

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

С.И. Кузнецов

**КРАТКИЙ СПРАВОЧНИК
ПО ФИЗИКЕ**

3-е издание, переработанное, дополненное

**Издательство
Томского политехнического университета
2011**

УДК 53(075.8)

ББК 22.3я73

- Кузнецов С.И.**
К891 Кузнецов С.И. Краткий справочник по физике: учебное пособие / С.И. Кузнецов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – 3-е изд., перераб. доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 44 с.

В справочнике приведены основные законы и формулы по всем разделам физики.

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

Пособие подготовлено на кафедре общей физики ТПУ, соответствует программе курса физики, общеобразовательных учебных заведений и направлено на активизацию научного мышления и познавательной деятельности учащихся.

Предназначено для учащихся средних школ, лицеев, гимназий и подготовки абитуриентов к поступлению в технические вузы. Ориентировано на организацию самостоятельной индивидуальной работы.

УДК 53(075.8)

ББК 22.3я73

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета

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, 2011

© Оформление. Издательство ТПУ, 2011

© Кузнецов С.И., 2011

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

Механика

Кинематика материальной точки

- Уравнение движения материальной точки:

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

- Вектор перемещения:

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

- Модуль вектора перемещения:

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

- Средняя скорость:

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

- Мгновенная скорость:

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

- Модуль скорости:

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

- Среднее ускорение:

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

- Мгновенное ускорение:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \mathbf{i}a_x + \mathbf{j}a_y + \mathbf{k}a_z$$

- Модуль ускорения:

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

- ◆ Полное ускорение при криволинейном движении $\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau$.
- ◆ Тангенциальная составляющая ускорения $a_\tau = \frac{dv}{dt}$.
- ◆ Нормальная составляющая ускорения $a_n = \frac{v^2}{r}$.
- ◆ Кинетическое уравнение равномерного движения материальной точки вдоль оси x $x = x_0 + vt$.
- ◆ Уравнения равнопеременного поступательного движения

$$x = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}; \quad v = v_0 \pm at.$$
- ◆ Кинетическое уравнение равномерного вращения:

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t.$$
- ◆ Угловая скорость $\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$.
- ◆ Угловое ускорение $\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$.
- ◆ Период вращения $T = \frac{2\pi}{\omega}$.
- ◆ Частота вращения $\nu = \frac{1}{T}$.
- ◆ Циклическая частота вращения $\omega = 2\pi\nu$.
- ◆ Уравнения равнопеременного вращательного движения

$$\omega = \omega_0 \pm \varepsilon t, \quad \varphi = \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2}.$$
- ◆ Связь между линейными и угловыми величинами при вращательном движении $S = R\varphi, \quad v = R\omega, \quad a_\tau = R\varepsilon, \quad a_n = R\omega^2$.

2. Динамика материальной точки

- ◆ Импульс (количество движения) $\vec{p} = m\vec{v}$.
- ◆ Закон сохранения импульса (для замкнутой системы) $\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = \text{const.}$
- ◆ Второй закон Ньютона $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$.
- ◆ Третий закон Ньютона $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.

- ♦ Центр масс системы материальных точек $\vec{r}_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n r_i m_i$.
- ♦ Импульс системы тел $\vec{p} = m\vec{v}_c$.
- ♦ Теорема о движении центра масс $\vec{a}_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n F_{i \text{ внеш}}$.

3. Силы в механике

- ♦ Связь веса тела с силой тяжести и реакцией опоры $\vec{G} = m\vec{g} = -\vec{R}$.
- ♦ Соотношение между весом, силой тяжести и ускорением $G = m(g \pm a)$.
- ♦ Сила трения скольжения $F_{mp} = \mu N$.
- ♦ Для тела на наклонной плоскости

$$F_{тр} = \mu mg \cos \alpha, \quad F = mg \sin \alpha, \quad a = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha).$$
- ♦ Уравнение Ньютона для неинерциальной системы $m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{ин}$.
- ♦ Центробежная сила $F_{цб} = ma_{цб} = m \frac{v^2}{R}$.
- ♦ Центробежная сила $F_{цб} = ma_n = m\omega^2 R$.
- ♦ Сила Кориолиса $\vec{F}_k = 2m[\vec{v}, \vec{\omega}]$.
- ♦ Закон Гука для пружины $F_{упр} = -kx$.
- ♦ Связь между силой и потенциальной энергией $\vec{F} = -\frac{dU}{d\vec{r}}$.
- ♦ Потенциальная энергия упругой пружины $U = \frac{kx^2}{2}$.
- ♦ Работа, совершённая пружиной $A = -\frac{kx^2}{2}$.
- ♦ Напряжение $\sigma = \frac{F_{упр}}{S}$.
- ♦ Приращение длины $\Delta l = \frac{l_0 \sigma}{E}$.
- ♦ Относительное продольное растяжение (сжатие) $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\sigma}{E}$.
- ♦ Относительное поперечное растяжение (сжатие) $\varepsilon' = \frac{\Delta d}{d_0}$.

- ♦ Коэффициент Пуассона $\mu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$.
- ♦ Закон Гука для стержня $\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma$.
- ♦ Модуль Юнга $E = \frac{Fl_0}{S\Delta l}$.
- ♦ Объемная плотность потенциальной энергии $w_0 = \frac{\sigma^2}{2E}$.

4. Энергия. Работа. Законы сохранения

- ♦ Кинетическая энергия $K = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}$.
- ♦ Изменение кинетической энергии $\Delta K = A$.
- ♦ Работа переменной силы на участке траектории 1–2 $A = \int_1^2 F \cos \alpha ds$.
- ♦ Мгновенная мощность $N = \frac{dA}{dt} = Fv$.
- ♦ Средняя мощность $\langle N \rangle = \frac{A}{\Delta t}$.
- ♦ Работа консервативных сил $A = U_1 - U_2$.
- ♦ Потенциальная энергия тела при гравитационном взаимодействии $U = mgh$.
- ♦ Гравитационное взаимодействие между массами m и M $U = -\gamma \frac{Mm}{r}$.
- ♦ Полная механическая энергия системы $E = K + U$.
- ♦ Закон сохранения полной механической энергии (для замкнутой системы) $K + U_{\text{внутр}} = E = \text{const}$.
- ♦ Скорость шаров массами m_1 и m_2 после абсолютного упругого центрального удара

$$v_1' = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2v_2}{m_1 + m_2} \quad \text{и} \quad v_2' = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1v_1}{m_1 + m_2}.$$
- ♦ Скорость шаров после абсолютного неупругого удара

$$v = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2}.$$

- ♦ Закон сохранения импульса при движении ракеты $m_p v_p = m_r v_r$.
- ♦ Формула Циолковского $v_p = -v_r \ln \frac{M_0}{M}$.

5. Динамика вращательного движения твёрдого тела

- ♦ Момент силы $\vec{M}_i = [\vec{r}_i, \vec{F}_i]$ или $M = Fr \sin \alpha = Fl$.
- ♦ Момент импульса относительно точки $\vec{L} = [\vec{r}, \vec{p}] = [\vec{r}, m\vec{v}]$.
- ♦ Основной закон динамики вращательного движения относительно точки $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}^{\text{внеш}}$.
- ♦ Момент импульса относительно неподвижной оси $L_z = \sum_{i=1}^n m_i v_i r_i = I_z \omega$.
- ♦ Уравнение динамики вращательного движения твёрдого тела $M = I\epsilon$.
- ♦ Закон сохранения момента импульса $\vec{L} = \text{const}$ или $I\vec{\omega} = \text{const}$.
- ♦ Момент инерции системы (тела) $I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$ или $I = \int_0^m R^2 dm$.
- ♦ Момент инерции полого и сплошного цилиндров (или диска) относительно оси симметрии $I_c = mR^2$, $I_c = \frac{1}{2} mR^2$.
- ♦ Момент инерции шара и сферы $I_c = \frac{2}{5} mR^2$, $I_c = \frac{2}{3} mR^2$.
- ♦ Момент инерции тонкого стержня относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его середину $I_c = \frac{1}{12} ml^2$.
- ♦ Момент инерции тонкого стержня относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его конец $I_c = \frac{1}{3} ml^2$.
- ♦ Теорема Штейнера $I = I_c + md^2$.
- ♦ Кинетическая энергия вращающегося тела $K_{\text{вр}} = \frac{I\omega^2}{2}$.
- ♦ Полная кинетическая энергия катящегося тела $K = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}$.
- ♦ Закон сохранения энергии для тела катящегося с высоты h

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

6. Теория тяготения Ньютона

- ♦ Закон всемирного тяготения $F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$ или $\vec{F} = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$.
- ♦ Потенциальная энергия тела массы m , расположенного на расстоянии r от большого тела массы M $U = -\gamma \frac{Mm}{r}$.
- ♦ Напряжённость поля тяготения $\vec{G} = \frac{\vec{F}}{m}$.
- ♦ Потенциал поля тяготения $\varphi = \frac{U}{m} = -\gamma \frac{M}{R}$.
- ♦ Взаимосвязь между потенциалом поля тяготения и его напряжённостью $\vec{G} = -\text{grad}\varphi$.
- ♦ Работа по перемещению тела в гравитационном поле

$$A = m \left(\gamma \frac{M}{r_2} - \gamma \frac{M}{r_1} \right) = U_1 - U_2.$$

- ♦ Потенциальная энергия тела массой m на расстоянии r от Земли

$$U - U_3 = mgR_3^2 \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{r} \right).$$

- ♦ Полная энергия тела в гравитационном поле

$$E = K + U = \frac{mv^2}{2} - \gamma \frac{Mm}{r} = \text{const.}$$

7. Законы Кеплера

- ♦ Второй закон Кеплера $\frac{dS}{dt} = \text{const.}$
- ♦ Третий закон Кеплера $\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3}$.
- ♦ Первая космическая скорость $v_1 = \sqrt{gR}$.
- ♦ Вторая космическая скорость $v_2 = \sqrt{2gR}$.

