средняя квадратичная* – это квадратный корень из среднего значения квадратов скоростей молекул:

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad \text{или} \quad v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}};$$

- *средняя арифметическая* – это сумма скоростей всех молекул, деленная на общее число всех молекул в единице объема:

$$v_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad \text{или} \quad v_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}},$$

где m – масса молекулы; μ – молярная масса; k – постоянная Больцмана; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура.

3.2.7. Скорость звука в газе:

$$v_{\text{зв}} = \sqrt{\gamma P / \rho},$$

где γ – коэффициент Пуассона, ρ – плотность газа.

3.2.8. Относительная скорость – это скорость точки, обусловленная движением подвижной системы отсчёта относительно абсолют-

ной. Другими словами, это скорость точки подвижной системы отсчёта, в данный момент времени совпадающей с материальной точкой:

$$u = \frac{v}{v_{\text{вер}}}.$$

3.2.9. Закон распределения молекул по абсолютным значениям скоростей (распределение Максвелла):

$$f(v) = \frac{1}{n} \frac{dn}{dv} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) v^2.$$

Функции распределения Максвелла (рис. 3.10) определяет число молекул dn из общего их числа в единице объема n_0 , которые обладают при данной температуре T скоростями поступательного движения в интервале от v до dv .

На рис. 3.11 показано, что при увеличении массы молекул ($m_1 > m_2 > m_3$) и при уменьшении температуры ($T_1 < T_2 < T_3$) максимум функции распределения Максвелла смещается вправо, в сторону увеличения скоростей. *Площадь под кривой – величина постоянная*, равная единице ($f(v) = \text{const} = 1$), поэтому важно знать, как будет изменяться положение максимума кривой:

$$f(v) \sim \sqrt{m/T}, \text{ кроме того } v \sim \sqrt{T/m}.$$

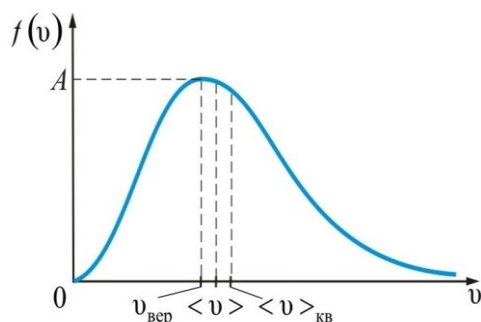


Рис. 3.10

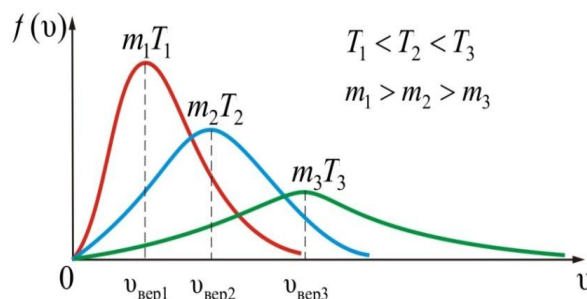


Рис. 3.11

3.2.10. Распределение Максвелла для относительных скоростей:

$$f(u) = \frac{1}{n} \frac{dn}{du} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2) u^2.$$

3.2.11. Распределение Максвелла по импульсам:

$$f(p) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{2mkT} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{p^2}{2mkT}\right) p^2 dp.$$

3.2.12. Закон Максвелла для распределения молекул по энергиям теплового движения:

$$f(E_k) = \frac{2n}{\sqrt{\pi}} (kT)^{-3/2} E_k^{1/2} \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right),$$

где $\langle E_k \rangle = \frac{3}{2}kT$ – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа.

3.2.13. Атмосферное давление на какой-либо высоте h обусловлено весом слоёв газа, лежащих выше (рис. 3.12).

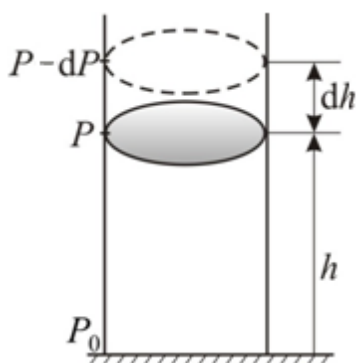


Рис. 3.12

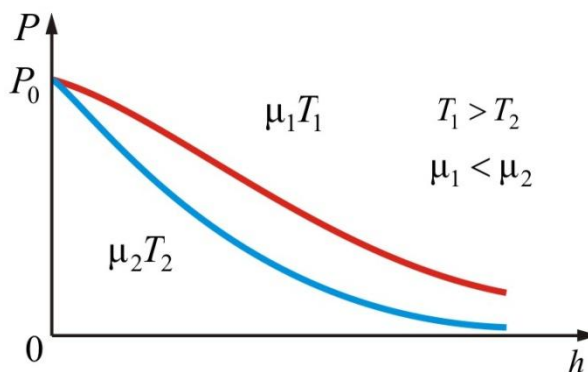


Рис. 3.13

Давление убывает с высотой тем быстрее, чем тяжелее газ (чем больше μ) и чем ниже температура (рис. 3.13).

3.2.14. Барометрическая формула показывает зависимость атмосферного давления от высоты:

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{\mu gh}{RT}\right),$$

где P_0 – давление на высоте $h = 0$.

3.2.15. Распределение Больцмана – закон распределения молекул идеального газа по потенциальным энергиям (рис. 3.14):

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{mgh}{kT}\right) = n_0 \exp\left(-\frac{E_{\text{п}}}{kT}\right),$$

где n_0 – число молекул в единице объема, там, где $E_{\text{п}} = 0$.

Это соотношение справедливо не только в потенциальном поле сил гравитации, но и в любом потенциальном поле, для совокупности любых одинаковых частиц, находящихся в состоянии хаотического теплового движения.

На рис. 3.14 показана зависимость концентрации различных газов от высоты. Видно, что число более тяжелых молекул с высотой убывает быстрее, чем легких.

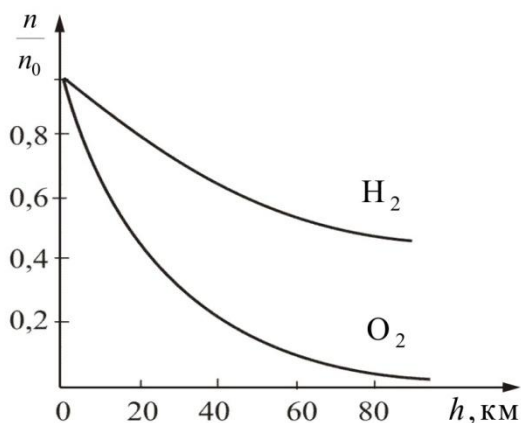


Рис. 3.14

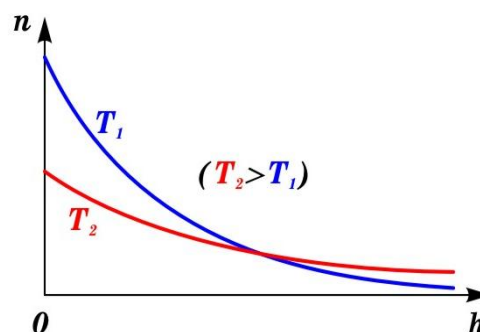


Рис. 3.15

При уменьшении температуры количество молекул с высотой убывает быстрее (рис. 3.15).

3.2.16. Закон Максвелла – Больцмана – закон распределения молекул идеального газа по полным энергиям $E = E_{\text{п}} + E_{\text{к}}$:

$$dn = n_0 A \exp\left(-\frac{E}{kT}\right).$$

3.2.17. Квантовые статистики – раздел статистической механики, в котором n -частичные квантовые системы описываются методом статистических операторов комплексов частиц. Число частиц n может быть произвольным натуральным (конечным) числом или бесконечным.

Разные частицы подчиняются разным статистикам (распределениям):

- **Распределение Бозе – Эйнштейна** описывает квантовые частицы с целым спином (бозоны):

$$\langle N_i \rangle = \frac{1}{\exp\left(\frac{(E_i - \mu)}{kT}\right) - 1}.$$

- **Распределение Ферми – Дирака** описывает квантовые частицы с полуцелым спином (фермионы):

$$\langle N_i \rangle = \frac{1}{\exp\left(\frac{(E_i - \mu)}{kT}\right) + 1},$$

где μ – химический потенциал.

Температура T и химический потенциал μ являются характеристикой всей макроскопической системы частиц, находящейся в состоянии термодинамического равновесия.

3.3. Элементы физической кинетики

Физическая кинетика – микроскопическая теория процессов в неравновесных средах. В кинетике методами квантовой или классической статистической физики изучают процессы переноса энергии, импульса, заряда и вещества в различных физических системах (газах, плазме, жидкостях, твёрдых телах) и влияние на них внешних полей.

Особые *необратимые* процессы, возникающие в термодинамически неравновесных системах, называются явлениями *переноса*. К ним относятся *диффузия* (перенос массы); *теплопроводность* (перенос энергии) и *вязкость*, или *внутреннее трение* (перенос импульса).

3.3.1. Эффективное сечение молекулы диаметром d (рис. 3.16):

$$\sigma = \pi d^2.$$

3.3.2. Среднее число столкновений в одну секунду:

$$\langle \nu \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle.$$

где n – количество молекул, $\langle v \rangle$ – средняя скорость теплового движения.

3.3.3. Средняя длина свободного пробега молекул газа (рис.3.17):

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\nu} = \frac{kT}{\sqrt{2} \sigma P},$$

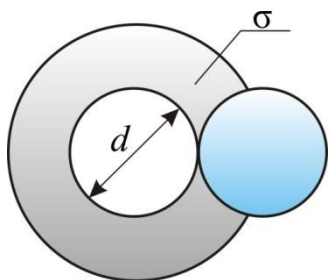


Рис. 3.16

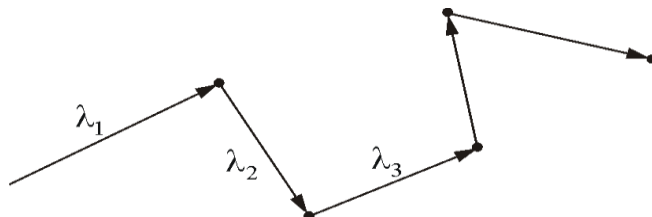


Рис. 3.17

3.3.4. Диффузия – процесс переноса материи или энергии из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией (против градиента концентрации).

3.3.5. Закон диффузии Фика: плотность потока вещества J пропорциональна коэффициенту диффузии D и градиенту концентрации n :

$$J = -D \frac{dn}{dx} \text{ или } J = -D \text{grad} n.$$

- *Коэффициент диффузии:*

$$D = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle.$$

3.3.6. Вязкость (внутреннее трение) – одно из явлений переноса, свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. Механизм внутреннего трения в жидкостях и газах заключается в том, что хаотически движущиеся молекулы переносят импульс из одного слоя в другой, что приводит к выравниванию скоростей – это описывается введением силы трения.

3.3.7. Закон Ньютона для внутреннего трения (вязкости) – сила трения пропорциональна градиенту скорости:

$$f_{mp} = -\eta \frac{dv}{dx} \text{ или } f_{mp} = -\eta \text{grad} v,$$

где f – сила, действующая на единицу площади поверхности, разделяющей два соседних слоя газа.

- *Коэффициент динамической вязкости:*

$$\eta = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle n m = D\rho.$$

3.3.8. Теплопроводность – это перенос теплоты структурными частицами вещества (молекулами, атомами, ионами) в процессе их теплового движения. Такой теплообмен может происходить в любых телах с неоднородным распределением температур, но механизм переноса теплоты будет зависеть от агрегатного состояния вещества. Явление теплопроводности заключается в том, что кинетическая энергия атомов и молекул, которая определяет температуру тела, передаётся другому телу при их взаимодействии или передаётся из более нагретых областей тела к менее нагретым областям.

3.3.9. Закон теплопроводности Фурье – количество переносимой энергии, определяемое как плотность теплового потока q , пропорционально градиенту температуры:

$$q = -\chi \frac{dT}{dx} \text{ или } q = -\chi \text{grad} T.$$

- *Коэффициент теплопроводности:*

$$\chi = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle n \frac{i}{2} k = D\rho C_{уд},$$

где $C_{уд}$ – удельная теплоемкость при постоянном объеме.

3.3.10. Зависимость коэффициентов переноса от давления (рис.3.18):

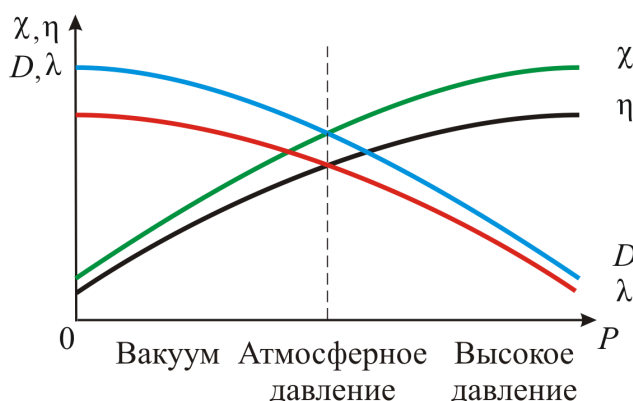


Рис. 2.18

3.3.11. Вакуумом называется такое состояние газа, когда его плотность столь мала, что средняя длина свободного пробега молекул λ может быть сравнима с линейными размерами сосуда, в котором находится газ.

3.3.12. Эффект Кнудсена:

$$P_1/P_2 = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}},$$

где T_1 и T_2 — температуры газа в сосудах; P_1 и P_2 — давление разреженного газа в обоих сосудах.

3.4. Первое начало термодинамики

Нулевое начало термодинамики (общее начало термодинамики) — физический принцип, утверждающий, что вне зависимости от начального состояния изолированной системы, в конце концов, в ней установится термодинамическое равновесие, и все части системы при достижении термодинамического равновесия будут иметь одинаковую температуру.

Первое начало термодинамики — один из трёх основных законов термодинамики, представляет собой закон сохранения энергии для термодинамических систем.

Согласно первому началу термодинамики, термодинамическая система может совершать работу только за счёт своей внутренней энергии или каких-либо внешних источников энергии. Первое начало термодинамики часто формулируют как невозможность существования вечного двигателя первого рода, который совершал бы работу, не черпая энергию из какого-либо источника.

3.4.1. Первое начало термодинамики (закон сохранения энергии) – количество теплоты Q , сообщенное телу, идет на увеличение внутренней энергии ΔU и на совершение телом работы A (рис. 3.19):

$$Q = \Delta U + A, \text{ или } \delta Q = dU + \delta A.$$

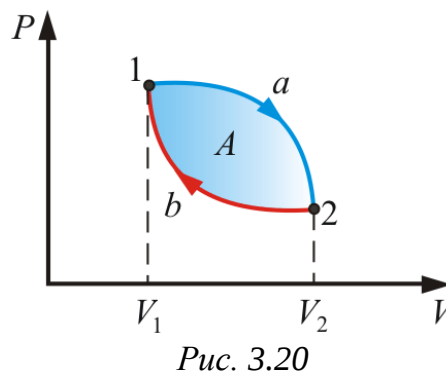
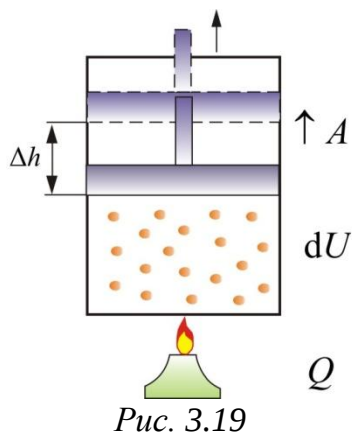
3.4.2. Внутренняя энергия U идеального газа (энергия теплового хаотического движения молекул):

$$U = \frac{m}{\mu} \frac{3}{2} R \Delta T.$$

Внутренняя энергия U является функцией состояния системы, независимо от предыстории и **зависит только от температуры.**

Так как U – функция состояния, то в **циклическом процессе** (рис. 3.20):

$$\oint dU = 0.$$



3.4.3. Внутренняя энергия произвольной массы газа:

$$U = \frac{m}{\mu} \frac{3}{2} RT = \nu \frac{3}{2} RT.$$

3.4.4. Изменение внутренней энергии:

$$dU = \frac{m}{\mu} \frac{3}{2} R dT.$$

3.4.5. Приращение работы газа (элементарная работа, совершаемая газом при изменении его объема) (рис. 3.21):

$$\delta A = P dV.$$

3.4.6. Работа A , совершаемая газом в процессе его расширения (или сжатия) при любом термодинамическом процессе, численно равна площади под кривой изображающей изменение состояния газа на PV – диаграмме (V_1 и V_2 – начальный и конечный объемы газа): работа в

изобарном процессе ($P = \text{const}$) – рис. 3.22; работа в изотермическом процессе ($T = \text{const}$) – рис. 3.23.

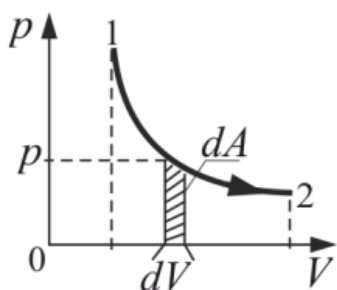


Рис. 3.21

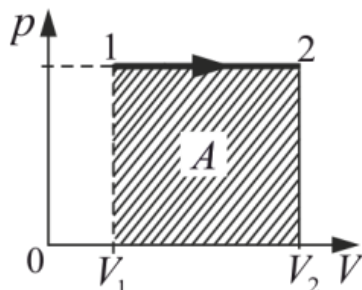


Рис. 3.22

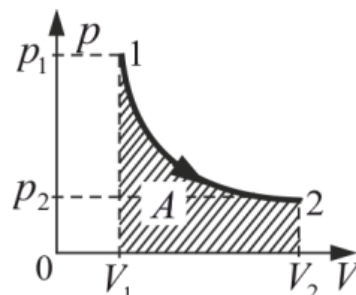


Рис. 3.23

3.4.7. Полная работа при изменении объема газа (рис. 3.24):

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P dV.$$

При расширении ($\Delta V > 0$) газ совершает положительную работу, при сжатии ($\Delta V < 0$) работа, совершаемая газом, отрицательна.

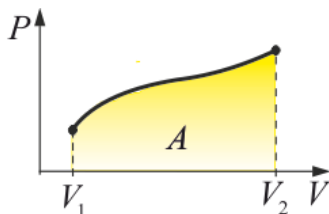


Рис. 3.24

3.4.8. Теплоемкость тела – физическая величина, определяющая отношение бесконечно малого количества теплоты δQ , полученного телом, к соответствующему приращению его температуры δT .

- **Удельная теплоемкость** количество теплоты, которое получает или отдает 1 кг вещества при изменении его температуры на 1 К:

$$C_{\text{уд}} = \frac{dQ}{dT}.$$

- **Молярная теплоемкость** – физическая величина, равная отношению теплоемкости вещества к количеству этого вещества:

$$C_{\mu} = C_{\text{уд}} \mu.$$

- **Теплоемкость при постоянном объеме:**

$$C_V = \frac{\partial U}{\partial T}.$$

- **Теплоемкость при постоянном давлении:**

$$C_p = \frac{dU}{dT} + P \frac{dV}{dT}.$$

3.4.9. Уравнение Майера показывает, что различие теплоёмкостей газа равно работе, совершаемой одним молем идеального газа при изменении его температуры на 1 К, и разъясняет смысл универсальной газовой постоянной R – механический эквивалент теплоты:

$$C_p = C_v + R.$$

3.4.10. Число степеней свободы i называется число независимых переменных, определяющих положение тела в пространстве.

Положение *одноатомной* молекулы, как и материальной точки, задаётся тремя координатами, поэтому она имеет три степени свободы.

Многоатомная молекула может ещё и вращаться, поэтому имеет 5 или 6 степеней свободы (рис. 3.25).

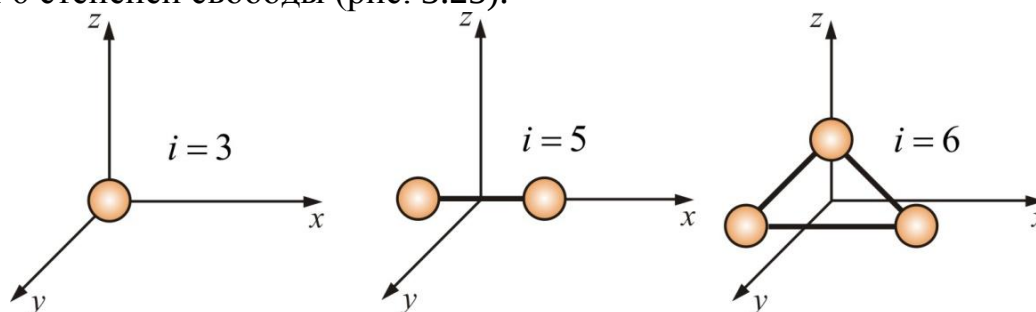


Рис. 3.25

3.4.11. Средняя кинетическая энергия поступательного движения, приходящаяся на одну степень свободы молекулы:

$$\langle E_{кл} \rangle = \frac{1}{2} kT.$$

3.4.12. Закон Больцмана о равномерном распределении энергии по степеням свободы:

$$\langle E_k \rangle = \frac{i}{2} kT.$$

3.4.13. Внутренняя энергия одноатомной молекулы:

$$U = \frac{3}{2} kT.$$

3.4.14. Внутренняя энергия многоатомной молекулы:

$$U = \langle E_{\text{пост}} \rangle + \langle E_{\text{вращ}} \rangle + \langle E_{\text{колеб}} \rangle = \frac{7}{2} kT.$$

3.4.15. Теплоемкость одноатомных газов при постоянном объеме и постоянном давлении (рис. 3.26):

$$C_v = \frac{3}{2} R = 12,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \text{ и } C_p = \frac{5}{2} R = 20,8 \frac{\text{кДж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

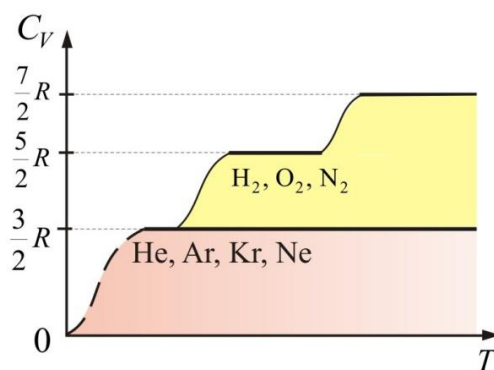


Рис. 3.26

3.4.16. Теплоемкости многоатомных газов (рис. 3.26) при постоянном объеме и постоянном давлении:

$$C_V = \frac{i}{2} R \text{ и } C_P = \frac{i+2}{2} R.$$

3.4.17. Показатель адиабаты (коэффициент Пуассона):

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}.$$

3.4.18. Показатель адиабаты для многоатомных газов:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i}.$$

3.4.19. Внутренняя энергия идеального газа:

$$U = \frac{m}{\mu} \frac{R}{\gamma-1} T = \frac{PV}{\gamma-1}.$$

3.5. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам идеальных газов

3.5.1. Изохорический процесс – процесс протекающий при постоянном объеме. $V = \text{const}$, $A_V = 0$.