8. Специальная теория относительности (СТО)

- ♦ Преобразования Галилея
 $x = x' + vt$, $y = y'$, $z = z'$, $t = t'$ или $\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t$.
- ♦ Закон сложения скоростей в классической механике $u = v' + v$.
- ♦ Преобразования Лоренца

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad y = y'; \quad z = z'; \quad t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

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

♦ Релятивистское (Лоренцево) сокращение длины стержня $l = l_0 \sqrt{1 - v/c^2}$

♦ Релятивистское замедление хода часов $\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$

♦ Релятивистский закон сложения скоростей $u = \frac{v' + v}{1 + \frac{v'v}{c^2}}.$

♦ Масса релятивистской частицы $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$

♦ Релятивистское выражение для импульса $\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$

♦ Связь между полной энергией и импульсом релятивистской частицы $E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}.$

♦ Релятивистское выражение для энергии $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$

♦ Кинетическая энергия релятивистской частицы

$$K = E - E_0 = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right).$$

♦ Закон взаимосвязи массы и энергии $E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$

♦ Энергия покоя $E_0 = mc^2.$

♦ Взаимосвязь массы и энергии покоя $\Delta E_0 = \Delta mc^2.$

♦ Масса образовавшейся частицы $M = \frac{2m}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} > 2m.$

♦ Энергия связи $E_{\text{св}} = c^2 \Delta M.$

- ♦ Дефект массы $\Delta M = \sum m_i - M$.
- ♦ Условие существования черной дыры $\frac{m_\gamma c^2}{2} \leq G \frac{m_\gamma M}{r_g}$
- ♦ Размеры черной дыры $r_g \leq G \frac{2M}{c^2}$.

9. Механика жидкостей и газов

- ♦ Давление $P = \frac{F}{S}$.
- ♦ Уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости $Sv = \text{const.}$
- ♦ Уравнение Бернулли $\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + P = \text{const.}$
- ♦ Соотношение для гидравлического пресса $\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}$.
- ♦ Закон сообщающихся сосудов $\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$.
- ♦ Архимедова сила $F_A = \rho g V$.
- ♦ Формула Торричелли $v = \sqrt{2gh}$.
- ♦ Формула Стокса $F = 6\pi\eta r v$.
- ♦ Формула Пуазейля $V = \pi R^4 \Delta P t / (8\eta l)$.
- ♦ Формула Лапласа для произвольной поверхности $\Delta P = \sigma(1/R_1 + 1/R_2)$.
- ♦ Формула Лапласа для сферической поверхности $\Delta P = 2\sigma/R$.
- ♦ Высота подъема жидкости в капиллярной трубке $h = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho g r}$.
- ♦ Поверхностное натяжение $\sigma = \frac{F}{lb}$ или $\sigma = \frac{\Delta E}{\Delta S}$.

Часть II. Молекулярная физика. Термодинамика

1. Молекулярно-кинетическая теория

- ♦ Молярная масса вещества $\mu = A m_{\text{ед}} N_A$ или $\mu = \frac{m}{\nu}$.
- ♦ Атомная масса $A = \frac{m_A}{m_{\text{ед}}}$.

- ♦ Атомная единица массы $m_{\text{ед}} = \frac{1}{12m_C} 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$
- ♦ Число Авогадро $N_A = \frac{\mu}{M \cdot m_{\text{ед}}} = 6,023 \cdot 10^{26} \frac{1}{\text{моль}}.$
- ♦ Число Лошмидта $N_L = \frac{P_0}{kT_0} = 2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$
- ♦ Концентрация частиц $n = \frac{N}{V}.$
- ♦ Универсальная газовая постоянная $R = kN_A = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$
- ♦ Нормальные условия $P_0 = 10^5 \text{ Па}; T_0 = 273 \text{ К}.$
- ♦ Давление на поверхность $P = \frac{\Delta F}{\Delta S}.$
- ♦ Давление газа на стенку сосуда $P = \frac{F}{S} = \frac{1}{3} m_0 v_x^2.$
- ♦ Основное уравнение МКТ $P = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle = nkT = \frac{1}{3} n m_0 \langle v_{\text{кв}}^2 \rangle.$
- ♦ Абсолютная температура $T = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{3k}.$
- ♦ Объем газа в трубке газового термометра $V = \frac{nk}{P_0} T.$
- ♦ Изохорический процесс. Закон Шарля $\frac{P}{T} = \text{const}$ при $V, m = \text{const}.$
- ♦ Уравнение изохорического процесса для температуры по шкале Цельсия $P = P_0(1 + \alpha t).$
- ♦ Изобарический процесс. Закон Гей-Люссака $\frac{V}{T} = \text{const},$
при $P, m = \text{const}$
- ♦ Изотермический процесс. Закон Бойля – Мариотта $PV = \text{const},$
при $T, m = \text{const}.$
- ♦ Адиабатический процесс (изоэнтропийный) $S = \text{const}, \Delta S = 0.$
- ♦ Политропический процесс $C = \text{const}.$
- ♦ Закон Дальтона $P_{\text{см}} = P_1 + P_2 + \dots + P_n.$
- ♦ Объединенный газовый закон (закон Клапейрона) $\frac{PV}{T} = \text{const}.$

- ♦ Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева – Клапейрона) $PV = \frac{m}{\mu} RT = \nu RT$; для смеси газов

$$PV = \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \frac{m_n}{\mu_n} \right) RT.$$

2. Распределение газовых молекул по скоростям и энергиям

- ♦ Скорость звука в газе $v_{зв} = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}}$.

- ♦ Наиболее вероятная скорость $v_{вер} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$ или $v_{вер} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$.

- ♦ Средняя квадратичная скорость $v_{кв} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$ или $v_{кв} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$.

- ♦ Средняя арифметическая скорость $v_{ср} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$ или $v_{ср} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}$.

- ♦ Относительная скорость $u = \frac{v}{v_{вер}}$.

- ♦ Функция распределения Максвелла

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

- ♦ Функция распределения Максвелла для относительных скоростей

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

- ♦ Функция распределения Максвелла по импульсам

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

- ♦ Функция распределения молекул по энергиям теплового движения

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

- ♦ Плотность газа $\rho = \frac{P\mu}{RT}$.

- ♦ Барометрическая формула $P = P_0 \exp\left(-\frac{\mu gh}{RT}\right)$.

- ♦ Распределение Больцмана $n = n_0 \exp\left(-\frac{U}{kT}\right)$.
- ♦ Закон Максвелл – Больцмана $dn = n_0 A \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$.

3. Элементы физической кинетики

- ♦ Эффективное сечение молекулы $\sigma = \pi d^2$.
- ♦ Среднее число столкновения молекулы за 1 с $\langle \nu \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle$.
- ♦ Средняя длина свободного пробега молекул

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\nu} = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 P} = \frac{kT}{\sqrt{2} \sigma P}.$$

- ♦ Коэффициент диффузии $D = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle$.
- ♦ Уравнение Фика для диффузии $J = -D \frac{dn}{dx}$ или $J = -D \text{grad} n$
- ♦ Динамическая вязкость $\eta = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle n m$ или $\eta = D \rho$.
- ♦ Уравнение Ньютона для внутреннего трения (вязкости)

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

- ♦ Средняя энергия молекулы $K = \frac{m \langle v \rangle^2}{2} = \frac{i}{2} kT$.
- ♦ Уравнение Фурье для теплопроводности $q = -\chi \frac{dT}{dx} = -\chi \text{grad} T$.
- ♦ Коэффициент теплопроводности

$$\chi = \frac{1}{3} \lambda \langle v_T \rangle n \frac{i}{2} k = \frac{1}{3} \lambda \langle v_T \rangle \rho C_{V \text{ уд}} = D \rho C_{\text{уд}}.$$

4. Первое начало термодинамики. Внутренняя энергии. Работа и теплота

- ♦ Первое начало термодинамики $\delta Q = dU + \delta A$.
- ♦ Внутренняя энергия одного моля идеального газа равна $U = \frac{3}{2} RT$.
- ♦ Внутренняя энергия произвольной массы газа $U = \frac{m}{M} \frac{i}{2} RT = \nu \frac{i}{2} RT$.
- ♦ Удельная теплоемкость $C_{\text{уд}} = \frac{dQ}{dT}$.