- *Количество теплоты*, сообщенное в изохорическом процессе:

$$\delta Q = C_V dT \text{ или } \Delta Q = C_V (T_2 - T_1),$$

где T_1 , T_2 – соответственно начальная и конечная температура.

- *Изменение внутренней энергии* в изохорическом процессе:

$$dU = \delta Q \text{ или } \Delta U = \Delta Q.$$

- *Теплоемкость* в изохорическом процессе:

$$C_V = \frac{m}{\mu} \frac{R}{\gamma-1} \text{ или } C_V = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} R.$$

3.5.2. Изобарический процесс – процесс, протекающий при постоянном давлении.

- *Работа* в изобарическом процессе: $A = P(V_2 - V_1) = \frac{m}{\mu} R \Delta T$,

где V_1 и V_2 – соответственно начальный и конечный объемы газа.

- *Количество теплоты*, сообщенное в изобарическом процессе:

$$\delta Q = C_p dT \text{ или } \Delta Q = C_p (T_2 - T_1) = \frac{m}{\mu} R \Delta T \left(\frac{i}{2} + 1 \right).$$

- *Изменение внутренней энергии* в изобарическом процессе:

$$dU = C_v dT \text{ или } \Delta U = C_v (T_2 - T_1) = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T.$$

- *Теплоемкость* в изобарическом процессе:

$$C_p = \frac{m}{\mu} \frac{\gamma R}{\gamma - 1} = \frac{m}{\mu} \frac{dQ}{dT}.$$

3.5.3. Изотермический процесс – процесс, протекающий при постоянной температуре.

- *Работа газа* в изотермическом процессе:

$$\delta A = PdV \text{ или } A = \frac{m}{\mu} RT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = \frac{m}{\mu} RT \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right).$$

- *Количество теплоты*, сообщенное в изотермическом процессе:

$$\delta Q = \delta A, Q = A$$

- *Изменение внутренней энергии* в изотермическом процессе:

$$dU = 0, U = 0$$

3.5.4. Политропный процесс – такой процесс, при котором изменяются все основные процессы, кроме теплоемкости.

3.5.5. Уравнение политропы (n – показатель политропы):

$$PV^n = \text{const} \text{ или } TV^{n-1} = \text{const}.$$

- Изобарический процесс: $P = \text{const}$, $n = 0$: $C = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} = \gamma C_v = C_p$.
- Изотермический процесс: $T = \text{const}$, $n = 1$, $CT = \pm \infty$.
- Изохорический процесс: $V = \text{const}$, $n = \pm \infty$: $C_v = \frac{R}{\gamma - 1}$.
- Адиабатический процесс: $\Delta Q = 0$, $n = \gamma$, $C_{\text{ад}} = 0$.

3.5.6. Работа в политропном процессе: $A = \frac{P_1 V_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right]$.

3.5.7. Характеристики изопроцессов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

	Название процесса			
	Изохорический	Изобарический	Изотермический	Адиабатический
Условие протекания процесса	$V = \text{const}$	$P = \text{const}$	$T = \text{const}$	$\delta Q = 0$ $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i}$
Связь между параметрами состояния	$\frac{P}{T} = \text{const}$	$\frac{V}{T} = \text{const}$ $PdV = \frac{m}{\mu} R dT$	$PV = \text{const}$	$PV^\gamma = \text{const}$ $TV^{\gamma-1} = \text{const}$ $T^\gamma P^{\gamma-1} = \text{const}$
Первое начало	$\delta Q = dU$	$\delta Q = dU + \delta A$	$\delta Q = \delta A$	$dU = \delta A$
Работа в процессе	$\delta A = 0$ $A = 0$	$\delta A = PdV$ $A = P(V_2 - V_1)$ $A = \frac{m}{\mu} R \Delta T$	$\delta A = PdV$ $A = \int_{V_1}^{V_2} PdV$ $A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ $A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{P_2}{P_1}$	$\delta A = PdV = -dU$ $\delta A = -\frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT$ $A = -\Delta U = -C_V(T_2 - T_1)$ $A = \frac{PV_1}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right]$ $A = \frac{m}{\mu} \frac{RT_1}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right]$
Количество теплоты, сообщённое в процессе	$\delta Q = C_V dT$ $Q = C_V(T_2 - T_1)$	$\delta Q = C_P dT$ $Q = C_P(T_2 - T_1)$ $Q = \frac{m}{\mu} R \Delta T \left(\frac{i}{2} + 1 \right)$	$\delta Q = \delta A$ $Q = A$	$\delta Q = 0$ $Q = 0$
Изменение внутренней энергии	$dU = \delta Q$ $\Delta U = \frac{V}{\gamma-1} (P_2 - P_1)$	$dU = C_V dT$ $\Delta U = C_V(T_2 - T_1)$ $\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T$	$dU = 0$ $U = 0$	$dU = -\delta A = C_V dT$ $U = A = C_V(T_2 - T_1)$ $\Delta U = \frac{PV_1}{T_1(\gamma-1)}$
Теплоёмкость	$C_V = \frac{m}{\mu} \frac{R}{(\gamma-1)}$ $C_V = \frac{i}{2} R$	$C_P = \frac{m}{\mu} \frac{\gamma R}{(\gamma-1)}$ $C_P = \frac{m}{\mu} \frac{dQ}{dT}$	$C_T = \pm \infty$	$C_{ад} = 0$

3.6. Круговые процессы. Тепловые машины

Круговые процессы в термодинамике, то есть такие процессы, в которых начальные и конечные параметры, определяющие состояние рабочего тела (давление, объём, температура, энтропия) совпадают.

Термодинамические циклы являются моделями процессов, происходящих в реальных тепловых машинах для превращения тепла в механическую работу, а также для отъёма тепла от более холодного тела и передачи его более горячему (охлаждения) под действием механической работы.

Устройство, преобразующее тепловую энергию в механическую работу (*тепловой двигатель*) или механическую работу в тепло (*холодильник*). Преобразование осуществляется за счёт изменения внутренней энергии *рабочего тела* – на практике обычно пара или газа.

Идеальная тепловая машина – машина, в которой произведённая работа и разница между количеством подведённого и отведённого тепла равны. Работа идеальной машины описывается циклом Карно.

3.6.1. Круговой процесс (цикл) – это такой процесс, в результате которого термодинамическое тело возвращается в исходное состояние.

3.6.2. Прямой цикл (за цикл совершается положительная работа) (рис. 3.27):

$$A = \oint P dV > 0.$$

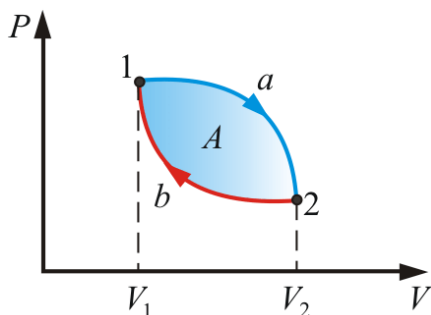


Рис. 3.27

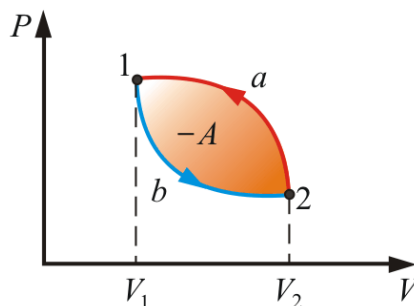


Рис. 3.28

3.6.3. Обратный цикл (за цикл совершается отрицательная работа) (рис. 3.28):

$$A = \oint P dV < 0.$$

3.6.4. Тепловая машина – периодически действующий двигатель, совершающий работу за счёт получаемого извне тепла. Обязательными частями тепловой машины являются (рис. 3.29) нагреватель (источник энергии), холодильник, рабочее тело (газ, пар):

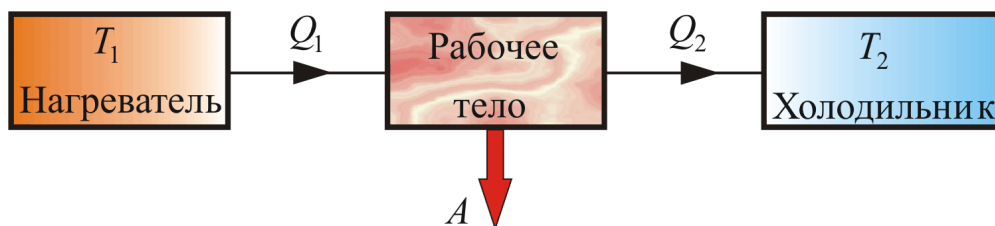


Рис. 3.29

3.6.5. Работа тепловой машины:

$$A = Q_1 - Q_2.$$

3.6.6. Холодильная машина – периодически действующая установка, в которой за счет работы внешних сил теплота переносится к телу с более высокой температурой (рис. 3.30). Здесь используется обратный цикл.



Рис. 3.30

3.6.7. Теорема Карно: Из всех периодически действующих тепловых машин, имеющих одинаковые температуры нагревателей и холодильников, наибольшим КПД обладают обратимые машины. Причем КПД обратимых машин, работающих при одинаковых температурах нагревателей и холодильников, равны друг другу и не зависят от конструкции машины и от природы рабочего вещества. При этом КПД меньше единицы.

3.6.8. Цикл Карно – идеальный термодинамический цикл, состоящий из 2 адиабатических и 2 изотермических процессов (рис. 3.31).

Одним из важных свойств цикла Карно является его обратимость: он может быть проведён как в прямом, так и в обратном направлении, при этом энтропия адиабатически изолированной системы (без теплообмена с окружающей средой) не меняется.

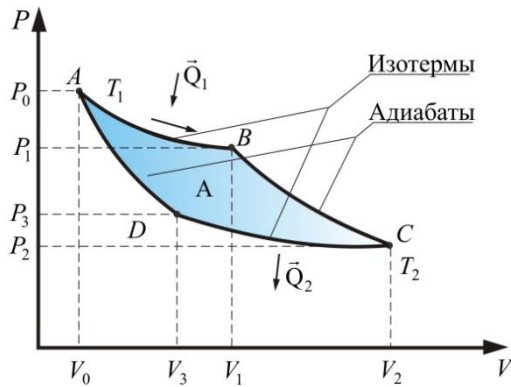


Рис. 3.31

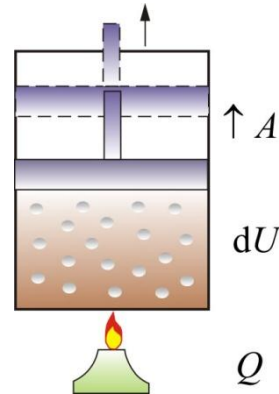


Рис. 3.32

3.6.9. Работа цикла Карно (рис. 3.31, 3.32):

- *Изотермическое расширение* (тепло, полученное от нагревателя Q_1 , идет на изотермическое расширение газа, совершая при этом работу A_1):

$$A_1 = Q_1 = \frac{m}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_1}{V_2}.$$

- *Адиабатическое расширение* (при адиабатическом расширении теплообмен с окружающей средой отсутствует и работа расширения A_2 совершается за счет изменения внутренней энергии):

$$A_2 = \frac{R}{\gamma - 1} (T_1 - T_2).$$

- *Изотермическое сжатие* (газ изотермический сжимается от V_2 до V_3 . Теплота Q_2 , отданная газом холодильнику при изотермическом сжатии, равна работе сжатия A_3 – это работа совершаемая над газом, она отрицательна:

$$A_3 = -Q_3 = -\frac{m}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

- *Адиабатическое сжатие:*

$$A_4 = \frac{R}{\gamma - 1} (T_1 - T_2).$$

3.6.10. Общая работа цикла Карно:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \text{ или } A = R(T_1 - T_2) \ln \beta,$$

где $\ln \beta = \ln \frac{V_2}{V_3} = \ln \frac{V_1}{V_0}$.

3.6.11. Полезная работа для цикла Карно $A = Q_1 - Q_2$.

3.6.12. Термический КПД для цикла Карно:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

$\eta < 1$, зависит только от разности температур между нагревателем и холодильником и не зависит от конструкции машины и рода рабочего тела (доказательство **теоремы Карно**).

3.6.13. Термический КПД для необратимого цикла Карно:

$$\eta_{\text{необр}} = 1 - \frac{T_2 - \Delta T}{T_1 - \Delta T}.$$

3.7. Второе и третье начала термодинамики

Второе начало термодинамики физический принцип, накладывающий ограничение на направление процессов передачи тепла между телами. Второе начало термодинамики гласит, что невозможен самопроизвольный переход тепла от тела, менее нагретого, к телу, более нагретому.

Второе начало термодинамики запрещает так называемые вечные двигатели второго рода, показывая, что коэффициент полезного действия не может равняться единице, поскольку для кругового процесса температура холодильника не должна равняться 0 К.

Второе начало термодинамики является постулатом, не доказываемым в рамках термодинамики. Оно было создано на основе обобщения опытных фактов и получило многочисленные экспериментальные подтверждения.

3.7.1. Приведённая теплота – это отношение теплоты Q в изотермическом процессе к температуре T , при которой происходит передача теплоты:

$$Q' = \frac{Q}{T}.$$

3.7.2. Энтропия S – это отношение полученной или отданной теплоты к температуре, при которой происходит этот процесс:

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{обр}}.$$

3.7.3. Равенство Клаузиуса – для обратимых процессов изменения энтропии равно нулю:

$$\Delta S_{\text{обр}} = 0 \quad \text{или} \quad \oint \frac{\delta Q_{\text{обр}}}{T} = 0 \quad \text{или} \quad TdS = \delta Q.$$

3.7.4. Неравенство Клаузиуса – при любом необратимом процессе в замкнутой системе энтропия возрастает:

$$\Delta S_{\text{необр}} > 0, \quad \text{или} \quad \oint \frac{\delta Q_{\text{необр}}}{T} > 0 \quad \text{или} \quad TdS > \delta Q.$$

3.7.5. Для произвольного процесса энтропия замкнутой системы, при любых происходящих в ней процессах, не может убывать (или увеличивается или остается неизменной):

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T},$$

где знак “=” – для обратимого процесса; знак “>” – для необратимого.

3.7.6. Математическое выражение второго начала термодинамики:

$$dS \geq 0.$$

3.7.7. Первое и второе начала термодинамики в объединенной форме:

$$TdS \geq dU + \delta A.$$

3.7.8. Изменение энтропии в изопроцессах:

- *изохорический процесс:*

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} C_V \ln \frac{T_2}{T_1}, \text{ т.к. } V_1 = V_2;$$

- *изобарический процесс:*

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} \int_{T_1}^{T_2} C_p \frac{dT_2}{T_1} = \frac{m}{\mu} C_p \ln \frac{T_2}{T_1}, \text{ т.к. } P_1 = P_2;$$

- *изотермический процесс:*

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} R \ln \frac{V_2}{V_1}, \text{ т.к. } T_1 = T_2;$$

- *адиабатический процесс:*

$$\Delta S = 0, \text{ т.к. } \delta Q = 0 \text{ (изоэнтропийный процесс, т.к. } S = \text{const}).$$

3.7.9. Количество теплоты необходимой для нагревания тела массой m от температуры T_1 до температуры: $Q = Cm(T_2 - T_1)$.

3.7.10. Фазовые переходы – процессы перехода вещества из одного агрегатного состояния в другое (рис. 3.33).



Рис. 3.33

Четыре агрегатных состояния (или фазы) вещества: твердое, жидкое, газообразное, плазменное.

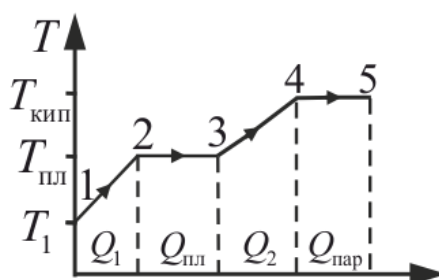
Вещество находится **в твердом состоянии**, если средняя потенциальная энергия $\langle E(p) \rangle$ притяжения молекул по модулю много больше их средней кинетической энергии $\langle E(k) \rangle$: $|\langle E(p) \rangle| \gg \langle E(k) \rangle$.

Вещество находится **в жидком состоянии**, если средняя кинетическая энергия молекул соизмерима по величине со средней потенциальной энергией их взаимодействия: $\langle E(k) \rangle \approx |\langle E(p) \rangle|$.

Вещество находится **в газообразном состоянии**, если средняя кинетическая энергия молекул превышает величину средней потенциальной энергии их взаимодействия: $|\langle E(p) \rangle| < \langle E(k) \rangle$.

Фазовые переходы происходят с поглощением (плавление, парообразование) или с выделением энергии (кристаллизация, конденсация), рис. 1.

Если к кристаллическому веществу в теплоизолированной системе подводить количество теплоты Q и измерять при этом температуру T , то получим график зависимости $T(Q)$, представленный на рис. 3.34



3.7.11. Поведение энтропии в процессах изменения агрегатного состояния вещества:

- Закон плавления и кристаллизации: $\delta Q = \pm \lambda dm$,
где λ – коэффициент пропорциональности.
- Изменение энтропии при плавлении и кристаллизации:

$$\Delta S = \pm \lambda m / T_{\text{пл}}.$$

- Закон испарения и конденсации:
 $\delta Q = \pm r dm$.
- Изменение энтропии при испарении и конденсации:

$$\Delta S = \pm r m / T_{\text{к}}.$$

3.7.12. Внутренняя энергия системы:

$$U = F + TS,$$

где F – свободная энергия; TS – связанная энергия.

3.7.13. Энергетическая потеря в изолированной системе:

$$\Pi = T_{\text{мин}} \Delta S,$$

где $T_{\text{мин}}$ – температура окружающей среды.

3.7.14. Статистический смысл энтропии – мера беспорядочности, хаотичности состояния:

$$S = k \ln W,$$

где k – коэффициент Больцмана; W – термодинамическая вероятность.

3.7.15. Эквивалентные формулировки второго начала термодинамики:

- *невозможен процесс, единственным результатом которого является превращение всей теплоты, полученной от нагревателя в эквивалентную ей работу (формулировка Кельвина);*
- *невозможен вечный двигатель второго рода (Томсон – Планк);*
- *невозможен процесс, единственным результатом которого является передача энергии в форме теплоты от холодного тела к горячему (формулировка Клаузиуса);*
- *энтропия замкнутой системы не может убывать:*

$$dS \geq 0.$$

3.7.16. Третье начало термодинамики – энтропия всякой системы, при температуре, равной абсолютному нулю, равна нулю:

$$S_{T=0} = 0.$$

Третье начало термодинамики может быть сформулировано так: *«Приращение энтропии при абсолютном нуле температуры стремится к конечному пределу, не зависящему от того, в каком равновесном состоянии находится система».*

3.7.17. Теорема Нернста – *изменение энтропии ΔS стремится к нулю при любых обратимых изотермических процессах, совершаемых между двумя равновесными состояниями при температурах, приближающихся к абсолютному нулю ($\Delta S \rightarrow 0$ при $T \rightarrow 0$).*

3.7.18. Принцип недостижимости абсолютного нуля температуры: *невозможно охладить тело до абсолютного нуля.*

3.8. Термодинамические свойства реальных газов

Уравнение состояния устанавливает функциональную связь между давлением P , объемом V , температурой T и числом молей ν газа в состоянии равновесия. Эта связь может выражаться не только в форме уравнения, но также графически или в виде таблиц, которые часто используются, особенно для практических целей. Самым простым и известным уравнением состояния является *уравнение состояния идеального газа:*

$$PV = \nu RT,$$

где ν – число молей газа; P – давление; T – температура; V – объем.

- **Реальные газы** – газы, свойства которых зависят от взаимодействия молекул.

- **Уравнение Ван-дер-Ваальса** для реального газа:

$$\left(P + \frac{\nu^2 a}{V^2}\right)(V - \nu b) = \nu RT,$$

где a – поправка, учитывающая взаимодействия молекул; b – поправка, учитывающая собственный объем молекул.

- **Условия справедливости уравнения Ван-дер-Ваальса:**

$$\nu b \ll V \quad \text{и} \quad \nu^2 a / V^2 \ll P.$$

- **Связь критических параметров** – объема, давления и температуры – с постоянными a и b Ван-дер-Ваальса:

$$V_x = 3b, \quad P_x = a/(27b^2), \quad T_x = 8a/(27Rb).$$

- **Силы Ван-дер-Ваальса:** межмолекулярные взаимодействия имеют электрическую природу и складываются из сил притяжения (ориентационных, индукционных и дисперсионных) и сил отталкивания (рис. 3.35). Зависимость сил притяжения $F_{\text{пр}}$ и сил отталкивания $F_{\text{отт}}$ от расстояния показана на рис. 3.36.