- ◆ Молярная теплоемкость $C_\mu = C_{уд}\mu$.
- ◆ Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме $C_V = \frac{i}{2}R$.
- ◆ Молярная теплоемкость газа при постоянном давлении $C_p = \frac{i+2}{2}R$.
- ◆ Уравнение Майера $C_p = C_V + R$
- ◆ Коэффициент Пуассона $\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}$.
- ◆ Внутренняя энергия одноатомного газа $U = \frac{m}{\mu} \frac{R}{\gamma-1} T = \frac{PV}{\gamma-1}$.
- ◆ Закон Больцмана о равномерном распределении энергии $\langle K \rangle = \frac{i}{2}kT$.
- ◆ Работа газа при изменении его объема $\delta A = p dV$.
- ◆ Количество теплоты, сообщенное в изохорическом процессе $Q = C_V(T_2 - T_1)$.
- ◆ Изменение внутренней энергии в изохорическом процессе $dU = \delta Q$.
- ◆ Теплоемкость в изохорическом процессе $C_V = \frac{m}{\mu} \frac{R}{\gamma-1} = \frac{i}{2}R$.
- ◆ Работы в изобарическом процессе $A = P(V_2 - V_1) = \frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1)$.
- ◆ Количество теплоты, сообщенное в изобарическом процессе $Q = C_p(T_2 - T_1) = \frac{m}{\mu} R \Delta T \left(\frac{i}{2} + 1 \right)$.
- ◆ Изменение внутренней энергии в изобарическом процессе $\Delta U = C_V(T_2 - T_1) = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T$.
- ◆ Теплоемкость в изобарическом процессе $C_p = \frac{m}{\mu} \frac{\gamma R}{\gamma-1} = \frac{m}{\mu} \frac{dQ}{dT}$.
- ◆ Работа газа при изобарном расширении $A = p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$.
- ◆ Работа газа в изотермическом процессе $A = Q = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{P_1}{P_2}$.
- ◆ Уравнение адиабатического процесса (уравнение Пуассона)

$$PV^\gamma = \text{const}, TV^{\gamma-1} = \text{const}, T^\gamma P^{1-\gamma} = \text{const}.$$

- ♦ Работа газа при адиабатическом расширении

$$A = -\Delta U = \frac{m}{\mu} C_V (T_1 - T_2)$$

5. Круговые процессы. Тепловые машины

- ♦ Термический КПД для кругового процесса $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$.
- ♦ Термический КПД цикла Карно $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$.
- ♦ Термический КПД необратимого цикла $\eta_{\text{необр}} = 1 - \frac{T_2 - \Delta T}{T_1 - \Delta T}$.
- ♦ Работа тепловой машины $A = Q_1 - Q_2$.
- ♦ Изотермическое расширение цикла Карно $A_1 = Q_1 = \frac{m}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_1}{V_2}$.
- ♦ Адиабатическое расширение цикла Карно $A_2 = \frac{R}{\gamma - 1} (T_1 - T_2)$.
- ♦ Изотермическое сжатие цикла Карно $A_3 = -Q_3 = -\frac{m}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_2}{V_1}$.
- ♦ Адиабатическое сжатие цикла Карно $A_4 = \frac{R}{\gamma - 1} (T_1 - T_2)$.

6. Второе и третье начала термодинамики

- ♦ Приведённая теплота $Q' = \frac{Q}{T}$.
- ♦ Энтропия $dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{обр}}$.
- ♦ Равенство Клаузиуса $\Delta S_{\text{обр}} = 0$ или $\oint \frac{\delta Q_{\text{обр}}}{T} = 0$ или $TdS = \delta Q$.
- ♦ Неравенство Клаузиуса $\Delta S_{\text{необр}} > 0$, или $\oint \frac{\delta Q_{\text{необр}}}{T} > 0$ или $Tds > \delta Q$.
- ♦ Для произвольного процесса: $dS \geq \frac{\delta Q}{T}$.
- ♦ Математическое выражение второго начала термодинамики: $dS \geq 0$.
- ♦ Первое и второе начала термодинамики $TdS \geq dE_{\text{п}} + \delta A$.
- ♦ Изменение энтропии в изопроцессах:

- *изохорический процесс*: $\Delta S = \frac{m}{\mu} C_V \ln \frac{T_2}{T_1}$, т.к. $V_1 = V_2$;
- *изобарический процесс*: $\Delta S = \frac{m}{\mu} \int_{T_1}^{T_2} C_P \frac{dT_2}{T_1} = \frac{m}{\mu} C_P \ln \frac{T_2}{T_1}$, т.к. $P_1 = P_2$;
- *изотермический процесс*: $\Delta S = \frac{m}{\mu} R \ln \frac{V_2}{V_1}$, т.к. $T_1 = T_2$;
- *адиабатический процесс*: $\Delta S = 0$, т.к. $\delta Q = 0$.
- ◆ Количество теплоты $Q = Cm(T_2 - T_1)$.
- ◆ Процессы изменения агрегатного состояния вещества:
 - *закон плавления и кристаллизации*: $\delta Q = \pm \lambda dm$;
 - *изменение энтропии при плавлении и кристаллизации*:

$$\Delta S = \pm \lambda m / T_{пл}$$
;
 - *закон испарения и конденсации*: $\delta Q = \pm r dm$;
 - *изменение энтропии при испарении и конденсации* $\Delta S = \pm rm / T_k$;
- ◆ Внутренняя энергия системы $U = F + TS$.
- ◆ Энергетическая потеря в изолированной системе $\Pi = T_{мин} \Delta S$.
- ◆ Статистический смысл энтропии $S = k \ln W$
- ◆ Третье начало термодинамики $S_{T=0} = k \ln W = 0$.

7. Термодинамические свойства реальных газов

- ◆ Уравнение состояние идеального газа $PV = \nu RT$.
- ◆ Уравнение Ван-дер-Ваальса для реального газа

$$\left(P + \frac{\nu^2 a}{V^2} \right) (V - \nu b) = \nu RT,$$
- ◆ Связь критических параметров

$$V_x = 3b, \quad P_x = a/(27b^2), \quad T_x = 8a/(27Rb).$$
- ◆ Внутренняя энергия произвольной массы реального газа

$$U = \nu(C_V T - a/V_m),$$
- ◆ Энтальпия системы $U_1 + p_1 V_1 = U_2 + p_2 V_2$,

Часть III. Электростатика и постоянный ток

1. Электростатическое поле в вакууме

- ◆ Закон Кулона $\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}; \quad F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2}.$

- ♦ Закон сохранения заряда $\sum q_i = \text{const.}$
- ♦ Напряженность электростатического поля $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}; \quad E = \frac{F}{q} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$
- ♦ Принцип суперпозиции $\vec{E} = \sum \vec{E}_i.$
- ♦ Результирующая напряженность электростатического поля двух зарядов $E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_1 E_2 \cos \alpha}.$
- ♦ Линейная плотность заряда $\lambda = dq/dl.$
- ♦ Поверхностная плотность заряда $\sigma = dq/dS.$
- ♦ Объемная плотность заряда $\rho = dq/dV.$
- ♦ Электрический момент диполя $\vec{p} = q\vec{l}.$
- ♦ Напряжённость поля электрического диполя $E = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3} \sqrt{3\cos^2 \varphi + 1}.$

2. Теорема Остроградского–Гаусса и её применение

- ♦ Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме
 - для одного заряда $\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{q}{\epsilon_0};$
 - для нескольких зарядов $\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV.$
- ♦ Теорема Гаусса в дифференциальной форме $\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ или $\vec{\nabla} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}.$
- ♦ Напряженность поля, создаваемого равномерно заряженной бесконечной плоскостью $E = \sigma/2\epsilon_0.$
- ♦ Напряженность поля, создаваемого двумя параллельными разноименно заряженными бесконечными плоскостями $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}.$
- ♦ Напряженность поля нити (цилиндра) и напряженности поля между двумя цилиндрами выражается по одной формуле $E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r}.$
- ♦ Напряжённость поля между двумя цилиндрами $E = \lambda/2\pi\epsilon_0 r.$
- ♦ Напряженность поля сферы $E = \begin{cases} 0 - \text{внутри сферы} \\ \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r^2} - \text{при } r \geq R \text{ вне сферы.} \end{cases}$

- ◆ Напряженность поля, создаваемого объемным заряженным шаром

$$E = \begin{cases} \rho \frac{r}{3\epsilon_0} & \text{внутри шара} \\ \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} & \text{при } r \geq R \text{ вне шара.} \end{cases}$$

3. Потенциал и работа электростатического поля. Связь напряженности с потенциалом

- ◆ Работа по перемещению заряда q из точки 1 в точку 2

$$dA = Fdl \cos\alpha; \quad A = q \int_1^2 \vec{E} d\vec{l}; \quad A_{12} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

- ◆ Теорема о циркуляции вектора напряженности $\vec{E} \quad \oint \vec{E} d\vec{l} = 0.$

- ◆ Потенциальная энергия взаимодействия двух зарядов $W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r}.$

- ◆ Потенциал электростатического поля $\varphi = \frac{W}{q} = \frac{A_\infty}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}.$

- ◆ Потенциал системы зарядов $\varphi = \sum \varphi_i.$

- ◆ Связь между потенциалом и напряженностью $\vec{E} = -\text{grad}\varphi, \quad \vec{E} = -\nabla\varphi.$

- ◆ Потенциал поля диполя $\varphi = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2} \cos\alpha.$

- ◆ Потенциальная энергия диполя $W = -\vec{p}\vec{E} = pE \cos\alpha.$

- ◆ Механический момент, действующий на диполь в электростатическом поле $\vec{M} = [\vec{p}, \vec{E}]$ или $M = pE \sin\alpha.$