Рис. 3.35

- **Потенциал Леннарда-Джонса** описывает зависимость потенциальной энергии взаимодействия от расстояния (рис. 3.37):

$$U(r) = -ar^{-6} + br^{-12}.$$

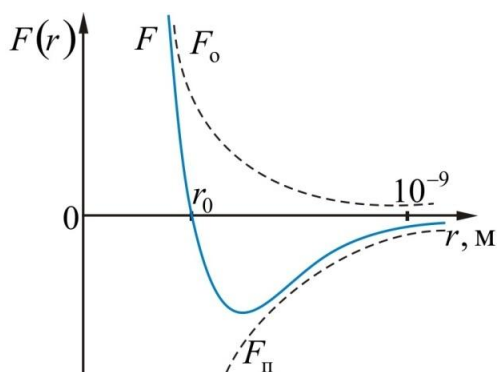


Рис. 3.36

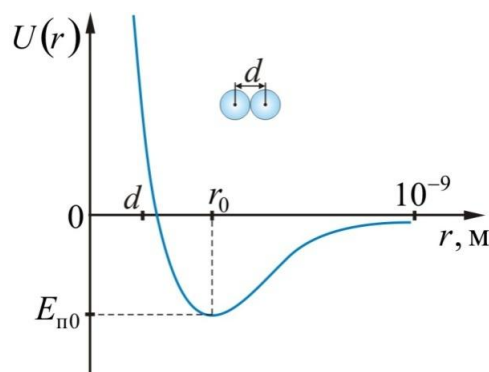


Рис. 3.37

- **Изотермы реальных газов** – зависимости P от V для реального газа при постоянной температуре (рис. 3.38).

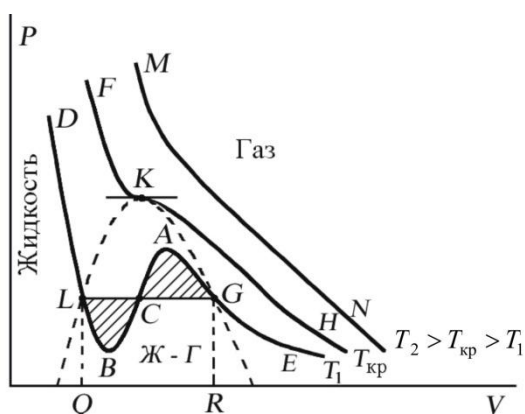


Рис. 3.38

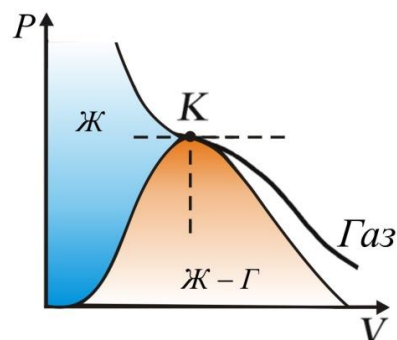


Рис. 3.39

- **Критическая точка K** – точка перегиба критической изотермы, в которой касательная к изотерме горизонтальна (рис. 3.39). Наличие этой точки означает, что для каждой жидкости существует такая температура, выше которой вещество может существовать только в газообразном состоянии.

- **Внутренняя энергия** произвольной массы реального газа:

$$U = \nu(C_V T - a/V_m),$$

где C_V – молярная теплоемкость газа при постоянном объеме, $\nu = \mu/m$ – количества вещества.

- **Эффект Джоуля – Томсона:** изменение температуры газа, в результате его медленного протекания под действием постоянного перепада давления сквозь дроссель (рис. 3.40).
- *Положительный эффект*, если газ охлаждается: $\Delta T < 0$.
- *Отрицательный эффект*, если газ нагревается: $\Delta T > 0$.

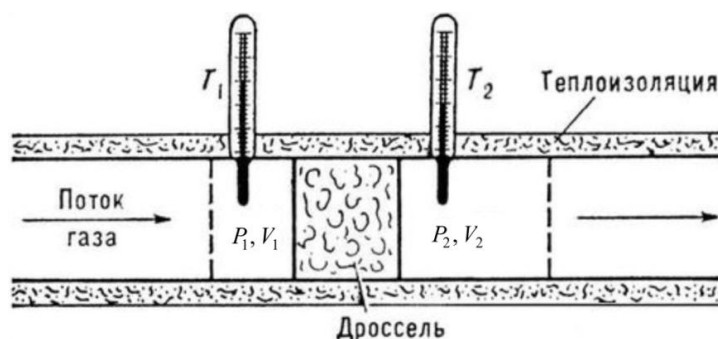


Рис. 3.40

- **Энтальпия системы** – термодинамический потенциал характеризующий состояние системы в равновесии:

$$H = PV + U.$$

3.8.12. Сжижение газов – возможно при температуре ниже критической, например: He – 5,3 К; H₂ – 33 К; N₂ – 126,1 К.

Схема установки для сжижения газов (машина Линде), в которой используется эффект Джоуля – Томсона, изображена на рис. 3.41.

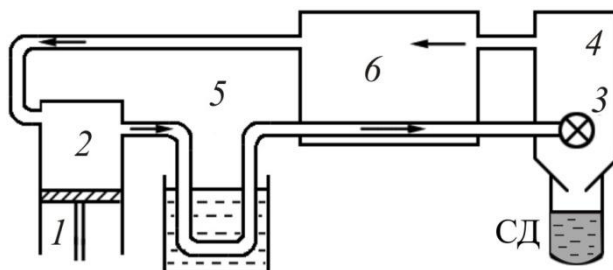


Рис. 3.41

3.8.13. Термодинамические потенциалы являются полными дифференциалами и определяют термодинамические свойства системы.

В соответствии с этим энтропия S и внутренняя энергия U являются термодинамическими потенциалами. В качестве других потенциалов выступают энтальпия H ; свободная энергия F ; потенциал Гиббса Φ .

Связь между термодинамическими потенциалами и их производными определяется следующими соотношениями:

- внутренняя энергия $U = H - PV = H + V \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_S$;

- энтальпия $H = U + PV = U + P \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_S$

(определяет состояние системы при постоянных значениях S и P);

- свободная энергия $F = U - TS = U + T \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_V$

(определяет состояние системы при постоянных T и V);

- потенциал Гиббса $\Phi = H - TS = U + PV - TS = H + T \left(\frac{\partial \Phi}{\partial T} \right)_P$

(определяет состояние системы при постоянных T и P).

3.8.14. Свободная энергия есть та работа, которую могло бы совершить тело в обратимом изотермическом процессе, или свободная

энергия есть максимальная возможная работа, которую может совершить система, обладая каким-то запасом внутренней энергии.

Внутренняя энергия системы U равна сумме **свободной** (F) и **связанной** (TS) энергии:

$$U = F + TS.$$

3.8.15. Связанная энергия – та часть внутренней энергии, которая не может быть превращена в работу, – это обесцененная часть внутренней энергии.

Таким образом, *энтропия системы есть мера обесцененности ее энергии* (мера той энергии, которая не может быть превращена в работу).

3.8.16. Энергетическая потеря в изолированной системе:

$$\Pi = T_{\min} \Delta S,$$

где $T_{\min}$ – температура окружающей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние десятилетия мир переживает невиданную по своим масштабам и скорости осуществления научно-техническую революцию. Современная наука (и техника), развивающаяся необыкновенно быстрыми темпами, приводит к резкому повышению требований, которые предъявляются к современному курсу физики в вузе. Эти требования находят свое выражение в повышении научно-технического уровня курса, внедрении инновационных технологий, направленных на активизацию познавательной деятельности студентов, развитие их творческих способностей, научного мышления.

Данный краткий курс физики охватил все основные разделы классической и современной физики. Мы изучили основы классической механики и, рассмотрев границы ее применимости, перешли к специальной теории относительности. Далее были рассмотрены основы термодинамики и молекулярной физики, учение о электричестве и магнетизме, колебательные, волновые процессы, включая учение об электромагнитных волнах и оптику. Существенное место отведено квантовым свойствам излучения, основам квантовой оптики и элементам квантовой механики.

В конце курса мы разобрали вопросы, посвященные современным достижениям физики XXI века – атомной физики, физики атомного ядра и элементарных частиц. Они стали возможными благодаря быстрому расширению технических возможностей эксперимента и развитию квантовой механики, применению ее к теории твердых тел, расчетам ускорителей, ядерных и термоядерных реакторов, квантовых генераторов, усилителей и т.д.

Наряду с большими достижениями физики, во всех ее разделах остается много вопросов. Например, построение квантовой теории тяготения, проблемы физики плазмы и атомного ядра, построение теории объединяющей все известные силы взаимодействия.

Из сказанного ясно, какое значение имеет для будущего инженера изучение физики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Тюрин Ю.И. Ч.1. Механика. Молекулярная физика. Термодинамика: учебное пособие для технических университетов / Ю.И. Тюрин, И.П. Чернов, Ю.Ю. Крючков – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002. – 502 с.
2. Тюрин Ю.И., Чернов И.П., Крючков Ю.Ю. Физика. Ч. 2. Электричество и магнетизм: учебное пособие для технических университетов. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2003. – 738 с.
3. Тюрин Ю.И., Чернов И.П., Крючков Ю.Ю. Физика. Ч. 3. Оптика. Квантовая физика: учебное пособие для технических университетов. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2004. – 738 с.
4. Бондарев Б.В. Курс общей физики. В 3 кн.: Учеб пособие/ Б.В. Бондарев, Н.П. Калашников, Г.Г. Спирин – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2005 – 352 с.
5. Калашников Н.П. Основы физики. В 2 т.: учебник для вузов/ Н.П. Калашников, М.А. Смондырев. – 3-е изд., стереотип. – М.: Дрофа, 2007.
6. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 кн.: учебное пособие для втузов/ И.В. Савельев – М.: АСТ Астрель, 2006. – 336 с.

Дополнительная

1. Кузнецов С.И. Физические основы механики: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 121 с.
2. Кузнецов С.И. Молекулярная физика. Термодинамика: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 113 с.
3. Кузнецов С.И. Электростатика. Постоянный ток: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 132 с.
4. Кузнецов С.И. Электромагнетизм: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 92 с.
5. Кузнецов С. И. Колебания и волны. Геометрическая и волновая оптика: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 170 с.
6. Кузнецов С. И. Квантовая оптика. Атомная и ядерная физика. Физика элементарных частиц: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 154 с.
7. Кузнецов С.И. Квантовая физика: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 62 с.
8. Кузнецов С.И. Курс физики с решениями задач. Основы механики: учебное пособие / под ред. В.В. Ларионова; Томский политехниче-

ский университет. – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011 – 249 с.

9. Кузнецов С.И. Краткий курс физики: учебное пособие / Томский политехнический университет. –Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 187 с.

10. Кузнецов С.И. Курс физики с примерами решения задач. Молекулярная физика и термодинамика: учебное пособие / ТПУ – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 178 с.

11. Кузнецов С.И. Физика. Ч. I. Механика. Механические колебания и волны. Молекулярная физика и термодинамика: учебное пособие / С.И. Кузнецов; Э.В. Поздеева; Томский политехнический университет. – 3-е изд., перераб. доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – 234 с.

12. Кузнецов С.И. Физика. Ч II. Электричество и магнетизм. Электромагнитные колебания и волны: учебное пособие / С.И. Кузнецов; ТПУ. – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011 – 248 с.

13. Кузнецов С.И. Физика. Ч III. Оптика. Квантовая природа излучения. Основы атомной физики и квантовой механики. Физика атомного ядра и элементарных частиц: учебное пособие / С.И. Кузнецов, Э.В. Поздеева, Э.Б. Шошин; ТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. 212 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Некоторые математические формулы

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \pm \sin \alpha \sin \beta$$

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha$$

$$\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha$$

$$\sin^2 \alpha = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha)$$

$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\alpha)$$

$\frac{d}{dx}(x^n) = nx^{n-1}$	$\frac{d}{dx}(\ln x) = \frac{1}{x}$	$\int_0^{\infty} \frac{x dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^2}{6}$
$\frac{d}{dx}(e^x) = e^x$	$\frac{d}{dx}(\operatorname{tg} x) = \frac{1}{\cos^2 x}$	$\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{x^n}\right) = -\frac{n}{x^{n+1}}$
$\frac{d}{dx}(\cos x) = -\sin x$	$\int \frac{dx}{x^2} = -\frac{1}{x}$	$\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{x}\right) = -\frac{1}{x^2}$
$\int \frac{dx}{x} = \ln x$	$\int e^x dx = e^x$	$\frac{d}{dx}(\sin x) = \cos x$
$\int \cos x dx = \sin x$	$\int u dv = uv - \int v du$	$\int_0^{\infty} x^n e^{-x} dx = n!$
$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} (n \neq -1)$	$\int_0^{\infty} x^n e^{-ax} dx = \frac{n!}{a^{n+1}}$	
$\int \sin x dx = -\cos x$	$\int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}$	

Значения фундаментальных констант

Гравитационная постоянная	$G = 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Скорость света в вакууме	$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 12,5663706144 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Постоянная Планка	$h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Отношение массы протона к массе электрона	$m_p/m_e = 1836,15152$
Элементарный заряд	$e^- = 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Отношение заряда электрона к его массе	$e^- / m_e = 1,7588047 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Фарадея	$F = 96,48456 \cdot 10^3 \text{ Кл/моль}$
Молярная газовая постоянная	$R = 8,31441 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$
Молярный объем идеального газа при нормальных условиях	$V_0 = 22,41383 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Ускорение свободного падения на уровне моря и широте 45°	$g = 9.80665 \text{ м/с}^2$
Нормальное атмосферное давление	$P_0 = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$
Точка плавления льда	$273,15^\circ \text{ К}$
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{К}^4 \cdot \text{с}$
Постоянная Вина	$b = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Постоянная Ридберга	$R = 10\,967\,758 \text{ м}^{-1}$

Греческий алфавит

Α α – альфа	Η η – эта	Ν ν – ню	Τ τ – тау
Β β – бета	Θ θ – тэта	Ξ ξ – кси	Υ υ – ипсилон
Γ γ – гамма	Ι ι – йота	Ο ο – омикрон	Φ φ – фи
Δ δ – дельта	Κ κ – каппа	Π π – пи	Χ χ – хи
Ε ε – эпсилон	Λ λ – ламбда	Ρ ρ – ро	Ψ ψ – пси
Ζ ζ – дзета	Μ μ – мю	Σ σ – сигма	Ω ω – омега

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Приставка	Обозначение
1 000 000 000 000=10 ¹²	тера	Т
1 000 000 000=10 ⁹	гига	Г
1 000 000=10 ⁶	мага	М
1 000=10 ³	кило	к
100=10 ²	гекто	г
10=10 ¹	дека	да
0,1=10 ⁻¹	деци	д
0,01=10 ⁻²	санتي	с
0,001=10 ⁻³	милли	м
0,000001=10 ⁻⁶	микро	мк
0,000000001=10 ⁻⁹	нано	н
0,000000000001=10 ⁻¹²	пико	п
0,000000000000001=10 ⁻¹⁵	фемто	ф
0,000000000000000001=10 ⁻¹⁸	атто	а

Дополнительные единицы СИ

Величина	Единица	
	Наименование	Обозначение
Плоский угол	радиан	рад
Телесный угол	стерадиан	ср

Международная система единиц СИ

Величина		Единица			
		Наименование	Обозначение		Определение
наименование	Размерность		русское	международное	
Длина	L	метр	м	m	Метр – единица длины равная, расстоянию, проходящему в вакууме плоской электромагнитной волной за 1/299792458 доли секунды.
Масса	M	килограмм	кг	kg	Килограмм – единица массы, равная массе международного прототипа килограмма.
Время	T	секунда	с	s	Секунда – единица времени равная 9192631770 периода излучения атома цезия -133.
Сила электрического тока	I	ампер	A	A	Ампер –проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывает между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.
Термодинамическая температура	θ	Кельвин	К	K	Кельвин – единица термодинамической температуры, равная 1/273,16 термодинамической температуры тройной точки воды.
Количество вещества	ν	моль	моль	mol	Моль – единица количества вещества, в которой содержится столько же структурных элементов сколько содержится атомов в углероде C ¹² , массой 0,012 кг.

Сила света	J	кандела	кд	cd	Кандела – единица силы света, равная силе света в данном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частотой 540 ТГц, сила излучения которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср.
------------	---	---------	----	----	---

Таблица производных единиц физических величин

Наименование величины	Единица		
	Определяющее уравнение	Обозначения	Наименование и определение
Единицы геометрических и механических величин			
Площадь	$S = l^2$	м ²	<i>Квадратный метр</i> равен площади квадрата со сторонами, длины которых равны 1 м
Объем	$V = l^3$	м ³	<i>Кубический метр</i> равен объему куба с ребрами, длины которых равны 1 м
Скорость	$v = \frac{s}{t}$	м/с	<i>Метр в секунду</i> равен скорости равномерного и прямолинейного движения, при котором точка за 1 с перемещается на расстояние 1 м
Ускорение	$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	м/с ²	<i>Метр на секунду в квадрате</i> равен ускорению прямолинейного движения точки, при котором за 1 с скорость точки изменяется на 1 м/с
Угловая скорость	$\omega = \frac{\varphi}{t}$	рад/с	<i>РадIAN в секунду</i> равен угловой скорости равномерно вращающегося тела, все точки которого за 1 с поворачиваются на угол 1 рад

Угловое ускорение	$\varepsilon = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$	рад/с ²	<i>Радан на секунду в квадрате</i> равен угловому ускорению равноускоренно вращающегося тела, при котором оно за 1 с изменит угловую скорость на 1 рад/с
Частота периодического процесса	$\nu = \frac{1}{T}$	Гц	<i>Герц</i> равен частоте периодического процесса, при которой за 1 с совершается один цикл процесса
Плотность	$\rho = \frac{m}{V}$	кг/м ³	<i>Килограмм на кубический метр</i> равен плотности однородного вещества, масса которого при объеме 1 м ³ равна 1 кг
Сила	$F = ma$	Н	<i>Ньютон</i> равен силе, сообщаемой телу массой 1 кг ускорение 1 м/с ² в направлении действия силы: $1\text{Н} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2$
Импульс	$p = mv$	кг · м/с	<i>Килограмм- метр на секунду</i> равен импульсу материальной точки массой 1 кг, движущейся со скоростью 1 м/с
Давление	$p = \frac{F}{S}$	Па	<i>Паскаль</i> равен давлению, создаваемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м ² : $1\text{Па} = 1\text{Н/м}^2$
Работа, энергия	$A = Fs$	Дж	<i>Джоуль</i> равен работе, совершаемой силой 1 Н на пути 1м: $1\text{Дж} = 1\text{Н} \cdot \text{м}$

Мощность	$N = \frac{A}{t}$	Вт	<i>Ватт</i> равен мощности, при которой за время 1 с совершается работа 1 Дж : $1\text{Вт}=1\text{Дж}/\text{с}$
Момент инерции	$J = mr^2$	Н · м	<i>Ньютон-метр</i> равен моменту силы, равной 1 Н, относительно точки, расположенной на расстоянии 1 м от линии действия силы
Момент импульса	$L = mvr$	кг · м ² /с	<i>Килограмм-метр в квадрате на секунду</i> равен моменту импульса материальной точки, движущейся по окружности радиусом 1 м и имеющей импульс 1кг · м/с
Градиент скорости	$\left \frac{\Delta v}{\Delta x} \right $	с ⁻¹	<i>Секунда в минус первой степени</i> равна градиенту скорости, при котором скорости слоев жидкости (газа), отстоящих друг от друга на расстоянии 1 м, отличается 1 м/с
Динамическая вязкость	$\eta = \frac{F}{S \left \frac{\Delta v}{\Delta x} \right }$	Па · с	<i>Паскаль – секунда</i> равен динамической вязкости среды, касательное напряжение в которой при ламинарном течении и градиенте скоростей слоев, находящихся на расстоянии 1 м по нормали направлению скорости, равной 1м/с : $1\text{Па} \cdot \text{с} = 1\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$
Кинематическая вязкость	$\nu = \frac{\eta}{\rho}$	м ² /с	<i>Квадратный метр на секунду</i> равен кинематической вязкости среды с динамической вязкостью 1Па · с и плотностью 1кг/м ³

Единицы тепловых величин			
Количество теплоты, внутренняя энергия	q	Дж	<i>Джоуль</i> равен количеству теплоты, эквивалентному работе 1 Дж
Тепловой поток (тепловая мощность)	Φ	Вт	<i>Ватт</i> равен тепловому потоку, эквивалентному механической мощности 1 Вт
Градиент температуры	$\left \frac{\Delta T}{\Delta x} \right $	К/м	<i>Кельвин на метр</i> равен температурному градиенту поля, в котором на участке длиной 1 м в направлении градиента температура изменяется на 1 К
Теплопроводность	$\lambda = \frac{q}{S \left \frac{\Delta T}{\Delta x} \right }$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	<i>Ватт на метр – кельвин</i> равен теплопроводности вещества, в котором при стационарном режиме с поверхностной плотностью потока 1 Вт/м ² устанавливается температурный градиент 1 К/м
Теплоемкость системы	$C = \frac{dq}{dt}$	Дж/К	<i>Джоуль на кельвин</i> равен теплоемкости системы, температура которой повышается на 1 К при подведении к системе количества теплоты 1 Дж
Удельная теплоемкость	$c = \frac{dq}{mdt}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	<i>Джоуль на килограмм-кельвин</i> равен удельной теплоемкости вещества, имеющего при массе 1 кг теплоемкость Дж/К
Молярная теплоемкость	$c_m = \frac{dq}{vdt}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$	<i>Джоуль на моль – кельвин</i> равен молярной теплоемкости вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль теплоемкости 1 Дж/К