- ◆ Работа в потенциальном поле $A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU.$

- ◆ Безвихревой характер электростатического поля

$$\text{rot}\vec{E} = 0 \quad \text{или} \quad [\nabla, \vec{E}] = 0.$$

- ◆ Потенциал поля между заряженными плоскостями $\varphi = \frac{\sigma d}{\epsilon_0}.$

- ◆ Потенциал нити (цилиндра)

$$\varphi = \begin{cases} \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{1}{R} = \text{const} & \text{внутри и на поверхности} \\ \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{R} & \text{вне цилиндра.} \end{cases}$$

- ♦ Потенциал поля цилиндрического конденсатора

$$\varphi = \begin{cases} \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R_2}{R_1} = \text{const} - \text{внутри меньшего цилиндра } (r < R_1); \\ \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{R_1} - \text{между цилиндрами } (R_1 < r < R_2); \\ 0 - \text{вне цилиндров.} \end{cases}$$

- ♦ Потенциал поля сферы

$$\varphi = \begin{cases} \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R} = \frac{\sigma R}{\epsilon_0} = \text{const} - \text{внутри и на поверхн. сферы } (r \leq R) \\ \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} - \text{вне сферы } (r > R). \end{cases}$$

- ♦ Потенциал поля шара $\varphi = \begin{cases} \frac{3q}{8\pi\epsilon_0 R} - \text{в центре шара } (r = 0) \\ \frac{q}{8\pi\epsilon_0 R} \left(3 - \frac{r^2}{R^2} \right) - \text{внутри шара } (r \leq R) \\ \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} - \text{на поверхности и вне шара } (r \geq R). \end{cases}$

4. Диэлектрики в электростатическом поле

- ♦ Результирующее поле внутри диэлектрика $E = E_0 - E'$.
- ♦ Электрический момент одной молекулы $\vec{p}_1 = q\vec{l}$.
- ♦ Вектор поляризации $\vec{P} = \sum \vec{p}_1 = n\vec{p}_1 = n\alpha\epsilon_0\vec{E} = \chi\epsilon_0\vec{E}$.
- ♦ Диэлектрическая восприимчивость $\chi = n\alpha$.
- ♦ Диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon = 1 + \chi$; $\epsilon = \frac{E_0}{E}$.
- ♦ Связь диэлектрической восприимчивости с поляризуемостью молекулы α $\frac{\chi}{\chi + 3} = \frac{1}{3}n\alpha$.
- ♦ Вектор электрического смещения (электрическая индукция) $\vec{D} = \epsilon_0\epsilon\vec{E}$.
- ♦ Связь вектора $\vec{D}$ с напряженностью и поляризуемостью $\vec{D} = \epsilon_0\vec{E} + \vec{P}$.
- ♦ Теорема Гаусса для электростатического поля в диэлектрике

$$\Phi_D = \oint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum_{i=1}^n q_i.$$

- ♦ Закон преломления векторов $\vec{E}$ и $\vec{D}$ $\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{D_{2\tau}}{D_{1\tau}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}.$

5. Проводники в электростатическом поле

- ♦ Электростатическое экранирование $\frac{d\varphi}{dl} = -E = 0$; $\varphi = \text{const.}$
- ♦ Электрическая емкость уединенного проводника $C = \frac{q}{\varphi}.$
- ♦ Электрическая емкость шара $C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R.$
- ♦ Электрическая емкость плоского конденсатора $C = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d}.$
- ♦ Емкость цилиндрического конденсатора $C = \frac{2\pi\varepsilon_0 l}{\ln r_2/r_1} \approx \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d}.$
- ♦ Емкость сферического конденсатора $C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \approx \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d}.$
- ♦ Емкость параллельно соединенных конденсаторов $C = \sum_{i=1}^n C_i.$
- ♦ Емкость последовательно соединенных конденсаторов $\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}.$
- ♦ Энергия взаимодействия двух зарядов $W = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_{12}} = \frac{1}{2}(q_1 \varphi_1 + q_2 \varphi_2).$
- ♦ Энергия заряженного уединенного проводника $W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{q\varphi}{2} = \frac{q^2}{2C}.$
- ♦ Энергия заряженного конденсатора $W = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C}.$
- ♦ Объемная плотность энергии $w = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2}.$
- ♦ Пондермоторные силы в конденсаторе $F = \frac{q^2}{2\varepsilon\varepsilon_0 S}.$

6. Эмиссия электронов из проводников.

Контактные явления на границах проводников

- ♦ Работа выхода электрона из металла проводников

$$A_{\text{вых}} = e(\varphi_{\text{вн}} - \varphi_{\text{пв}}).$$

- ♦ Закон Чайльда – Ленгмюра $j = AE^{3/2}$.
- ♦ Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта $h\nu = \frac{mv^2}{2} + A_{\text{вых}}$.
- ♦ Термо ЭДС термопары $E = \alpha(T_{\text{г}} - T_{\text{х}})$.
- ♦ Эффект Пельтье $Q_{\text{П}} = \Pi_{12}j$.

7. Постоянный электрический ток

- ♦ Связь напряженности и потенциала с плотностью распределения зарядов в пространстве $\nabla E = \frac{1}{\varepsilon}\rho$ и $\nabla^2\varphi = \frac{1}{\varepsilon}\rho$.
- ♦ Сила постоянного тока $I = \frac{q}{t}$.
- ♦ Сила тока $I = \frac{\partial q}{\partial t} = \oint_S \vec{j} \partial \vec{S}$.
- ♦ Плотность тока $j = \frac{I}{S}$.
- ♦ Вектор плотности тока $\vec{j} = q_+ n_+ \vec{v}_{\text{др}+} + q_- n_- \vec{v}_{\text{др}-}$.
- ♦ Уравнение непрерывности в интегральной форме $\oint_S \vec{j} \partial \vec{S} = -\frac{\partial q}{\partial t}$.
- ♦ Дифференциальная форма $\nabla \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$ или $\text{div} \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$.
- ♦ Уравнение непрерывности для постоянного тока $\oint_S \vec{j} \partial \vec{S} = 0; \nabla \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$.
- ♦ Электродвижущая сила, действующая в цепи $E = \frac{A}{q}, E = \oint E_{\text{ст}} dl$.
- ♦ Закон Ома для однородного участка цепи $I = \frac{U}{R}$.
- ♦ Сопротивление при последовательном соединении $R = \sum R_i$.
- ♦ Сопротивление при параллельном соединении $R = \sum \frac{1}{R_i}$.
- ♦ Сопротивление однородного проводника $R = \frac{\rho l}{S}$.
- ♦ Зависимость удельного сопротивления от температуры

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t).$$

- ♦ Проводимость $\sigma = \frac{1}{R}$.
- ♦ Закон Ома в дифференциальной форме $\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} = \sigma \vec{E}$.
- ♦ Обобщенный закон Ома $I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathbf{E}_{12}}{R}$.
- ♦ Закон Ома для замкнутой цепи $I = \frac{\mathbf{E}}{R + r}$.
- ♦ Работа силы электрического поля $A = RI^2 t$.
- ♦ Мощность тока $P = \frac{dA}{dt} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$.
- ♦ Мощность, выделяемая в единице объема проводника $w = \rho j^2$.
- ♦ Закон Джоуля – Ленца $dQ = IUdt = I^2 Rdt = \frac{U^2}{R} dt$.
- ♦ Закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме $w = jE = \sigma E^2$.
- ♦ КПД источника тока $\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{з}}} = \frac{N_{\text{п}}}{N_{\text{з}}} = \frac{U}{\mathbf{E}} = \frac{R}{R + r}$.
- ♦ Первое правило Кирхгофа $\sum_k I_k = 0$.
- ♦ Второе правило Кирхгофа $\sum_i I_i R_i = \sum_k \mathbf{E}_k$.

8. Электрический ток в газах, металлах и электролитах

- ♦ Плотность тока в газах $\vec{j} = nq(\vec{v}^+ + \vec{v}^-)$.
- ♦ Удельная электропроводность $\sigma = q \sqrt{\frac{\Delta n_i}{r}} (\mu_+ + \mu_-)$.
- ♦ Закон Ома для тока в газах $\vec{j} = \sigma \vec{E}$.
- ♦ Закон Ома для тока в металлах $I = enS \vec{v}_d = \frac{1}{2} \frac{e^2 \tau n S}{m} E = \frac{e^2 \tau n S}{2 m l} U$.
- ♦ Электрическое сопротивление проводника $R = \frac{2m}{e^2 n \tau} \frac{l}{S}$.
- ♦ Первый закон Фарадея $m = kq = kIt$.
- ♦ Электрохимический эквивалент вещества $k = \frac{\mu}{Fn}$.

- ♦ Второй закон Фарадея $\frac{k_2}{k_1} = \frac{k_{x2}}{k_{x1}}$.
- ♦ Объединенный закон Фарадея $m = \frac{1}{F} \frac{\mu}{n} It$.

Часть IV. Электромагнетизм

1. Магнитное поле

- ♦ Магнитный момент контура с током $P_m = IS$ или $\vec{P}_m = IS\vec{n}$.
- ♦ Момент силы, вращающий рамку с током в магнитном поле

$$\vec{M} = [\vec{P}_m, \vec{B}] \text{ или } M = P_m B \sin \alpha = ISB \sin \alpha.$$
- ♦ Магнитная индукция $B = \frac{M_{\max}}{P_m \sin(\vec{n}, \vec{B})}$.
- ♦ Потенциальная (механическая) энергия контура с током в магнитном поле $E_{\text{п, мех}} = \vec{P}_m \vec{B} = P_m B \cos \alpha$.
- ♦ Принцип суперпозиции для магнитных полей $\vec{B} = \sum B_i$.
- ♦ Модуль магнитной индукции при сложении двух полей

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1 B_2 \cos \alpha}.$$
- ♦ Закон Био – Савара – Лапласа для элемента проводника с током

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}; \quad dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl}{r^2} \sin \alpha.$$
- ♦ Индукция магнитного поля движущегося заряда $B_1 = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{qv \sin(\vec{v}, \vec{r})}{r^2}$.
- ♦ Магнитная индукция конечного проводника

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{b} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2).$$
- ♦ Индукция бесконечно длинного проводника $B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{b}$.
- ♦ Магнитная индукция в центре кругового тока $B = \mu\mu_0 \frac{I}{2R}$.
- ♦ Магнитная индукция кругового тока на расстоянии x от центра

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{(R^2 + x^2)^{3/2}}; \quad B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2P_m}{x^3}.$$
- ♦ Напряженность магнитного поля $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0}$.

2. Силы, действующие на движущиеся заряды в магнитном поле

- ♦ Закон Ампера $d\vec{F} = I[d\vec{l}, \vec{B}]$ или $\vec{F} = I[\vec{l}, \vec{B}]$.
- ♦ Модуль вектора силы Ампера $F = IlB\sin\alpha$.
- ♦ Сила взаимодействия двух параллельных проводников с токами I_1 и

$$I_2 \text{ на расстояние } b \quad F = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{b}.$$

- ♦ Сила Лоренца $\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]$, $F_L = qvB\sin\alpha$, $\vec{F}_L = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}]$.
- ♦ Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

$$dA = I(d\Phi_2 - d\Phi_1).$$

- ♦ Работа по перемещению замкнутого контура в магнитном поле

$$dA = Id\Phi'.$$

- ♦ Магнитная индукция внутри бесконечного длинного соленоида

$$B = \mu\mu_0 nI.$$

- ♦ Магнитное поле в произвольной точке внутри конечного соленоида

$$B = \frac{1}{2} \mu\mu_0 nI (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2).$$

- ♦ Магнитное поле на середине оси соленоида

$$B_{\max} = \mu\mu_0 nI \frac{L}{\sqrt{4R^2 + L^2}}.$$

- ♦ Холловская поперечная разность потенциалов $U_x = \frac{1}{en} \frac{IB}{a} = R \frac{IB}{a}.$

- ♦ Коэффициент Холла $R = \frac{1}{qn}.$

- ♦ Число носителей заряда $n = \frac{IB}{qaU_x}.$

3. Явление электромагнитной индукции

- ♦ Закон Фарадея $\vec{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$ или $\vec{E}_i = -\frac{d\Psi}{dt}.$

- ♦ ЭДС индукции $\vec{E}_i = -S \frac{dB}{dt}.$

- ♦ Работа по перемещению заряда вихревым электрическим полем

$$A = q \oint_{\alpha} \vec{E}' d\vec{l} = q\vec{E}_i.$$

4. Ускорители заряженных частиц

- ♦ Радиус траектории нерелятивистской частицы $R = \frac{mv}{qB}$.
- ♦ Шаг винтовой линии траектории $h = vT \cos \alpha$.
- ♦ Период обращения нерелятивистской частицы $T = \frac{2\pi m}{qB}$.
- ♦ Импульс релятивистской частицы $p = \frac{1}{c} \sqrt{K(K + 2m_0c^2)}$.
- ♦ Кинетическая энергия частицы $K = W - W_0 = mc^2 - m_0c^2$.
- ♦ Период обращения релятивистской частицы

$$T = \frac{2\pi m}{qB\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{2\pi W}{qBc^2}.$$

- ♦ Радиус окружности траектории релятивистской частицы

$$R = \frac{m_0 v}{qB\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

- ♦ Энергия, передаваемая вихревым электрическим полем единичному заряду $\frac{mv^2}{2} = \oint_L q\vec{E}' d\vec{l} = q\vec{E}_t$.

5. Самоиндукция и взаимная индукция

- ♦ Индуктивность соленоида и тороида $L_{\text{сол}} = \mu\mu_0 n^2 l S$.
- ♦ ЭДС самоиндукции контура $\mathcal{E}_t = -L \frac{dI}{dt}$.
- ♦ Индуктивность бесконечно длинного соленоида, имеющего N витков

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l}.$$

- ♦ Постоянная времени цепи $\tau = \frac{L}{R}$.
- ♦ Ток при замыкании цепи $I = I_0 (1 - e^{-t/\tau})$.
- ♦ Ток при размыкании цепи $I = I_0 e^{-t/\tau}$.
- ♦ Коэффициент трансформации $k = \frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{N_2}{N_1}$.
- ♦ Работа в цепи с убывающим током $dA = \mathcal{E}_t Idt$.

- ♦ Энергия проводника с током I и индуктивностью L $W = \frac{LI^2}{2}$.
- ♦ Энергия магнитного поля $W = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} V$.
- ♦ Плотность энергии магнитного поля $w = \frac{W}{V} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{BH}{2}$.
- ♦ Энергия магнитного поля в длинном соленоиде $W = \frac{1}{2} \mu\mu_0 n^2 I^2 V$.
- ♦ Плотность энергии в длинном соленоиде $w = \frac{1}{2} \mu\mu_0 n^2 I^2$.

6. Магнитные свойства вещества

- ♦ Парамагнетики $\mu = \frac{B}{B_0} > 1$.
- ♦ Диамагнетики $\mu = \frac{B}{B_0} < 1$.
- ♦ Ферромагнетики $\mu = \frac{B}{B_0} \gg 1$.
- ♦ Частота вращения электрона на орбите $\nu = \frac{1}{T} = \frac{v}{2\pi r}$.
- ♦ Орбитальный ток $I = ev$.
- ♦ Орбитальный магнитный момент электрона $\vec{P}_m = IS\vec{n} = \frac{e\vec{v}}{2\pi r}$.
- ♦ Орбитальный момент импульса электрона $\vec{L}_e = m\vec{v}r$.
- ♦ Связь магнитного момента и момента импульса $\vec{P}_m = \gamma\vec{L}_e$.
- ♦ Гиромангнитное отношение $\gamma = -\frac{e}{2m}$.
- ♦ Собственный момент импульса электрона (спин электрона)

$$L_s = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar.$$
- ♦ Спиновый магнитный момент электрона $\vec{P}_{ms} = \gamma_s \vec{L}_s$.
- ♦ Гиромангнитное отношение спиновых моментов $\gamma_s = -\frac{e}{m}$.
- ♦ Квантовый магнитный момент (магнетон Бора) $\mu_B = \pm \frac{e\hbar}{2m}$.

- ♦ Орбитальный магнитный момент атома $\vec{P}_m = \sum_{i=1}^Z \vec{P}_{mi}$.
- ♦ Орбитальный момент импульса атома $\vec{L} = \sum_{i=1}^Z \vec{L}_{ei}$.
- ♦ Угловая скорость ларморовской прецессии $\omega_L = \frac{e}{2m} \vec{B}$.
- ♦ Намагниченность $\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{P}_{mi}$.
- ♦ Напряженность магнитного поля $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}$.
- ♦ Связь намагниченности с напряженностью $\vec{J} = \vec{H} \kappa$.
- ♦ Магнитная восприимчивость среды $\kappa = \mu - 1$.

7. Уравнения Максвелла

- ♦ Полная система уравнений Максвелла:
в интегральной форме

$$\oint_L H dl = - \int_S \left(j + \frac{\partial D}{\partial t} \right) dS, \quad \oint_S D dS = - \int_V \rho dV;$$

$$\oint_L E dl = - \int_S \frac{\partial B}{\partial t} dS, \quad \oint_S B dS = 0;$$

в дифференциальной форме

$$\text{rot} \vec{H} = j + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad \text{div} \vec{D} = \rho;$$

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \text{div} \vec{B} = 0.$$

- ♦ Материальные уравнения или уравнения состояния

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}; \quad \vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}; \quad \vec{j} = \sigma \vec{E} + \vec{j}_{\text{стр}}.$$

- ♦ Скорость распространения ЭМП в среде $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$.

Часть IV. Колебания и волны

1. Гармонические колебания

- ♦ Уравнение гармонического колебания $x = A \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi)$.

- ♦ Частота колебаний $\nu = \frac{1}{T}$.
- ♦ Циклическая частота $\omega_0 = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$.
- ♦ Период колебаний $T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{1}{\nu}$.
- ♦ Скорость колебаний $v_x = \frac{dx}{dt} = -\omega_0 A \sin(\omega_0 t + \varphi)$.
- ♦ Ускорение колебаний $a_x = \frac{dv_x}{dt} = -\omega_0^2 A \cos(\omega_0 t + \varphi)$.
- ♦ Амплитуда скорости $v_m = \omega_0 A$
- ♦ Амплитуда ускорения $a_m = \omega_0^2 A$.
- ♦ Уравнение движения материальной точки $F_x = -m\omega_0^2 x$.
- ♦ Квазиупругая сила $F_x = -kx$.
- ♦ Дифференциальное уравнение динамики гармонических колебаний материальной точки под действием упругих и квазиупругих сил

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

- ♦ Циклическая частота незатухающих колебаний $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$.
- ♦ Период незатухающих колебаний $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.
- ♦ Потенциальная энергия тела $E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2} = \frac{1}{2}kA^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi)$.
- ♦ Кинетическая энергия тела $E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2}m\omega_0^2 A^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi)$.
- ♦ Полная энергия $E = \frac{1}{2}m\omega_0^2 A^2 = \frac{1}{2}kA^2$.
- ♦ Уравнение динамики вращательного движения математического маятника $M = J\varepsilon$.
- ♦ Вращающий момент $M = -mgl \sin \alpha$.
- ♦ Момент инерции маятника $J = ml^2$.
- ♦ Дифференциальное уравнение математического маятника

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

- ♦ Решение уравнения $\alpha = \alpha_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$.
- ♦ Циклическая частота математического маятника $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$.
- ♦ Период колебаний математического маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.
- ♦ Циклическая частота физического маятника $\omega_0 = \sqrt{\frac{mgl}{J}}$.
- ♦ Период колебаний физического маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgl}} = 2\pi\sqrt{\frac{l_{\text{пр}}}{g}}$.
- ♦ Приведенная длина физического маятника $l_{\text{пр}} = \frac{J}{ml}$.

2. Сложение гармонических колебаний

- ♦ Уравнения двух когерентных колебаний одного направления
 $x_1 = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1)$ и $x_2 = A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_2)$.
- ♦ Результирующая амплитуда $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$.
- ♦ Начальная фаза $\text{tg}\varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}$.
- ♦ Модулированные колебания $x = A(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)]$.
- ♦ Биения $x = A_6 \cos \omega_0 t = 2A \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right) \cos \omega_0 t$.
- ♦ Амплитуда биений $A_6 = 2A \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t\right)$.
- ♦ Сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний
 $\frac{y^2}{A_2^2} + \frac{x^2}{A_1^2} - \frac{2xy}{A_1A_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1)$.
- ♦ Линейно поляризованные колебания $y = \frac{A_2}{A_1}x$ или $y = -\frac{A_2}{A_1}x$.
- ♦ Эллиптически поляризованные колебания $\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1$.

3. Влияние внешних сил на колебательные процессы

- ◆ Сила трения (сопротивления) $\vec{F}_{\text{тр}} = -r\vec{v}$.
- ◆ Второй закон Ньютона для затухающих прямолинейных колебаний

$$ma_x = -kx - rv_x.$$
- ◆ Дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0.$$
- ◆ Решение уравнения $x = A_0 \exp(-\beta t) \cos(\omega t + \varphi)$.
- ◆ Коэффициент затухания $\beta = \frac{r}{2m} = \frac{1}{\tau}$.
- ◆ Логарифмический декремент затухания $\chi = \ln \frac{A(t)}{A(T+t)} = \beta T = \frac{1}{N}$.
- ◆ Время релаксации $\tau = NT$.
- ◆ Частота колебаний $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$.
- ◆ Условный период затухающих колебаний $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$.
- ◆ Вынужденные механические колебания $ma_x = -kx - rv_x + F_x$.
- ◆ Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = F_0 \cos \omega t.$$
- ◆ Уравнение установившихся вынужденных колебаний

$$x = A \sin(\omega t + \varphi).$$
- ◆ Амплитуда вынужденных колебаний $A = \frac{F_0}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}$.
- ◆ Резонансная частота $\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$.
- ◆ Резонансная амплитуда $A_{\text{рез}} = \frac{F_0}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$.

4. Электрические колебания

- ◆ Переменный ток $I = I_0 \sin \omega t$.
- ◆ Напряжение $U = I_0 R \sin \omega t$.
- ◆ Емкость в цепи переменного тока

$$U = \frac{q}{C} = \frac{I_0}{\omega C} \cos \omega t = \frac{I_0}{\omega C} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

- ◆ Заряд конденсатора $q = -\frac{I_0}{\omega} \cos \omega t$.
- ◆ Реактивное емкостное сопротивление $R_C = \frac{1}{\omega C}$.
- ◆ Индуктивность в цепи переменного тока $U = LI_0 \omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$.
- ◆ Реактивное индуктивное сопротивление $R_L = \omega L$.
- ◆ Закон Ома для переменного тока $U_0 = I_0 \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$.
- ◆ Полное сопротивление цепи $Z = \frac{U_0}{I_0} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$.
- ◆ Реактивное сопротивление $X = R_L - R_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$.
- ◆ Закон Ома в комплексной форме $I = \frac{\mathbf{E}}{Z} = \frac{\mathbf{E}}{R + i\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$.
- ◆ Дифференциальное уравнение колебаний в контуре $\frac{d^2 q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0$.
- ◆ Решение уравнения $q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$.
- ◆ Собственная частота контура $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.
- ◆ Формула Томсона $T = 2\pi\sqrt{LC}$.
- ◆ Закон Ома для контура $U_m = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}$.
- ◆ Уравнение затухающих колебаний в колебательном контуре
$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0.$$
- ◆ Решение уравнения $q = q_0 \exp(-\beta t) \cos(\omega t + \varphi)$.
- ◆ Собственная частота контура $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.
- ◆ Коэффициент затухания $\beta = \frac{R}{2L}$.
- ◆ Частота затухающих колебаний контура $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$.

- ♦ Логарифмический декремент затухания

$$\chi = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T = \frac{\pi R}{L\omega} = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}}.$$

- ♦ Добротность контура $Q = 2\pi \frac{W}{\Delta W} = \frac{\pi}{\chi} = \pi N_e.$

- ♦ Время затухания $\tau = \frac{1}{\beta}.$

- ♦ Число колебаний за время затухания $N_e = \frac{\tau}{T} = \frac{1}{\beta T}.$

- ♦ Критическое сопротивление $R_k = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2R_{\text{вол}}.$

- ♦ Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний

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

- ♦ Решение уравнения вынужденных колебаний $q = q_m \cos(\omega t + \varphi).$

- ♦ Амплитуда колебаний заряда $q_m = \frac{U_m}{\omega \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2}}.$

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

- ♦ Последовательный резонанс (резонанс напряжений) $\omega L = \frac{1}{\omega C}.$

- ♦ Параллельный резонанс (резонанс токов) $\omega = \omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$

- ♦ Работа переменного тока за dt $A = P_t dt = U_m I_m \sin \omega t dt.$

- ♦ Работа за период T $A = \frac{1}{2} I_m U_m T.$

- ♦ Средняя мощность $\langle P \rangle = I_m U_m = \frac{1}{2} R I_m^2.$

- ♦ Действующие (эффективные) значения тока и напряжения

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

5. Упругие волны

- ♦ Длина волны $\lambda = vT = \frac{v}{\nu}.$

- ◆ Волновое уравнение $\nabla^2 \xi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$.
- ◆ Уравнение плоской волны $\xi = A \cos \omega \left(t - \frac{r}{v} \right)$ или $\xi = A \cos \omega (\omega t - kx)$.
- ◆ Волновой вектор $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{n}$.
- ◆ Волновое число $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi\nu}{v} = \frac{2\pi}{T}$.
- ◆ При затухании плоской волны в среде $\xi = A \exp(-\beta t) \cos \omega (\omega t - kx)$.
- ◆ Уравнение сферической волны

$$\xi = \frac{A}{r} \cos \omega \left(t - \frac{r}{v} \right) \text{ или } \xi = \frac{A}{r} \cos \omega (t - kr).$$
- ◆ При затухании сферической волны в среде

$$\xi = \frac{A}{r} \exp(-\beta t) \cos \omega (t - kr).$$
- ◆ Фазовая скорость $v = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} = \lambda \nu$.
- ◆ Групповая скорость $u = \frac{d\omega}{dk} = v + k \frac{\partial v}{\partial k} = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}$.
- ◆ Разность фаз колебаний двух точек среды $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x$.
- ◆ Суперпозиция двух волн с близкими частотами

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

$$\xi = 2A \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right) \cos \omega t \text{ или } \xi = 2A \cos kx \cos \omega t.$$
- ◆ Координаты пучностей стоячей волны $x_{\text{пучн}} = \pm \frac{n\lambda}{2}$.
- ◆ Координаты узлов стоячей волны $x_{\text{узн}} = \pm \left(n + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{2}$.
- ◆ 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 $v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$.

♦ Амплитуда звукового давления $P_0 = 2\pi P \rho v A$.

♦ Средняя объемная плотность энергии звукового поля

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

♦ Энергия звукового поля, заключенного в объеме V $W = wV$.

♦ Поток звуковой энергии $\Phi = \frac{W}{t}$.

♦ Интенсивность звука (плотность потока звуковой энергии)

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

♦ Связь интенсивности с мощностью звука $I = \frac{N}{4\pi r^2}$.

♦ Эффект Доплера 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 эффект Доплера $v = v_0 \sqrt{1 - (v/c)^2}$.

♦ Эффект Доплера в акустике $v = \frac{(v \pm v_{np})}{v \mp v_{ист}} v_0$.

♦ Закон Хаббла $v \cos \theta \approx cz = Hr$.

6. Электромагнитные волны

♦ Волновые уравнения ЭМВ $\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}; \quad \nabla^2 \vec{H} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}.$

♦ Решение уравнений $E_y = E_0 \cos(\omega t - kr); \quad H_z = H_0 \cos(\omega t - kr).$

♦ Скорость распространения электромагнитных волн в среде $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}.$

♦ Скорость света в вакууме $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}.$

♦ Абсолютный показатель преломления среды $n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon \mu}.$

- ♦ Объемная плотность энергии ЭВМ $w = w_{\text{э}} + w_{\text{м}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} + \frac{\mu \mu_0 H^2}{2}$.
- ♦ Плотность потока энергии $S = wv = EH$.
- ♦ Вектор Умова – Пойнтинга $\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}]$.
- ♦ Интенсивность ЭВМ $J = |\langle \vec{S} \rangle|$ или $J = \frac{\sin^2 \theta}{r^2}$.
- ♦ Давление света $P = J \frac{1+K}{c}$ или $P = J \frac{1+K}{c} \cos \theta$.

7. Геометрическая оптика.

Корпускулярно-волновая теория света

- ♦ Закон отражения света $\alpha = \gamma$.
- ♦ Закон преломления света $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{v} = n_{21}$.
- ♦ Предельный угол $\alpha_{\text{пр}} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$.
- ♦ Оптическая сила тонкой линзы $D = \frac{1}{F} = \left(\frac{n_{\text{л}}}{n_{\text{ср}}} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$.
- ♦ Формула тонкой линзы $\frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm \frac{1}{F} = D$.
- ♦ Увеличение линзы $\Gamma = \frac{h}{H} = \frac{f}{d}$.
- ♦ Увеличение лупы $\Gamma = \frac{d_0}{F}$.
- ♦ Угловое увеличение телескопа $\Gamma = \frac{F_1}{F_2}$.
- ♦ Увеличение микроскопа $\Gamma = d_0 a D_1 D_2$.
- ♦ Фокусное расстояние сферического зеркала $F = \frac{R}{2}$.
- ♦ Оптическая сила сферического зеркала $D = \frac{1}{F}$.
- ♦ Формула сферического зеркала $\pm \frac{1}{F} = \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f}$.
- ♦ Поток излучения $\Phi = \frac{W}{t}$.

- ♦ Энергетическая светимость (излучательность) $R = \frac{\Phi}{S}$.
- ♦ Энергетическая сила света $I = \frac{\Phi}{\omega}$.
- ♦ Энергетическая яркость (лучистость) $B = \frac{\Delta I}{\Delta S}$.
- ♦ Освещенность $E = \frac{d\Phi}{dS}$ или $E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha$.

8. Волновая оптика. Интерференция света

- ♦ Амплитуда результирующего колебания при сложении двух колебаний $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$.
- ♦ Интенсивность результирующей световой волны $J = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1J_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$.
- ♦ Видность $V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$ или $V = \frac{2\sqrt{I_1I_2}}{I_1 + I_2}$.
- ♦ Оптическая длина пути $L = nS$.
- ♦ Оптическая разность хода $\Delta = L_2 - L_1$.
- ♦ Условие интерференционных максимумов $\Delta = \pm m\lambda_0$, ($m = 0, 1, 2, \dots$).
- ♦ Условие интерференционных минимумов $\Delta = \pm(2m + 1)\frac{\lambda_0}{2}$, ($m = 0, 1, 2, \dots$).
- ♦ Координаты максимумов интенсивности $x_{\max} = \pm m \frac{l}{d} \lambda_0$, ($m = 0, 1, 2, \dots$).
- ♦ Координаты минимумов интенсивности $x_{\min} = \pm(m + \frac{1}{2}) \frac{l}{d} \lambda_0$, ($m = 0, 1, 2, \dots$).
- ♦ Время когерентности $\tau_{\text{ког}} = \frac{\pi}{\Delta\omega}$.
- ♦ Критический максимум $m_{\text{кр}} = \frac{\lambda}{2\Delta\lambda}$.
- ♦ Оптическая разность хода при интерференции в тонких пленках $\Delta = 2nh \cos \beta \pm \frac{\lambda_0}{2} = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda_0}{2}$.
- ♦ Оптическая разность хода при интерференции на клине

$$\Delta = 2b\sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha)} \pm \frac{\lambda_0}{2}.$$

- ♦ Радиус m -го светлого кольца Ньютона $r_m = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda_0 R}$
- ♦ Радиус m -го темного кольца Ньютона $r_m = \sqrt{mR\lambda_0}$.

9. Дифракция света

- ♦ Условие дифракционных максимумов от одной щели

$$a \sin \varphi = \pm(2m+1)\frac{\lambda}{2}, \quad (m=1, 2, 3, \dots).$$

- ♦ Условие дифракционных минимумов от одной щели

$$a \sin \varphi = \pm m\frac{\lambda}{2}, \quad (m=1, 2, 3, \dots).$$

- ♦ Интенсивность света при дифракции на одной щели

$$I_\varphi = I_0 \frac{\sin^2\left(\pi \frac{b \sin \varphi}{\lambda}\right)}{\left(\pi \frac{b \sin \varphi}{\lambda}\right)^2}.$$

- ♦ Условие максимума дифракционной решетки

$$d \sin \varphi = \pm m\lambda, \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots).$$

- ♦ Условие минимума дифракционной решетки

$$b \sin \varphi = \pm m\lambda.$$

10. Взаимодействие света с веществом

- ♦ Зависимость угла отклонения лучей призмой φ от преломляющего угла A призмы и показателя преломления n $\varphi = A(n-1)$.

- ♦ Дисперсия вещества $D = \frac{dn}{d\lambda}$ или $D = \frac{dn}{dv}$.

11. Поляризация света

- ♦ Степень поляризации $P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$.

- ♦ Закон Малюса $J = \frac{1}{2} J_0 \cos^2 \alpha$.

- ♦ Оптическая разность хода в эффекте Керра $\Delta l(n_o + n_e) = k_2 l E^2$.

- ♦ Угол вращения плоскости поляризации в кристаллах $\varphi = \alpha d$.

- ♦ Угол вращения плоскости поляризации в растворах $\varphi = [\alpha]Cd$.

Часть VI. Квантовая оптика. Атомная и ядерная физика. Физика элементарных частиц

1. Квантовая природа излучения

- ♦ Энергетическая светимость тела $R = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu$.
- ♦ Поглощательная способность тела $\alpha_{\nu,T} = \frac{d\Phi'_{\nu}}{d\Phi_{\nu}}$.
- ♦ Универсальная функция Кирхгофа $\frac{r_{\nu,T}}{\alpha_{\nu,T}} = f(\nu, T)$.
- ♦ Закон Стефана – Больцмана $R = \sigma T^4$.
- ♦ Энергетическая светимость серого тела $R_{\text{сер}} = \alpha_{\nu,T} \sigma T^4$.
- ♦ Закон смещения Вина $\frac{\nu_{\text{max}}}{T} = \text{const}$ или $\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T}$.
- ♦ Формула Планка

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \quad \text{или} \quad r_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1}.$$

2. Квантовые явления в оптике

- ♦ Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта $h\nu = \frac{mv^2}{2} + A$.
- ♦ Энергия фотона $E = h\nu = h\left(\frac{c}{\lambda}\right)$.
- ♦ «Красная граница» фотоэффекта $\nu_{\text{кр}} = \frac{A}{h}$; $\lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{A}$.
- ♦ Ток насыщения $I_{\text{нас}} = en$.
- ♦ Масса фотона $m_{\text{ф}} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$.
- ♦ Импульс фотона $\vec{p} = \hbar\vec{k}$; $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{2\pi\hbar}{\lambda}$.
- ♦ Волновые вектор и число $\vec{k} = \frac{2\pi}{h}\vec{p}$ и $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi\nu}{v} = \frac{2\pi}{T}$.
- ♦ Связь между энергией и импульсом фотона $E = c\sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}$.

- ♦ Изменение длины волны в эффекте Комптона $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_K \sin^2 \frac{\varphi}{2}$.
- ♦ Комptonовская длина волны $\lambda_K = \frac{h}{mc}$.
- ♦ Коротковолновая граница рентгеновского спектра $\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}} = \frac{ch}{eU}$.
- ♦ Закон Мозли $\nu = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$.
- ♦ Импульс, переданный фотоном при поглощении $p_{\text{погл}} = \frac{h\nu}{c}$.
- ♦ Импульс, переданный фотоном при отражении $p_{\text{отр}} = \frac{2h\nu}{c}$.
- ♦ Энергетическая освещенность поверхности $E_e = Nh\nu$.
- ♦ Давления света $P = \frac{E_e}{c}(1 + K)$.

3. Волновые свойства микрочастиц вещества

- ♦ Длина волны де Бройля $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$.
- ♦ Фазовая скорость волн де Бройля $v_{\text{фаз}} = \frac{\omega}{k} = \frac{c^2}{v}$.
- ♦ Групповая скорость волн де Бройля $u = \frac{d\omega}{dk} = v$.
- ♦ Связь длины волны с кинетической энергией $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mK}}$.
- ♦ Длина волны, соответствующая атому массой m $\lambda = \frac{h}{\sqrt{3mkT}}$.

4. Элементы квантовой механики

- ♦ Соотношение неопределенностей Гейзенберга $\Delta x \Delta p \geq h$, $\Delta E \Delta t \geq h$.
- ♦ Плотность вероятности $\frac{dW}{dV} = |\Psi(x, y, z, t)|^2$.
- ♦ Вероятность нахождения частицы в элементе объема $W = \int_V |\Psi|^2 dV$.
- ♦ Условие нормировки вероятностей $\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi|^2 dV = 1$.

- ♦ Среднее расстояние электрона от ядра $\langle r \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} r |\Psi|^2 dV$.
- ♦ Общее уравнение Шредингера $-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U(x, y, z, t) \Psi = i\hbar \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}$.
- ♦ Уравнение Шредингера для стационарных состояний $\nabla^2 \Psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \Psi = 0$ или $\hat{H} \Psi = E \Psi$.
- ♦ Оператор энергии (гамильтониан) $\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U$.

5. Движение свободной частицы в одномерной потенциальной яме

- ♦ Уравнение Шредингера для свободной частицы $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \Psi = 0$.
- ♦ Энергия свободной частицы $E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$.
- ♦ Связь энергии с импульсом $E = \frac{p^2}{2m}$.
- ♦ Плотность вероятности обнаружения частицы $|\Psi|^2 = \Psi \Psi^* = |A|^2$.
- ♦ Потенциальная энергия для прямоугольной ямы $E_{\text{п}} = \begin{cases} \infty, & x < 0, \\ 0, & 0 \leq x \leq l, \\ \infty, & x > l. \end{cases}$
- ♦ Уравнение Шредингера для частицы в яме $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \Psi = 0$ или $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + k^2 \Psi = 0$.
- ♦ Общее решение уравнения Шредингера $\Psi(x) = A \sin kx$.
- ♦ Энергия частицы в яме $E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2ml^2}$, $(n = 1, 2, 3, \dots)$
- ♦ Собственные функции частицы в яме $\Psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{n\pi}{l} x$.
- ♦ Энергетический интервал между двумя соседними уровнями $\Delta E_n = E_{n+1} - E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{ml^2} n$.
- ♦ Минимальная энергия частицы в яме $E_{\text{min}} = \frac{\Delta P^2}{2m} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{ml^2}$.

- ♦ Уравнение Шредингера для квантового осциллятора

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E - \frac{m\omega^2 x^2}{2} \right) \Psi = 0.$$

- ♦ Энергия квантового осциллятора $E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega.$

- ♦ Минимальная (нулевая) энергия квантового осциллятора $E_0 = \frac{1}{2} \hbar\omega.$

- ♦ Правило отбора $\Delta n = \pm 1.$

- ♦ Коэффициент прозрачности прямоугольного потенциального барьера

$$D = D_0 \exp\left(\frac{2l\sqrt{2m(U-E)}}{\hbar} \right).$$

- ♦ Распределение Бозе – Эйнштейна $\langle N_i \rangle = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_i - u}{kT} \right) - 1}.$

- ♦ Распределение Ферми – Дирака $\langle N_i \rangle = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_i - u}{kT} \right) + 1}.$

- ♦ Уровень Ферми в собственном полупроводнике $E_F = \frac{\Delta E}{2}.$

- ♦ Удельная проводимость собственных полупроводников

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kt} \right).$$

- ♦ Правило Стокса для люминесцентного излучения $h\nu = h\nu_{\text{люм}} + \Delta E.$

6. Модели атомов. Атом водорода по теории Бора

- ♦ Обобщенная формула Бальмера $\nu = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ или

$$\frac{1}{\lambda} = R' \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) (k = 1, 2, 3, \dots \quad m = k + 1, k + 2, k + 3, \dots).$$

- ♦ Первый постулат Бора (правило квантования орбит)

$$m_e v r = n\hbar, \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

- ♦ Второй постулат Бора (правило частот) $h\nu = E_n - E_k.$

- ♦ Уравнение Шредингера для электрона в атоме водорода

$$\Delta\Psi + \frac{2m}{\hbar} \left(E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \Psi = 0.$$

♦ Радиусы стационарных орбит $r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2 n^2}{k_0 m_e Z e^2}, \quad (n=1, 2, 3, \dots).$

♦ Энергия электрона в водородоподобном атоме

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e Z^2 e^4}{8h^2 \epsilon_0^2}, \quad (n=1, 2, 3, \dots).$$

♦ Энергия испускаемого кванта $h\nu = E_n - E_m = \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right).$

♦ Энергия ионизации атома водорода $E_i = -E_1 = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2}.$

7. Водородоподобные системы в квантовой механике

♦ Волновая функция положения электрона в атоме $\Psi(r) = \sqrt{\frac{1}{\pi r_1^3}} \cdot e^{-\frac{r}{r_1}}.$

♦ Потенциальная энергия взаимодействия электрона с ядром

$$E_{\pi}(r) = -k_0 \frac{Ze^2}{r}.$$

♦ Уравнение Шредингера для электрона в атоме $\Delta\Psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \Psi = 0.$

♦ Магнитный момент атома $P_m = \frac{e}{2m_e} L = \frac{e\hbar^2}{2m_e} \sqrt{l(l+1)} = \mu_B \sqrt{l(l+1)}.$

♦ Магнетон Бора $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж} \cdot \text{Тл}^{-1}.$

♦ Квантование орбитального момента импульса $L = \hbar \sqrt{l(l+1)}.$

♦ Связь между магнитным моментом и орбитальным моментом импульса электрона $\vec{P}_m = -\gamma \vec{L}_e = -\frac{e}{2m_e} \vec{L}_e.$

♦ Орбитальное гиромагнитное отношение $\gamma = \frac{e}{2m_e}.$

♦ Квантование спина электрона $L_s = \hbar \sqrt{s(s+1)}.$

♦ Численное значение спина электрона $L_s = \pm \frac{\hbar}{2}.$

- ♦ Спиновое гиромагнитное отношение $\gamma_s = \frac{P_{msz}}{L_{sz}} = -\frac{e}{m_e}$.
- ♦ Принцип Паули $Z(n, l, m, m_s) = 0$ или 1.

8. Физика атомного ядра

- ♦ Радиус ядра $R = R_0 A^{1/3}$.
- ♦ Массовое число $A = Z + N$.
- ♦ Спин ядра $L_{яд} = \hbar \sqrt{I(I+1)}$.
- ♦ Связь между магнитным моментом ядра и спином $P_{m_{яд}} = \gamma_{яд} L_{яд}$.
- ♦ Ядерный магнетон $\mu_{яд} = \frac{e\hbar}{2m_p}$.
- ♦ Квадрупольный электрический момент ядра $Q = \frac{2}{5} Z_e (b^2 - a^2)$.
- ♦ Дефект массы ядра $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{я} = \frac{W_{св}}{c^2}$.
- ♦ Энергия связи нуклонов в ядре .

$$W_{св} = \Delta mc^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - M_{яд}] \cdot c^2.$$
- ♦ Удельная энергия связи ядра $\omega_{св} = \frac{W_{св}}{A}$.
- ♦ Закон радиоактивного распада $N = N_0 e^{-\lambda T}$.
- ♦ Период полураспада $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$.
- ♦ Среднее время жизни радиоактивного ядра $\tau = \frac{1}{\lambda}$.
- ♦ Активность нуклида $A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N$.
- ♦ Правило смещения для α -распада ${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4} Y + {}_2^4 He$.
- ♦ Правило смещения для β^- -распада ${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z+1}^A Y + {}_{-1}^0 e$.
- ♦ Правило смещения для β^+ -распада ${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-1}^A Y + {}_1^0 e$.
- ♦ Символическая запись для ядерной реакции

$$X + a \rightarrow Y + b \text{ или } X(a, b)Y.$$
- ♦ Эффективное сечение поглощения ядерной реакции $\sigma = \frac{dN}{nNdx}$.
- ♦ Формула Вайцеккера

$$E_{\text{св}} = \alpha_1 A - \alpha_2 A^{2/3} - \alpha \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \alpha_4 \left(\frac{A}{2} - Z \right)^2 A + \alpha_5 A^{-3/4}.$$

- ◆ Константа взаимодействия между элементарными частицами

$$\alpha = \frac{E}{m_0 c^2}.$$

- ◆ Три уровня микромира:

- *молекулярно-атомный*: $E = 1 - 10$ эВ, $\Delta r \approx 10^{-8} - 10^{-10}$ м;
- *ядерный*: $E = 10^6 - 10^8$ эВ, $\Delta r \approx 10^{-14} - 10^{-15}$ м;
- *элементарные частицы*: $E > 10^8$ эВ, $\Delta r < 10^{-15}$

Учебное издание

КУЗНЕЦОВ Сергей Иванович

КРАТКИЙ СПРАВОЧНИК ПО ФИЗИКЕ

Учебное пособие

Научный редактор доктор физико-математических наук, профессор
И.П. Чернов

Редактор О.Н. Свинцова

Компьютерный набор: Я.А. Панов
Дизайн обложки: О.Ю. Аршинова

Подписано к печати 30.04.2011. Формат 60х84/16. Бумага «Классика».

Печать XEROX. Усл.печ.л. 6,98. Уч.-изд.л. 6,42.

Заказ . Тираж 150 экз.



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.