Энтропия	$\frac{\delta q}{T}$	Дж/К	<i>Джоуль на кельвин</i> равен изменению энтропии системы, которой при температуре n К в изотермическом процессе сообщается количество теплоты n Дж
Поверхностное натяжение	$\sigma = \frac{F}{l}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$	<i>Ньютон на метр</i> равен поверхностному натяжению жидкости, 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 СИ, имеющие собственные наименования

Величина	Единица		Выражение производной единицы	
	Наименование	Обозначение	Через другие единицы СИ	Через основные единицы СИ
Частота	герц	Гц		с^{-1}
Сила	ньютон	Н		$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Давление	паскаль	Па	$\text{Н}/\text{м}^2$	$\text{м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Энергия, работа, кол-во теплоты	джоуль	Дж	$\text{Н} \cdot \text{м}$	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Мощность, поток энергии	ватт	Вт	$\text{Дж}/\text{с}$	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$
Кол-во электричества, электрический заряд	кулон	Кл	$\text{А} \cdot \text{с}$	$\text{с} \cdot \text{А}$
Электрическое напряжение, электрический потенциал	вольт	В	$\text{Вт}/\text{А}$	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}$
Электрическая ёмкость	фарада	Ф	$\text{Кл}/\text{В}$	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2$
Электрическое сопротивление	ом	Ом	$\text{В}/\text{А}$	$\frac{\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}}{\text{А}^2}$
Электрическая проводимость	сименс	См	$\text{А}/\text{В}$	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{А}^2$
Поток магнитной индукции	вебер	Вб	$\text{В} \cdot \text{с}$	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
Магнитная индукция	тесла	Т	$\text{Вб}/\text{м}^2$	$\text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
Индуктивность	генри	Г	$\text{Вб}/\text{А}$	$\frac{\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}}{2}$
Световой поток	люмен	лм		$\text{кд} \cdot \text{ср}$
Освещенность	люкс	лк		$\text{м}^{-2} \cdot \text{кд} \cdot \text{ср}$

Внесистемные единицы измерений и их перевод в единицы СИ

Единица	Обозначение	Перевод в единицы СИ
микрон	мкм	$1 \cdot 10^{-6}$ м
ангстрем	Å	$1 \cdot 10^{-10}$ м
световой год	св.год	$9,46 \cdot 10^{15}$ м
парсек	пк	$3,09 \cdot 10^{16}$ м
литр	л	$1 \cdot 10^{-3}$ м ³
атомная единица массы	а.е.м.	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
тонна	т	1000 кг
минута	мин	60 с
час	ч	3600 с
сутки	сут	86400 с
секунда	"	$4,85 \cdot 10^{-6}$ рад
минута	'	$2,9 \cdot 10^{-4}$ рад
градус	°	0,017 рад
оборот	об	6,28 рад
полный телесный угол	-	12,57 ср
оборот в секунду	об/с	1 с^{-1}
оборот в минуту	об/мин	$0,0167 \text{ с}^{-1}$
километр в час	км/ч	0,278 м/с
оборот в секунду	об/с	6,28 рад/с
оборот в минуту	об/мин	0,105 рад/с
миллиметр ртутного столба	мм. рт. ст.	133 Па
бар	бар	$1 \cdot 10^5$ Па
киловатт-час	кВт · ч	$3,6 \cdot 10^6$ Дж
электрон-вольт	эВ	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж
ампер-час.	А · ч	$3,6 \cdot 10^{-3}$ Кл
калория	кал	$4,19 \cdot 10^6$ Дж
рентген	Р	$2,58 \cdot 10^{-3}$ Кл/кг
рад	рад	0,01 Дж/кг
кюри	Ки	$3,7 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$
распад в секунду	расп./с	1 с^{-1}

Диаметры атомов и молекул в нм

Гелий	0,20	Кислород	0,30
Водород	0,23	Азот	0,30

Плотность газов, кг/м³, при давлении 101,3 кПа и температуре $t = 0$ °С

Воздух	1,29
Азот	1,25
Кислород	1,43
Водород	$9 \cdot 10^{-2}$
Углекислый газ	1,89
Хлор	3,21

Свойства упругости некоторых твердых тел

Вещество	Предел прочности, МПа	Модуль Юнга, ГПа
Алюминий	110	69
Железо	294	196
Медь	245	118
Свинец	20	15,7
Серебро	290	74
Сталь	785	216

Скорость звука в различных средах

Среда	$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м/с}$	Среда	$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м/с}$
Воздух	0	331	Ртуть	20	1451
Азот	0	334	Спирт метиловый	20	1123
Аммиак	0	415	Алюминий	20	5080
Водород	0	1284	Медь	20	3710
Гелий	0	965	Железо	20	5170
Кислород	0	316	Стекло кварцевое	20	5370
Углек. газ	0	259	Дерево ель	0	4800
Ацетон	20	1192	Дерево пробковое	-	430-530
Вода пресная	25	1497	Каучук	-	50
Вода морская	17	1510-1550			

Плотности некоторых веществ

Твердые тела	$\rho \cdot 10^{-3}$	Жидкости	$\rho \cdot 10^{-3}$	Газы	$\rho \cdot 10^{-3}$
Платина	21,5	Ртуть	13,6	Хлор	3,21
Золото	19,3	Вода	1	Кислород	1,43
Вольфрам	18,8	Масло растительное	0,92	Воздух	1,29
Свинец	11,4	Керосин	0,8	Азот	1,25
Серебро	10,5	Спирт этиловый	0,79	Гелий	0,18
Медь	8,9	Эфир этиловый	0,71	Водород	0,09
Латунь	8,7				
Никель	8,6				
Железо	7,8				
Алюминий	2,7				
Лед	0,9				
Дерево сухое	0,7				

Величина силы звука для основных значений шкалы децибел

Вид звука	дБ	Сила звука, мкВт/м
Предел чувствительности человеческого уха	0	10^{-6}
Шопот на расстоянии 1 м.	10	10^{-5}
Шорох листьев в саду; падение капель воды на расстоянии 1 м.	20	10^{-4}
Средний уровень шума в зрительном зале; негромкий разговор	30	10^{-3}
Негромкая музыка. Шум в жилом помещении	40	10^{-2}
Шум в учреждении с открытыми окнами	50	10^{-1}
Средний уровень разговорной речи на расстоянии 1 м.	60	1
Шум мотора грузового автомобиля	70	10
Симфонический оркестр	80	10^2
Автомобильный гудок	90	10^3
Клепальная машина	100	10^4
Пневмомолот	110	10^5
Сильные удары грома, мотор самолета	120	10^6
Болевой предел. Звук уже не слышен	130	10^7

Свойства некоторых твердых тел

Вещество	Температура плавления, °С	Удельная теплоемкость Дж/(кг·К)	Удельная теплота плавления, кДж/кг	Температурный коэффициент линейного расширения, 10^{-5} К^{-1}
Алюминий	659	896	322	2,3
Железо	1530	500	272	1,2
Латунь	900	386	—	1,9
Лед	0	2100	335	—
Медь	1100	395	176	1,6
Олово	232	230	58,6	2,7
Платина	1770	117	113	0,89
Пробка	—	2050	—	—
Свинец	327	126	22,6	2,9
Серебро	960	234	88	1,9
Сталь	1300	460	—	1,06
Цинк	420	391	117	2,9

Скорость звука

Среда	Скорость, м/с
Вода	1450
Воздух (сухой при нормальных условиях)	332

Скорость движения в животном мире

В таблице приведены ориентировочные значения максимальной скорости .

№	Животные	Скорость км/ч	№	Животные	Скорость км/ч
1	Гепард	120			
2	Газель монг.	95			
3	Антилопа гну	80			
4	Страус африканский	80			
5	Тунец	80			
6	Меч-рыба	80			
7	Сокол	64-77			
8	Голубь	60-70			
9	Лев	65			
10	Ласточка	54-63			
11	Заяц-русак	60			
12	Волк	55-60			
13	Галка	46-60			
14	Борзая	58			
15	Муха-слепень	54			
16	Бабочка-бразник	54			
17	Дельфин-афалина	54			

Упругие постоянные. Предел прочности

Материал	Модуль Юнга E , ГПа	Модуль сдвига G , ГПа	Коэффициент Пуассона μ	Предел прочности на разрыв σ_m , ГПа	Сжимае мость β , ГПа ⁻¹
Алюминий	70	26	0,34	0,10	0,014
Медь	130	40	0,34	0,30	0,007
Свинец	16	5,6	0,44	0,015	0,022
Сталь (же- лезо)	200	81	0,29	0,60	0,006
Стекло	60	30	0,25	0,05	0,025
Вода	—	—	—	—	0,49

**Удельная теплоемкость, температура плавления и кипения,
удельная теплота плавления некоторых веществ**

Вещество	Удельная теплоемкость при 20 °С, Дж/(г·К)	Температура плавления, °С	Удельная теплота плавления, Дж/г	Температура кипения, °С
Алюминий	0,92	660,1	321	2330
Азот	1,04	-209,9	25,5	-195,8
Ацетон	2,18	-94,3	82	56,7
Бензол	1,7	5,5	127,1	80,2
Вода	4,19	0	335	100
Водород	14,3	-259,2	58,5	-253
Вольфрам	0,142	3380	-	6000
Гелий	5,23	-272,2	-	-268,9
Глицерин	2,42	-20	176	290
Железо	0,498	1535	27,2	3000
Золото	0,134	1063	66,5	2660
Калий	0,795	63	-	760
Кислород	0,9	-219	13,8	-181
Латунь	0,384	900	-	-
Лед (вода)	2,09	0	335	100
Магний	1,05	650	301	1100
Медь	0,394	1083	176	2582
Никель	0,46	1452	244-306	2800
Олово	0,25	231,9	58,5	2337
Платина	0,117	1769	114	4000
Ртуть	0,138	-38,9	11,7	356,7
Свинец	0,13	327,3	22,4	1750
Серебро	0,234	960,5	88	2100
Спирт (этиловый)	2,42	-117	108	78,3
Сталь	0,46	1300-1400	205	-
Цинк	0,38	419	117	907
Чугун	0,503	1100-1200	96-138	-
Эфир (этиловый)	2,34	-116,3	98,3	34,6

Свойства некоторых жидкостей (при 20 °С)

Вещество	Плотность, 10^3 кг/м^3	Удельная теп- лоемкость, Дж/(кг·К)	Поверхностное натяжение, Н/м
Бензол	0,88	1720	0,03
Вода	1,00	4190	0,073
Глицерин	1,20	2430	0,064
Касторовое масло	0,90	1800	0,035
Керосин	0,80	2140	0,03
Ртуть	13,60	138	0,5
Спирт	0,79	2510	0,02

Критические значения T_k и P_k

Вещество	T_k , К	P_k , МПа	Вещество	T_k , К	P_k , МПа
Водяной пар	647	22,0	Азот	126	3,4
Углекислый газ	304	7,38	Водород	33	1,3
Кислород	154	5,07	Гелий	5,2	0,23
Аргон	151	4,87			

Удельная теплота сгорания

<i>Твердое, Дж/кг</i>		<i>Жидкое, Дж/кг</i>	
Антрацит	$3,03 \cdot 10^7$	Бензин	$4,6 \cdot 10^7$
Бурый уголь	$9,3 \cdot 10^6$	Керосин	$4,31 \cdot 10^7$
Горючие сланцы	$9,6 \cdot 10^6$	Спирт (этиловый)	$2,7 \cdot 10^7$
Древесный уголь	$2,97 \cdot 10^7$	<i>Газообразное, Дж/м³</i>	
Дрова сухие	$1,25 \cdot 10^7$	Водород	$1,05 \cdot 10^7$
Каменный уголь	$2,93 \cdot 10^7$	Коксогаз	$1,64 \cdot 10^7$
Порох	$3 \cdot 10^6$	Окись углерода	$1,3 \cdot 10^7$
Торф	$1,5 \cdot 10^7$	Природный газ	$1,55 \cdot 10^7$
		Светильный газ	$2,1 \cdot 10^7$

Удельная теплота парообразования воды при разных температурах

t , °С	0	50	100	200
r , МДж/кг	2,49	2,38	2,26	1,94

**Удельная теплота парообразования
при температуре кипения и нормальном давлении, Дж/г**

Азот жидкий	199	Керосин	210-230
Ацетон	524	Кислород жидкий	212
Бензин авиационный	230-315	Ртуть	285
Бензол	394	Сероуглерод	356
Вода	2255	Спирт этиловый	921
Водород жидкий	453	Толуол	364
Гелий жидкий	25	Эфир этиловый	351

**Давление водяного пара, насыщающего пространство при разных
температурах**

$t, ^\circ\text{C}$	$P_n, \text{Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$P_n, \text{Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$P_n, \text{Па}$
-5	400	8	1070	40	7335
0	609	9	1145	50	12302
1	656	10	1225	60	19817
2	704	12	1396	70	31122
3	757	14	1596	80	47215
4	811	16	1809	90	69958
5	870	20	2328	100	101080
6	932	25	3165	150	486240
7	1025	30	4229	200	1549890

**Коэффициент теплопроводности λ некоторых веществ,
кДж/(м·ч·К)**

<i>Металлы</i>		<i>Материалы</i>	
Алюминий	755	Бакелитовый лак	1,05
Железо	268	Бумага сухая	0,504
Золото	1126	Гранит	7,93
Латунь	308	Глина (20% влаги)	3,35
Медь	1401	Дуб (поперек волокна, влажность 6-7%)	1,25-1,55
Ртуть	105	Железобетон	5,57
Серебро	1506	Кирпичная кладка (сухая)	2,42-2,93
Сталь	163	Пробковые плиты	0,151-0,193
Чугун	226	Штукатурка (влажность 6-8%)	2,84
<i>Термоизоляторы</i>		<i>Жидкости</i>	
Асбестовая бумага, сухая	0,482-0,637	Ацетон при температуре 0 °С	0,63
Войлок асбестовый	0,188-0,33	Ацетон при температуре 50 °С	0,59
Войлок шерстяной	0,167	Ацетон при температуре 100 °С	0,55
Пенобетон, сухой	0,423-1,15	Вода при температуре 0 °С	1,98
Пенопласт, сухой	0,155-0,21	Вода при температуре 50 °С	2,33
Шлак котельный	0,84-1,34	Вода при температуре 100 °С	2,46
		Спирт этиловый при температуре 0 °С	0,679
		Спирт этиловый при температуре 50 °С	0,637
		Толуол при температуре 0 °С	0,511
		Толуол при температуре 50 °С	0,465
		Толуол при температуре 100 °С	0,428

Коэффициент линейного расширения α твердых тел при температуре $\approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, K^{-1}

Алмаз	$9,1 \cdot 10^{-7}$	Лед (от -10 до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$)	$5,07 \cdot 10^{-5}$
Алюминий	$2,29 \cdot 10^{-5}$	Магний	$2,51 \cdot 10^{-5}$
Бронза	$1,75 \cdot 10^{-5}$	Медь	$1,67 \cdot 10^{-5}$
Висмут	$1,34 \cdot 10^{-5}$	Никель	$1,34 \cdot 10^{-5}$
Вольфрам	$4,3 \cdot 10^{-6}$	Олово	$2,14 \cdot 10^{-5}$
Гранит	$8,3 \cdot 10^{-6}$	Платина	$8,9 \cdot 10^{-6}$
Дерево (вдоль волокон)	$(2-6) \cdot 10^{-6}$	Свинец	$2,83 \cdot 10^{-5}$
Дерево (поперек волокон)	$(5-6) \cdot 10^{-5}$	Сталь нержавеющая	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Железо кованое	$1,19 \cdot 10^{-5}$	Стекло обычное	$8,5 \cdot 10^{-6}$
Золото	$1,45 \cdot 10^{-5}$	Стекло перекс	$3 \cdot 10^{-6}$
Инвар (сплав 63,2% Fe, 36,1% Ni, 0,39% Cu, 0,39% Mn)	$1,5 \cdot 10^{-6}$	Углерод (графит)	$7,9 \cdot 10^{-6}$
Иридий	$6,5 \cdot 10^{-6}$	Фарфор	$3 \cdot 10^{-6}$
Кварц плавленый	$5 \cdot 10^{-7}$	Цемент и бетон	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Кирпичная кладка	$5,5 \cdot 10^{-6}$	Цинк	$3 \cdot 10^{-5}$
Константан	$1,7 \cdot 10^{-5}$	Чугун	$1,04 \cdot 10^{-5}$
Латунь	$1,89 \cdot 10^{-5}$	Эбонит	$7 \cdot 10^{-5}$

Коэффициент объемного расширения жидкостей β при температуре $\approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, K^{-1}

Анилин	$8,5 \cdot 10^{-4}$	Кислота азотная	$1,24 \cdot 10^{-3}$
Ацетон	$1,43 \cdot 10^{-3}$	Нефть	$9,2 \cdot 10^{-4}$
Бензол	$1,06 \cdot 10^{-3}$	Ртуть	$1,81 \cdot 10^{-4}$
Вода при температуре 5-10 $^{\circ}\text{C}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	Сероуглерод	$1,19 \cdot 10^{-3}$
Вода при температуре 10-20 $^{\circ}\text{C}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	Скипидар	$9,4 \cdot 10^{-4}$
Вода при температуре 20-40 $^{\circ}\text{C}$	$3,02 \cdot 10^{-4}$	Спирт метило- вый	$1,19 \cdot 10^{-3}$
Вода при температуре 40-60 $^{\circ}\text{C}$	$4,58 \cdot 10^{-4}$	Спирт этиловый	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Вода при температуре 60-80 $^{\circ}\text{C}$	$5,87 \cdot 10^{-4}$	Хлороформ	$1,28 \cdot 10^{-3}$
Глицерин	$5 \cdot 10^{-4}$	Эфир этиловый	$1,63 \cdot 10^{-3}$
Керосин	$1 \cdot 10^{-3}$		

Эффективный диаметр молекул, динамическая вязкость и теплопроводность газов при нормальных условиях

Вещество	Эффективный диаметр d , нм	Динамическая вяз- кость η , мкПа $\cdot$ с	Теплопровод- ность χ , мВт/(м $\cdot$ К)
Азот	0,38	16,6	24,3
Аргон	0,35	21,5	16,2
Водород	0,28	8,66	16,8
Воздух	—	17,2	24,1
Гелий	0,22	—	—
Кислород	0,36	19,8	24,4
Пары воды	—	8,32	15,8
Хлор	0,45	—	—

Критические параметры и поправки Ван-дер-Вальса

Газ	Критическая температура $T_{кр}, K$	Критическое давление $p_{кр}, MPa$	Поправки Ван-дер-Вальса	
			$a,$ $H \cdot M^4 / \text{МОЛЬ}^2$	$b,$ $10^{-5} M^3 / \text{МОЛЬ}$
Азот	126	3,39	0,135	3,86
Аргон	151	4,86	0,134	3,22
Водяной пар	647	22,1	0,545	3,04
Кислород	155	5,08	0,136	3,17
Неон	44,4	2,72	0,209	1,7
Углекислый газ	304	7,38	0,361	4,28
Хлор	417	7,71	0,65	5,62

Критические параметры и поправки Ван-дер-Ваальса

	$P_k,$ атм	$V_k,$ $M^3 / \text{КМОЛЬ}$	$T_k,$ К	$a,$ $ат \cdot M^6 / \text{КМОЛЬ}^2$	$b,$ $M^3 / \text{КМОЛЬ}$	$R/N_A k$
HCl	86	0,060	324,6	0,922	0,020	0,469
H ₂	13,2	0,065	33,2	0,194	0,022	0,813
He	2,34	0,058	5,2	0,035	0,024	0,821
H ₂ O	225	0,056	647,3	5,65	0,031	0,602
O ₂	51,4	0,075	154,3	1,40	0,032	0,768
N ₂	34,8	0,090	126,0	1,39	0,039	0,782
CO ₂	75	0,096	304,1	3,72	0,043	0,745

Мощности некоторых тепловых двигателей

	кВт	л.с.
Автомобиль ВАЗ-2106	58,8	80
Комбайн (Дон-1500)	162	220
Самолёт Ан-22	44100	60000
Теплоход (Ракета)	880	1200
Тепловоз ТЭП-70	2940	4000
Ракета-носитель (Протон)	570	780

Астрономические постоянные

Радиус Земли	$6,378164 \cdot 10^6 \text{ м}$
Средняя плотность Земли	$5,518 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Масса Земли	$5,976 \cdot 10^{24} \text{ кг}$
Радиус Солнца	$6,9599 \cdot 10^8 \text{ м}$
Средняя плотность Солнца	$1,41 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
Масса Солнца	$1,989 \cdot 10^{30} \text{ кг}$
Радиус Луны	$1,737 \cdot 10^6 \text{ м}$
Масса Луны	$7,35 \cdot 10^{22} \text{ кг}$
Среднее расстояние до Луны	$3,844 \cdot 10^8 \text{ м}$
Среднее расстояние до Солнца (астрономическая единица)	$1,49598 \cdot 10^{11} \text{ м}$
Период обращения Луны вокруг Земли	27 сут 7 ч 43 мин

Учебное издание

КУЗНЕЦОВ Сергей Иванович

Краткий справочник по физике Часть I

**Механика. Механические колебания и волны.
Молекулярная физика и термодинамика.**

Учебное пособие

Научный редактор
доктор педагогических наук, профессор
В.В. Ларионов

Редактор *Н.Т. Синельникова*
Верстка *Л.А. Егорова*

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати Формат 60×84/16.
Бумага «Снегурочка». Печать Хегох.
Усл. печ. л. 13,46. Уч.-изд. л. 12,37.
Заказ . Тираж экз.



Национальный исследовательский
Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru