

ФИЗИКА

БЗ
ТЗГ

500

ОСНОВНЫХ ЗАКОНОВ И ФОРМУЛ

справочник

Решение 04-20 1995

КОНТРОЛЬНЫЙ ЛИСТОК
СРОКОВ ВОЗВРАТА

КНИГА ДОЛЖНА БЫТЬ
ВОЗВРАЩЕНА НЕ ПОЗЖЕ
УКАЗАННОГО ЗДЕСЬ СРОКА

Кол-во пред. выдач

12/11 96	
24/11 98	
24/11 00	
13/11 01	
18/11 02	
9/11 04	

3 ТМО Т. 3.600.000 З. 3213—87

176

Т. И. Трофимова

ФИЗИКА

500
ОСНОВНЫХ ЗАКОНОВ
И ФОРМУЛ

Пр-04

Московская ж.д.
ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА
Ст. Арел



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1995

Трофимова Т. И.
Т 76 Физика. 500 основных законов и формул: Справочник для студ. вузов. — М.: Высш. шк., 1995. — 63с.
ISBN 5-06-003287-6

Впервые в ограниченном объеме систематизированы основные законы и формулы, охватывающие все разделы классической современной физики, знание которой необходимо в рамках программы курса в вузах.

Основное назначение — эффективно и быстро найти основные законы и формулы.

Привлекателен для студентов вузов при подготовке к коллоквиумам, семинарам и экзаменам. Может быть полезен инженерно-техническим работникам, слушателям колледжей и учащимся школ.

Т 1604000000 — 025
001(01) — 95 58 — 95

ББК 22.3
53

ISBN 5-06-003287-6,

© Т. И. Трофимова, 1995

ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

Кинематика

- Средняя и мгновенная скорости материальной точки

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta r}{\Delta t}, \quad \langle v \rangle = \frac{\Delta s}{\Delta t}, \quad v = \frac{dr}{dt}, \quad v = \frac{ds}{dt},$$

где Δr — элементарное перемещение точки за промежуток времени Δt ; r — радиус-вектор точки; Δs — путь, пройденный точкой за промежуток времени Δt .

- Среднее и мгновенное ускорения материальной точки

$$\langle a \rangle = \frac{\Delta v}{\Delta t}, \quad a = \frac{dv}{dt}.$$

- Полное ускорение при криволинейном движении

$$a = a_t + a_n, \quad a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2},$$

где $a_t = dv/dt$ — тангенциальная составляющая ускорения; $a_n = v^2/r$ — нормальная составляющая ускорения (r — радиус кривизны траектории в данной точке).

- Путь и скорость для равнопеременного движения

$$s = v_0 t \pm at^2/2; \quad v = v_0 \pm at,$$

где v_0 — начальная скорость.

- Угловая скорость

$$\omega = d\varphi/dt.$$

- Угловое ускорение

$$\varepsilon = d\omega/dt.$$

- Угловая скорость для равномерного вращательного движения

$$\omega = \varphi/t = 2\pi/T = 2\pi n,$$

где T — период вращения; n — частота вращения ($n = N/t$, где N — число оборотов, совершаемых телом за время t).

- Угол поворота и угловая скорость для равнопеременного вращательного движения

$$\varphi = \omega_0 t \pm \varepsilon t^2 / 2; \quad \omega = \omega_0 \pm \varepsilon t,$$

где ω_0 — начальная угловая скорость.

- Связь между линейными и угловыми величинами:

$$s = R\varphi; \quad v = R\omega; \quad a_t = R\varepsilon; \quad a_n = \omega^2 R,$$

где R — расстояние от оси вращения.

Динамика материальной точки и поступательного движения твердого тела

- Импульс (количество движения) материальной точки

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

- Второй закон Ньютона (основное уравнение динамики материальной точки)

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}.$$

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

$$F_t = ma_t = m \frac{dv}{dt}; \quad F_n = ma_n = \frac{mv^2}{R} = m\omega^2 R.$$

- Сила трения скольжения

$$F_{\text{тр}} = fN,$$

где f — коэффициент трения скольжения; N — сила нормального давления.

- Сила трения качения

$$F_{\text{тр}} = f_k N / r,$$

где f_k — коэффициент трения качения; r — радиус катящегося тела.

- Закон сохранения импульса для замкнутой системы

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

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

- Координаты центра масс системы материальных точек:

$$x_c = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}, \quad y_c = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i}, \quad z_c = \frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i},$$

где m_i — масса i -й материальной точки; x_c, y_c, z_c — ее координаты.

- Уравнение движения тела переменной массы (уравнение Мещерского)

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F} + \mathbf{F}_p,$$

где реактивная сила $\mathbf{F}_p = -u \frac{dm}{dt}$ (u — скорость истечения газов из ракеты).

- Формула Циолковского для определения скорости ракеты

$$v = u \ln \frac{m_0}{m},$$

где m_0 — начальная масса ракеты.

Работа и энергия

- Работа, совершаемая постоянной силой,

$$dA = F_s ds = F ds \cos \alpha,$$

где F_s — проекция силы на направление перемещения; α — угол между направлениями силы и перемещения.

- Работа, совершаемая переменной силой, на пути s

$$A = \int_s F_s ds = \int_s F \cos \alpha ds.$$

- Средняя мощность за промежуток времени Δt

$$\langle N \rangle = \Delta A / \Delta t.$$

- Мгновенная мощность

$$N = \frac{dA}{dt}, \quad \text{или} \quad N = \mathbf{Fv} = F_s v = Fv \cos \alpha.$$

- Кинетическая энергия движущегося тела

$$T = mv^2 / 2.$$

- Связь между силой, действующей на тело в данной точке поля, и потенциальной энергией частицы

$$\mathbf{F} = -\text{grad} \Pi, \quad \text{или} \quad \mathbf{F} = -\left(\frac{\partial \Pi}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial \Pi}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial \Pi}{\partial z} \mathbf{k} \right),$$

где $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ — единичные векторы координатных осей.

- Потенциальная энергия тела, поднятого над поверхностью Земли на высоту h ,

$$\Pi = mgh,$$

где g — ускорение свободного падения.

- Сила упругости

$$F = -kx,$$

где x — деформация; k — коэффициент упругости.

- Потенциальная энергия упругодеформированного тела

$$\Pi = kx^2/2.$$

- Закон сохранения механической энергии (для консервативной системы)

$$T + \Pi = E = \text{const.}$$

- Коэффициент восстановления

$$\varepsilon = v'_n / v_n,$$

где v'_n и v_n — соответственно нормальные составляющие относительной скорости тел после и до удара.

- Скорость двух тел массами m_1 и m_2 после абсолютно упругого центрального удара

$$v'_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2v_2}{m_1 + m_2}, \quad v'_2 = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1v_1}{m_1 + m_2},$$

где v_1 и v_2 — скорости тел до удара.

- Скорость движения тел после абсолютно неупругого центрального удара

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

Механика твердого тела

- Момент инерции материальной точки

$$J = mr^2,$$

где m — масса точки; r — расстояние до оси вращения.

- Момент инерции системы (тела)

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2,$$

где r_i — расстояние материальной точки массой m_i до оси вращения. В случае непрерывного распределения масс $J = \int r^2 dm$.

- Моменты инерции тел правильной геометрической формы (тела считаются однородными; m — масса тела):

Тело	Положение оси вращения	Момент инерции
Полый тонкостенный цилиндр радиусом R	Ось симметрии	mR^2
Сплошной цилиндр или диск радиусом R	То же	$1/2 mR^2$
Прямой тонкий стержень длиной l	Ось перпендикулярна стержню и проходит через его середину	$1/12 mR^2$
То же	Ось перпендикулярна стержню и проходит через его конец	$1/3 ml^2$
Шар радиусом R	Ось проходит через центр шара	$2/5 mR^2$

- Теорема Штейнера

$$J = J_C + ma^2,$$

где J_C — момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс; J — момент инерции относительно параллельной оси, отстоящей от первой на расстоянии a ; m — масса тела.

- Кинетическая энергия тела, вращающегося вокруг неподвижной оси z ,

$$T_{\text{вр}} = 1/2 J_z \omega^2,$$

где J_z — момент инерции тела относительно оси z ; ω — его угловая скорость.

- Кинетическая энергия тела, катящегося по плоскости без скольжения,

$$T = 1/2 mv_C^2 + 1/2 J_C \omega^2,$$

где m — масса тела; v_C — скорость центра масс тела; J_C — момент инерции тела относительно оси, проходящей через его центр масс; ω — угловая скорость тела.

- Момент силы относительно неподвижной точки

$$\mathbf{M} = [\mathbf{r}\mathbf{F}],$$

где $\mathbf{r}$ — радиус-вектор, проведенный из этой точки в точку приложения силы $\mathbf{F}$. Модуль момента силы

$$M = Fl,$$

где l — плечо силы (кратчайшее расстояние между линией действия силы и осью вращения).

- Работа при вращении тела

$$dA = M_z d\varphi,$$

где $d\varphi$ — угол поворота тела; M_z — момент силы относительно оси z .

● Момент импульса (момент количества движения) твердого тела относительно оси вращения

$$L_z = \sum_{i=1}^n m_i v_i r_i = J_z \omega,$$

где r_i — расстояние от оси z до отдельной частицы тела; $m_i v_i$ — импульс этой частицы; J_z — момент инерции тела относительно оси z ; ω — его угловая скорость.

● Уравнение (закон) динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси

$$M = \frac{dL}{dt}; \quad M_z = J_z \frac{d\omega}{dt} = J_z \varepsilon,$$

где ε — угловое ускорение; J_z — момент инерции тела относительно оси z .

● Закон сохранения момента импульса (момента количества движения) для замкнутой системы

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

● Напряжение при упругой деформации

$$\sigma = F/S,$$

где F — растягивающая (сжимающая) сила; S — площадь поперечного сечения.

● Относительное продольное растяжение (сжатие)

$$\varepsilon = \Delta l/l,$$

где Δl — изменение длины тела при растяжении (сжатии); l — длина тела до деформации.

● Относительное поперечное растяжение (сжатие)

$$\varepsilon' = \Delta d/d,$$

где Δd — изменение диаметра стержня при растяжении (сжатии); d — диаметр стержня.

● Связь между относительным поперечным сжатием (растяжением) ε' и относительным продольным растяжением (сжатием) ε

$$\varepsilon' = \mu \varepsilon,$$

где μ — коэффициент Пуассона.

● Закон Гука для продольного растяжения (сжатия)

$$\sigma = E \varepsilon,$$

где E — модуль Юнга.

● Потенциальная энергия упругорастянутого (сжатого) стержня

$$\Pi = \int_0^{\Delta l} F dx = \frac{1}{2} \frac{ES}{l} (\Delta l)^2 = \frac{E \varepsilon^2}{2} V,$$

где V — объем тела.

Тяготение. Элементы теории поля

● Третий закон Кеплера

$$T_1^2/T_2^2 = R_1^3/R_2^3,$$

где T_1 и T_2 — периоды обращения планет вокруг Солнца, R_1 и R_2 — большие полуоси их орбит.

● Закон всемирного тяготения

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где F — сила всемирного тяготения (гравитационная сила) двух материальных точек массами m_1 и m_2 ; r — расстояние между точками; G — гравитационная постоянная.

● Сила тяжести

$$P = mg,$$

где m — масса тела; g — ускорение свободного падения.

● Напряженность поля тяготения

$$g = F/m,$$

где F — сила тяготения, действующая на материальную точку массой m , помещенную в данную точку поля.

● Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия двух материальных точек массами m_1 и m_2 , находящихся на расстоянии r друг от друга,

$$\Pi = -G m_1 m_2 / r.$$

● Потенциал поля тяготения

$$\varphi = \Pi/m,$$

где Π — потенциальная энергия материальной точки массой m , помещенной в данную точку поля.

● Связь между потенциалом поля тяготения и его напряженностью

$$\mathbf{g} = -\text{grad } \varphi, \quad \text{или} \quad \mathbf{g} = -\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \mathbf{k}\right),$$

где $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ — единичные векторы координатных осей.

- Первая и вторая космические скорости

$$v_1 = \sqrt{g R_0}, \quad v_2 = \sqrt{2g R_0},$$

где R_0 — радиус Земли.

- Основной закон динамики для неинерциальных систем отсчета

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

где $\mathbf{a}$ и $\mathbf{a}'$ — соответственно ускорение тела в инерциальной и неинерциальной системах отсчета, $\mathbf{F}_{\text{ин}}$ — силы инерции.

- Силы инерции

$$\mathbf{F}_{\text{ин}} = \mathbf{F}_n + \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_k,$$

где $\mathbf{F}_n$ — силы инерции, проявляющиеся при поступательном движении системы отсчета с ускорением $\mathbf{a}_0$: $\mathbf{F}_n = -m \mathbf{a}_0$; $\mathbf{F}_c$ — центробежные силы инерции (силы инерции, действующие во вращающейся системе отсчета на тела, удаленные от оси вращения на конечное расстояние R): $\mathbf{F}_c = -m \omega^2 R$; $\mathbf{F}_k$ — кориолисова сила инерции (силы инерции, действующие на тело, движущееся со скоростью $\mathbf{v}'$ во вращающейся системе отсчета):

$$\mathbf{F}_k = 2m[\mathbf{v}' \omega].$$

Элементы механики жидкостей

- Гидростатическое давление столба жидкости на глубине h

$$p = \rho g h,$$

где ρ — плотность жидкости.

- Закон Архимеда

$$F_A = \rho g V,$$

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

- Уравнение неразрывности

$$S v = \text{const},$$

где S — площадь поперечного сечения трубки тока; v — скорость жидкости.

- Уравнение Бернулли для стационарного течения идеальной несжимаемой жидкости

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

где p — статическое давление жидкости для определенного сечения трубки тока; v — скорость жидкости для этого же сечения; $\rho v^2/2$ — динамическое давление жидкости для этого же сечения; h — высота, на которой расположено сечение; $\rho g h$ — гидростатическое давление.

Для трубки тока, расположенной горизонтально,

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

- 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.

- Сила внутреннего трения между слоями текущей жидкости

$$F = \eta \left| \frac{\Delta v}{\Delta x} \right| S,$$

где η — динамическая вязкость жидкости; $\Delta v/\Delta x$ — градиент скорости; S — площадь соприкасающихся слоев.

- Число Рейнольдса, определяющее характер движения жидкости,

$$Re = \rho \langle v \rangle d / \eta,$$

где ρ — плотность жидкости; $\langle v \rangle$ — средняя по сечению трубы скорость жидкости; d — характерный линейный размер, например диаметр трубы.

- 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 — его скорость.

- 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.

- Лобовое сопротивление

$$R_x = C_x \rho v^2 S / 2,$$

где C_x — безразмерный коэффициент сопротивления; ρ — плотность среды; v — скорость движения тела; S — площадь наибольшего поперечного сечения тела.

- Подъемная сила

$$R_y = C_y p v^2 S / 2,$$

где C_y — безразмерный коэффициент подъемной силы.

Элементы специальной (частной) теории относительности

- Преобразования Лоренца

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где предполагается, что система отсчета K' движется со скоростью v в положительном направлении оси x системы отсчета K , причем оси x' и x совпадают, а оси y' и y и z' и z параллельны; c — скорость распространения света в вакууме.

- Релятивистское замедление хода часов

$$\tau' = \frac{\tau}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где τ — промежуток времени между двумя событиями, отсчитанный движущимися вместе с телом часами; τ' — промежуток времени между теми же событиями, отсчитанный покоящимися часами.

- Релятивистское (лоренцево) сокращение длины

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

где l_0 — длина стержня, измеренная в системе отсчета, относительно которой стержень покоится (собственная длина); l — длина стержня, измеренная в системе отсчета, относительно которой он движется со скоростью v .

- Релятивистский закон сложения скоростей

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - vu_x/c^2}, \quad u'_y = \frac{u_y \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - vu_x/c^2}, \quad u'_z = \frac{u_z \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - vu_x/c^2},$$

где предполагается, что система отсчета K' движется со скоростью v в положительном направлении оси x системы отсчета K , причем оси x' и x совпадают, оси y' и y , z' и z параллельны.

- Интервал s_{12} между событиями (инвариантная величина)

$$s_{12}^2 = c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2 = \text{inv},$$

где t_{12} — промежуток времени между событиями 1 и 2; l_{12} — расстояние между точками, где произошли события.

- Масса релятивистской частицы и релятивистский импульс

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где m_0 — масса покоя.

- Основной закон релятивистской динамики

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt},$$

где $\mathbf{p}$ — релятивистский импульс частицы.

- Полная и кинетическая энергии релятивистской частицы

$$E = mc^2 = m_0 c^2 + T, \quad T = (m - m_0) c^2.$$

- Связь между энергией и импульсом релятивистской частицы

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2, \quad pc = \sqrt{T(T + 2m_0 c^2)}.$$

- Энергия связи системы

$$E_{\text{св}} = \sum_{i=1}^n m_{0i} c^2 - M_0 c^2,$$

где m_{0i} — масса покоя i -й частицы в свободном состоянии; M_0 — масса покоя системы, состоящей из n частиц.

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

Молекулярно-кинетическая теория идеальных газов

- Закон Бойля — Мариотта

$$pV = \text{const} \quad \text{при } T = \text{const}, m = \text{const},$$

где p — давление; V — объем; T — термодинамическая температура; m — масса газа.

- Закон Гей-Люссака

$$V = V_0 (1 + \alpha t), \quad \text{или} \quad V_1/V_2 = T_1/T_2 \quad \text{при } p = \text{const}, m = \text{const};$$

$$p = p_0 (1 + \alpha t), \quad \text{или} \quad p_1/p_2 = T_1/T_2 \quad \text{при } V = \text{const}, m = \text{const},$$

где t — температура по шкале Цельсия; V_0 и p_0 — соответственно объем и давление при 0°C ; коэффициент $\alpha = 1/273 \text{ K}^{-1}$; индексы 1 и 2 относятся к произвольным состояниям.

- Закон Дальтона для давления смеси n идеальных газов

$$p = \sum_{i=1}^n p_i,$$

где p_i — парциальное давление i -го компонента смеси.

- Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона — Менделеева)

$$pV_m = RT \quad (\text{для 1 моль газа}),$$

$$pV = (m/M) RT \quad (\text{для произвольной массы газа}),$$

где V_m — молярный объем; R — молярная газовая постоянная; M — молярная масса газа; m — масса газа; $m/M = \nu$ — количество вещества.

- Зависимость давления газа от концентрации n молекул и температуры T

$$p = nkT,$$

где k — постоянная Больцмана ($k = R/N_A$, N_A — постоянная Авогадро).

- Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов

$$p = \frac{1}{3} nm_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2,$$

или

$$pV = \frac{2}{3} N \left(\frac{m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2}{2} \right) = \frac{2}{3} E,$$

или

$$pV = \frac{1}{3} Nm_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = \frac{1}{3} m \langle v_{\text{кв}} \rangle^2,$$

где $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ — средняя квадратичная скорость молекул; E — суммарная кинетическая энергия поступательного движения всех молекул газа; n — концентрация молекул; m_0 — масса одной молекулы; $m = Nm_0$ — масса газа; N — число молекул в объеме газа V .

- Скорость молекул: наиболее вероятная

$$v_v = \sqrt{2RT/M} = \sqrt{2kT/m_0};$$

средняя квадратичная

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{3RT/M} = \sqrt{3kT/m_0};$$

средняя арифметическая

$$\langle v \rangle = \sqrt{8RT/(\pi M)} = \sqrt{8kT/(\pi m_0)},$$

где m_0 — масса молекулы.

- Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы идеального газа

$$\langle \epsilon_0 \rangle = \frac{3}{2} kT.$$

- Закон Максвелла для распределения молекул идеального газа по скоростям

$$f(v) = \frac{dN(v)}{Ndv} = 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \exp[-m_0 v^2 / (2kT)],$$

где функция $f(v)$ распределения молекул по скоростям определяет относительное число молекул $dN(v)/N$ из общего числа N молекул, скорости которых лежат в интервале от v до $v+dv$.

- Закон Максвелла для распределения молекул идеального газа по энергиям теплового движения

$$f(\epsilon) = \frac{dN(\epsilon)}{Nd\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (kT)^{-3/2} \epsilon^{1/2} \exp[-\epsilon/(kT)],$$

где функция $f(\epsilon)$ распределения молекул по энергиям теплового движения определяет относительное число молекул $dN(\epsilon)/N$ из общего числа N молекул, которые имеют кинетические энергии $\epsilon = m_0 v^2 / 2$, заключенные в интервале от ϵ до $\epsilon+d\epsilon$.

- Барометрическая формула

$$p_h = p_0 \exp[-Mg(h-h_0)/(RT)],$$

где p_h и p_0 — давление газа на высоте h и h_0 .

- Распределение Больцмана во внешнем потенциальном поле

$$n = n_0 \exp[-Mgh/(RT)] = n_0 \exp[-m_0 gh/(kT)],$$

$$n = n_0 \exp[-\Pi/(kT)],$$

где n и n_0 — концентрация молекул на высоте h и $h=0$; $\Pi = m_0 gh$ — потенциальная энергия молекулы в поле тяготения.

- Среднее число соударений, испытываемых молекулой газа за 1 с,

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle,$$

где d — эффективный диаметр молекулы; n — концентрация молекул; $\langle v \rangle$ — средняя арифметическая скорость молекул.

- Средняя длина свободного пробега молекул газа

$$\langle l \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle z \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}$$

- Закон теплопроводности Фурье

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dx} St,$$

где Q — теплота, прошедшая посредством теплопроводности через площадь S за время t ; dT/dx — градиент температуры; λ — теплопроводность:

$$\lambda = \frac{1}{3} c_V \rho \langle v \rangle \langle l \rangle,$$

где c_V — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме; ρ — плотность газа; $\langle v \rangle$ — средняя арифметическая скорость теплового движения его молекул; $\langle l \rangle$ — средняя длина свободного пробега молекул.

- Закон диффузии Фика

$$M = -D \frac{d\rho}{dx} St,$$

где M — масса вещества, переносимая посредством диффузии через площадь S за время t ; $d\rho/dx$ — градиент плотности, D — диффузия:

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

- Закон Ньютона для внутреннего трения (вязкости)

$$F = -\eta \frac{dv}{dx} S,$$

где F — сила внутреннего трения между движущимися слоями площадью S ; dv/dx — градиент скорости; η — динамическая вязкость:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle.$$

Основы термодинамики

- Средняя кинетическая энергия поступательного движения, приходящаяся на одну степень свободы молекулы,

$$\langle \varepsilon_1 \rangle = \frac{1}{2} kT.$$

- Средняя энергия молекулы

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT,$$

где i — сумма поступательных, вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы ($i = n_{\text{пост}} + n_{\text{вращ}} + 2n_{\text{колеб}}$).

- Внутренняя энергия идеального газа

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

где ν — количество вещества; m — масса газа; M — молярная масса газа; R — молярная газовая постоянная.

- Первое начало термодинамики

$$Q = \Delta U + A,$$

где Q — количество теплоты, сообщенное системе или отданное ею; ΔU — изменение ее внутренней энергии; A — работа системы против внешних сил.

- Первое начало термодинамики для малого изменения системы

$$\delta Q = dU + \delta A.$$

- Связь между молярной C_m и удельной c теплоемкостями газа

$$C_m = cM,$$

где M — молярная масса газа.

- Молярные теплоемкости газа при постоянном объеме и постоянном давлении

$$C_v = \frac{i}{2} R, \quad C_p = \frac{i+2}{2} R.$$

- Уравнение Майера

$$C_p = C_v + R.$$

- Изменение внутренней энергии идеального газа

$$dU = \frac{m}{M} C_v dT.$$

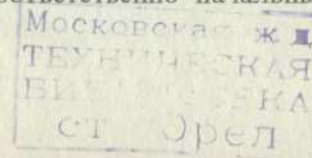
- Работа, совершаемая газом при изменении его объема,

$$dA = p dV.$$

- Полная работа при изменении объема газа

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV,$$

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



- Работа газа: при изобарном процессе

$$A = p(V_2 - V_1), \quad \text{или} \quad A = \frac{m}{M} R (T_2 - T_1);$$

при изотермическом процессе

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad \text{или} \quad A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

- Уравнение адиабатического процесса (уравнение Пуассона)

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad TV^{\gamma-1} = \text{const}, \quad T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{const},$$

где $\gamma = C_p/C_v = (i+2)/i$ — показатель адиабаты.

- Работа в случае адиабатического процесса

$$A = \frac{m}{M} C_v (T_1 - T_2), \quad \text{или}$$

$$A = \frac{RT_1}{\gamma-1} \frac{m}{M} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right] = \frac{p_1 V_1}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right],$$

где T_1 , T_2 и V_1 , V_2 — соответственно начальные и конечные температура и объем газа.

- Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса (цикла)

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1},$$

где Q_1 — количество теплоты, полученное системой; Q_2 — количество теплоты, отданное системой; A — работа, совершаемая за цикл.

- Термический коэффициент полезного действия цикла Карно

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1 — температура нагревателя; T_2 — температура холодильника.

- Изменение энтропии при равновесном переходе из состояния 1 в состояние 2

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \int_1^2 \frac{dU + dA}{T}.$$

Реальные газы, жидкости и твердые тела

- Уравнение состояния реальных газов (уравнение Ван-дер-Ваальса) для моля газа

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2} \right) (V_m - b) = RT,$$

где V_m — молярный объем; a и b — постоянные Ван-дер-Ваальса, различные для разных газов.

- Уравнение Ван-дер-Ваальса для произвольной массы газа

$$\left(p + \frac{v^2 a}{V^2} \right) \left(\frac{V}{v} - b \right) = RT, \quad \text{или} \quad \left(p + \frac{v^2 a}{V^2} \right) (V - vb) = vRT,$$

где $v = m/M$ — количество вещества.

- Внутреннее давление, обусловленное силами взаимодействия молекул,

$$p' = a/V_m^2.$$

- Связь критических параметров — объема, давления и температуры — с постоянными a и b Ван-дер-Ваальса

$$V_x = 3b, \quad p_x = a/(27b^2), \quad T_x = 8a/(27Rb).$$

- Внутренняя энергия произвольной массы реального газа

$$U = v(C_v T - a/V_m),$$

где C_v — молярная теплоемкость газа при постоянном объеме, $v = M/m$ — количества вещества.

- Энтальпия системы

$$U_1 + p_1 V_1 = U_2 + p_2 V_2,$$

где индексы 1 и 2 соответствуют начальному и конечному состояниям системы.

- Поверхностное натяжение

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

где F — сила поверхностного натяжения, действующая на контур l , ограничивающий поверхность жидкости; ΔE — поверхностная энергия, связанная с площадью ΔS поверхности пленки.

- Формула Лапласа, позволяющая определить избыточное давление для произвольной поверхности жидкости двойкой 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, если центр кривизны вне жидкости (вогнутый мениск). Для сферической поверхности

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

- Высота подъема жидкости в капиллярной трубке

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

где θ — краевой угол; r — радиус капилляра; ρ — плотность жидкости; g — ускорение свободного падения.

- Закон Дюлонга и Пти

$$C_V = 3R,$$

где C_V — молярная (атомная) теплоемкость химически простых твердых тел.

● Уравнение Клапейрона — Клаузиуса, позволяющее определить изменение температуры фазового перехода в зависимости от изменения давления при равновесно протекающем процессе,

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)},$$

где L — теплота фазового перехода; $(V_2 - V_1)$ — изменение объема вещества при переходе его из первой фазы во вторую; T — температура перехода (процесс изотермический).

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Электрическое поле

- Закон Кулона

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2},$$

где F — сила взаимодействия двух точечных зарядов Q_1 и Q_2 в вакууме; r — расстояние между зарядами; ϵ_0 — электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

- Напряженность и потенциал электростатического поля

$$E = F/Q_0, \quad \varphi = \Pi/Q_0, \quad \text{или} \quad \varphi = A_\infty/Q_0,$$

где F — сила, действующая на точечный положительный заряд Q_0 , помещенный в данную точку поля; Π — потенциальная энергия заряда Q_0 ; A_∞ — работа перемещения заряда Q_0 из данной точки поля за его пределы.

- Напряженность и потенциал электростатического поля точечного заряда Q на расстоянии r от заряда

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}, \quad \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}.$$

- Поток вектора напряженности сквозь площадку dS

$$d\Phi_E = E dS = E_n dS,$$

где $dS = dS \mathbf{n}$ — вектор, модуль которого равен dS , а направление совпадает с нормалью $\mathbf{n}$ к площадке; E_n — проекция вектора E на нормаль $\mathbf{n}$ к площадке dS .

- Поток вектора напряженности через произвольную поверхность S

$$\Phi_E = \int_S \mathbf{E} d\mathbf{S} = \int_S E_n dS.$$

- Принцип суперпозиции (наложения) электростатических полей

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i; \quad \varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i,$$

где E_i , φ_i — соответственно напряженность и потенциал поля, создаваемого зарядом Q_i .

- Связь между напряженностью и потенциалом электростатического поля

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi, \quad \text{или} \quad \mathbf{E} = -\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \mathbf{k}\right),$$

где $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$, $\mathbf{k}$ — единичные векторы координатных осей.

- В случае поля, обладающего центральной или осевой симметрией,

$$E = -d\varphi/dr.$$

- Электрический момент диполя (дипольный момент)

$$\mathbf{p} = |Q|\mathbf{l},$$

где $\mathbf{l}$ — плечо диполя.

- Линейная, поверхностная и объемная плотности зарядов

$$\tau = dQ/dl; \quad \sigma = dQ/dS; \quad \rho = dQ/dV,$$

т. е. соответственно заряд, приходящийся на единицу длины, поверхности и объема.

- Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме

$$\Phi_E = \oint_S \mathbf{E} d\mathbf{S} = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_{i=1}^n Q_i = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_V \rho dV,$$

где ε_0 — электрическая постоянная; $\sum_{i=1}^n Q_i$ — алгебраическая сумма зарядов, заключенных внутри замкнутой поверхности S ; n — число зарядов; ρ — объемная плотность зарядов.

- Напряженность поля, создаваемого равномерно заряженной бесконечной плоскостью,

$$E = \sigma / (2\varepsilon_0).$$

- Напряженность поля, создаваемого двумя бесконечными параллельными разноименно заряженными плоскостями,

$$E = \sigma / \varepsilon_0.$$

- Напряженность поля, создаваемого равномерно заряженной сферической поверхностью радиусом R с общим зарядом Q на расстоянии r от центра сферы,

$$E = 0 \quad \text{при } r < R \quad (\text{внутри сферы});$$

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q}{r^2} \quad \text{при } r \geq R \quad (\text{вне сферы}).$$

- Напряженность поля, создаваемого объемно заряженным шаром радиусом R с общим зарядом Q на расстоянии r от центра шара,

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q}{R^3} r \quad \text{при } r \leq R \quad (\text{внутри шара});$$

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q}{r^2} \quad \text{при } r \geq R \quad (\text{вне шара}).$$

- Напряженность поля, создаваемого равномерно заряженным бесконечным цилиндром радиусом R на расстоянии r от оси цилиндра,

$$E = 0 \quad \text{при } r < R \quad (\text{внутри цилиндра});$$

$$E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \frac{\tau}{r} \quad \text{при } r \geq R \quad (\text{вне цилиндра}).$$

- Циркуляция вектора напряженности электростатического поля вдоль замкнутого контура

$$\oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l} = \int_L E_l dl = 0,$$

где E_l — проекция вектора $\mathbf{E}$ на направление элементарного перемещения $d\mathbf{l}$. Интегрирование производится по любому замкнутому пути L .

- Работа, совершаемая силами электростатического поля при перемещении заряда Q_0 из точки 1 в точку 2,

$$A_{12} = Q_0(\varphi_1 - \varphi_2), \quad \text{или} \quad A_{12} = Q_0 \int_1^2 \mathbf{E} d\mathbf{l} = Q_0 \int_1^2 E_l dl,$$

где E_l — проекция вектора $\mathbf{E}$ на направление элементарного перемещения $d\mathbf{l}$.

- Поляризованность

$$\mathbf{P} = \sum_i \mathbf{p}_i / V,$$

где V — объем диэлектрика; $\mathbf{p}_i$ — дипольный момент i -й молекулы.

- Связь между поляризованностью диэлектрика и напряженностью электростатического поля

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E},$$

где ε — диэлектрическая восприимчивость вещества.

- Связь диэлектрической проницаемости ε с диэлектрической восприимчивостью ε

$$\varepsilon = 1 + \varepsilon.$$

- Связь между напряженностью E поля в диэлектрике и напряженностью E_0 внешнего поля

$$E = E_0 - P/\varepsilon_0, \quad \text{или} \quad E = E_0/\varepsilon.$$

- Связь между векторами электрического смещения и напряженностью электростатического поля

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}.$$

- Связь между $\mathbf{D}$, $\mathbf{E}$ и $\mathbf{P}$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}.$$

- Теорема Гаусса для электростатического поля в диэлектрике

$$\Phi_D = \oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = \oint_S D_n dS = \sum_{i=1}^n Q_i,$$

где $\sum_{i=1}^n Q_i$ — алгебраическая сумма заключенных внутри замкну-

той поверхности S свободных электрических зарядов; D_n — проекция вектора $\mathbf{D}$ на нормаль $\mathbf{n}$ к площадке dS ; $dS = dS \cdot \mathbf{n}$ — вектор, модуль которого равен dS , а направление совпадает с нормалью $\mathbf{n}$ к площадке.

● Напряженность электростатического поля у поверхности проводника

$$E = \sigma / (\epsilon_0 \epsilon),$$

где σ — поверхностная плотность зарядов.

● Емкость уединенного проводника

$$C = Q / \varphi,$$

где Q — заряд, сообщенный проводнику; φ — потенциал проводника.

● Емкость плоского конденсатора

$$C = \epsilon_0 \epsilon S / d,$$

где S — площадь каждой пластины конденсатора; d — расстояние между пластинами.

● Емкость цилиндрического конденсатора

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln(r_2/r_1)},$$

где l — длина обкладок конденсатора; r_1 и r_2 — радиусы полых коаксиальных цилиндров.

● Емкость сферического конденсатора

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1},$$

где r_1 и r_2 — радиусы концентрических сфер.

● Емкость системы конденсаторов при последовательном и параллельном соединениях

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}, \quad C = \sum_{i=1}^n C_i,$$

где C_i — емкость i -го конденсатора; n — число конденсаторов.

● Энергия уединенного заряженного проводника

$$W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{Q\varphi}{2} = \frac{Q^2}{2C}.$$

● Энергия взаимодействия системы точечных зарядов

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Q_i \varphi_i,$$

где φ_i — потенциал, создаваемый в той точке, где находится заряд Q_i , всеми зарядами, кроме i -го.

● Энергия заряженного конденсатора

$$W = \frac{C(\Delta\varphi)^2}{2} = \frac{Q\Delta\varphi}{2} = \frac{Q^2}{2C},$$

где Q — заряд конденсатора; C — его емкость; $\Delta\varphi$ — разность потенциалов между обкладками.

● Сила притяжения между двумя разноименно заряженными обкладками конденсатора

$$|F| = \frac{Q^2}{2\epsilon_0\epsilon S} = \frac{\sigma^2 S}{2\epsilon_0\epsilon} = \frac{\epsilon_0\epsilon E^2 S}{2}.$$

● Энергия электростатического поля плоского конденсатора

$$W = \frac{\epsilon_0\epsilon E^2}{2} Sd = \frac{\epsilon_0\epsilon S U^2}{2d} = \frac{\epsilon_0\epsilon E^2}{2} V,$$

где S — площадь одной пластины; U — разность потенциалов между пластинами; $V = Sd$ — объем конденсатора.

● Объемная плотность энергии

$$w = \epsilon_0\epsilon E^2 / 2 = ED / 2,$$

где D — электрическое смещение.

Постоянный электрический ток

● Сила и плотность электрического тока

$$I = dQ/dt; \quad j = I/S,$$

где S — площадь поперечного сечения проводника.

● Плотность тока в проводнике

$$\mathbf{j} = ne \langle \mathbf{v} \rangle,$$

где $\langle \mathbf{v} \rangle$ — скорость упорядоченного движения зарядов в проводнике; n — концентрация зарядов.

● Электродвижущая сила, действующая в цепи,

$$\mathcal{E} = A/Q_0, \text{ или } \mathcal{E} = \oint \mathbf{E}_{\text{ст}} d\mathbf{l},$$

где Q_0 — единичный положительный заряд; A — работа сторонних сил; $\mathbf{E}_{\text{ст}}$ — напряженность поля сторонних сил.

- Сопротивление R однородного линейного проводника, проводимость G проводника и удельная электрическая проводимость γ вещества проводника

$$R = \rho l / S; \quad G = 1/R; \quad \gamma = 1/\rho,$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление; S — площадь поперечного сечения проводника; l — его длина.

- Сопротивление проводников при последовательном и параллельном соединении

$$R = \sum_{i=1}^n R_i \quad \text{и} \quad \frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i},$$

где R_i — сопротивление i -го проводника; n — число проводников.

- Зависимость удельного сопротивления ρ от температуры

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

где α — температурный коэффициент сопротивления.

- Закон Ома:
для однородного участка цепи

$$I = U/R;$$

для неоднородного участка цепи

$$I = (\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12})/R;$$

для замкнутой цепи

$$I = \mathcal{E}/R,$$

где U — напряжение на участке цепи; R — сопротивление цепи (участка цепи); $(\varphi_1 - \varphi_2)$ — разность потенциалов на концах участка цепи; $\mathcal{E}_{12}$ — э. д. с. источников тока, входящих в участок; $\mathcal{E}$ — э. д. с. всех источников тока цепи.

- Закон Ома в дифференциальной форме

$$\mathbf{j} = \gamma \mathbf{E},$$

где $\mathbf{E}$ — напряженность электростатического поля.

- Работа тока за время t

$$A = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t.$$

- Мощность тока

$$P = UI = I^2 R = U^2/R.$$

- Закон Джоуля — Ленца

$$Q = I^2 R t = IUt,$$

где Q — количество теплоты, выделяющееся в участке цепи за время t .

- Закон Джоуля — Ленца в дифференциальной форме

$$w = jE = \gamma E^2,$$

где w — удельная тепловая мощность тока.

- Правила Кирхгофа

$$\sum_k I_k = 0; \quad \sum_i I_i R_i = \sum_k \mathcal{E}_k$$

Электрические токи в металлах,
в вакууме и газах

- Контактная разность потенциалов на границе двух металлов 1 и 2

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2},$$

где A_1, A_2 — работы выходов свободных электронов из металлов; k — постоянная Больцмана; n_1, n_2 — концентрация свободных электронов в металлах.

- Термоэлектродвижущая сила

$$\mathcal{E} = \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_1}{n_2},$$

где $(T_1 - T_2)$ — разность температур спаев.

- Формула Ричардсона — Дешмана

$$j_{\text{нас}} = C T^2 \exp[-A/(kT)],$$

где $j_{\text{нас}}$ — плотность тока насыщения термоэлектронной эмиссии; C — постоянная, теоретически одинаковая для всех металлов; A — работа выхода электрона из металла.

Магнитное поле

- Механический момент, действующий на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле,

$$\mathbf{M} = [\mathbf{p}_m \mathbf{B}],$$

где $\mathbf{B}$ — магнитная индукция; $\mathbf{p}_m$ — магнитный момент контура с током:

$$\mathbf{p}_m = IS\mathbf{n},$$

где S — площадь контура с током; $\mathbf{n}$ — единичный вектор нормали к поверхности контура.

● Связь магнитной индукции $\mathbf{B}$ и напряженности $\mathbf{H}$ магнитного поля

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H},$$

где μ_0 — магнитная постоянная; μ — магнитная проницаемость среды.

● Закон Био — Савара — Лапласа

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I[d\mathbf{l}, \mathbf{r}]}{r^3},$$

где $d\mathbf{B}$ — магнитная индукция поля, создаваемая элементом длины $d\mathbf{l}$ проводника с током I ; $\mathbf{r}$ — радиус-вектор, проведенный от $d\mathbf{l}$ к точке, в которой определяется магнитная индукция.

● Модуль вектора $d\mathbf{B}$

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{Id \sin \alpha}{r^2},$$

где α — угол между векторами $d\mathbf{l}$ и $\mathbf{r}$.

● Принцип суперпозиции (наложения) магнитных полей

$$\mathbf{B} = \sum_i \mathbf{B}_i,$$

где $\mathbf{B}$ — магнитная индукция результирующего поля; $\mathbf{B}_i$ — магнитные индукции складываемых полей.

● Магнитная индукция поля, создаваемого бесконечно длинным прямым проводником с током,

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I}{R},$$

где R — расстояние от оси проводника.

● Магнитная индукция в центре кругового проводника с током

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2R},$$

где R — радиус кривизны проводника.

● Закон Ампера

$$d\mathbf{F} = I[d\mathbf{l}, \mathbf{B}],$$

где $d\mathbf{F}$ — сила, действующая на элемент длины $d\mathbf{l}$ проводника с током I , помещенный в магнитное поле с индукцией $\mathbf{B}$.

Модуль силы Ампера

$$dF = IB d\mathbf{l} \sin \alpha,$$

где α — угол между векторами $d\mathbf{l}$ и $\mathbf{B}$.

● Сила взаимодействия двух прямых бесконечных прямолинейных параллельных проводников с токами I_1 и I_2

$$dF = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{R} d\mathbf{l},$$

где R — расстояние между проводниками; $d\mathbf{l}$ — отрезок проводника.

● Магнитное поле точечного заряда Q , свободно движущегося с нерелятивистской скоростью $\mathbf{v}$,

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{Q[\mathbf{v}\mathbf{r}]}{r^3},$$

где $\mathbf{r}$ — радиус-вектор, проведенный от заряда к точке наблюдения.

Модуль магнитной индукции

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{Qv}{r^2} \sin \alpha,$$

где α — угол между векторами $\mathbf{v}$ и $\mathbf{r}$.

● Сила Лоренца

$$\mathbf{F} = Q[\mathbf{v}\mathbf{B}],$$

где $\mathbf{F}$ — сила, действующая на заряд Q , движущийся в магнитном поле со скоростью $\mathbf{v}$.

● Формула Лоренца

$$\mathbf{F} = QE + Q[\mathbf{v}\mathbf{B}],$$

где $\mathbf{F}$ — результирующая сила, действующая на движущийся заряд Q , если на него действуют электрическое поле напряженностью $\mathbf{E}$ и магнитное поле индукцией $\mathbf{B}$.

● Холловская поперечная разность потенциалов

$$\Delta\varphi = RIB/d,$$

где B — магнитная индукция; I — сила тока; d — толщина пластинки; $R = 1/(en)$ — постоянная Холла (n — концентрация электронов).

● Закон полного тока для магнитного поля в вакууме (теорема о циркуляции вектора $\mathbf{B}$)

$$\oint_L \mathbf{B} d\mathbf{l} = \oint_L B_l d\mathbf{l} = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k,$$

где μ_0 — магнитная постоянная; $d\mathbf{l}$ — вектор элементарной длины контура, направленной вдоль обхода контура; $B_l = B \cos \alpha$ — составляющая вектора $\mathbf{B}$ в направлении касательной контура L произвольной формы (с учетом выбранного направления обхода); α — угол между векторами $\mathbf{B}$ и $d\mathbf{l}$; $\sum_{k=1}^n I_k$ — алгебраическая сумма токов, охватываемых контуром.

● Магнитная индукция поля внутри соленоида (в вакууме), имеющего N витков,

$$B = \mu_0 NI/l,$$

где l — длина соленоида.

● Магнитная индукция поля внутри тороида (в вакууме)

$$B = \mu_0 NI/(2\pi r).$$

● Поток вектора магнитной индукции (магнитный поток) через площадку dS

$$d\Phi_B = \mathbf{B} d\mathbf{S} = B_n dS,$$

где $d\mathbf{S} = dS \mathbf{n}$ — вектор, модуль которого равен dS , а направление совпадает с нормалью $\mathbf{n}$ к площадке; B_n — проекция вектора $\mathbf{B}$ на направление нормали к площадке.

● Поток вектора магнитной индукции сквозь произвольную поверхность S

$$\Phi_B = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = \int_S B_n dS.$$

● Потокосцепление (полный магнитный поток, сцепленный со всеми витками соленоида)

$$\Phi = \mu_0 \mu N^2 IS/l,$$

где μ — магнитная проницаемость среды.

● Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

$$dA = I d\Phi,$$

где $d\Phi$ — магнитный поток, пересеченный движущимся проводником.

● Работа по перемещению замкнутого контура с током в магнитном поле

$$dA = I d\Phi',$$

где $d\Phi'$ — изменение магнитного потока, сцепленного с контуром.

Электромагнитная индукция

● Закон Фарадея

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt},$$

где $\mathcal{E}_i$ — э. д. с. индукции.

● Э. д. с. индукции, возникающая в рамке площадью S при вращении рамки с угловой скоростью ω в однородном магнитном поле с индукцией B ,

$$\mathcal{E}_i = BS\omega \sin \omega t,$$

где ωt — мгновенное значение угла между вектором $\mathbf{B}$ и вектором нормали $\mathbf{n}$ к плоскости рамки.

● Магнитный поток, создаваемый током I в контуре с индуктивностью L ,

$$\Phi = LI.$$

● Э. д. с. самоиндукции

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt},$$

где L — индуктивность контура.

● Индуктивность соленоида (тороида)

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

где N — число витков соленоида; l — его длина.

● Токи при размыкании и при замыкании цепи

$$I = I_0 \exp[-t/\tau]; \quad I = I_0 [1 - \exp[-t/\tau]],$$

где $\tau = L/R$ — время релаксации (L — индуктивность; R — сопротивление).

● Э. д. с. взаимной индукции (э. д. с., индуцируемая изменением силы тока в соседнем контуре)

$$\mathcal{E} = -L_{12} \frac{dI}{dt},$$

где L_{12} — взаимная индуктивность контуров.

● Взаимная индуктивность двух катушек (с числом витков N_1 и N_2), намотанных на общий тороидальный сердечник,

$$L_{12} = L_{21} = \mu_0 \mu N_1 N_2 S/l,$$

где μ — магнитная проницаемость сердечника; l — длина сердечника по средней линии; S — площадь сердечника.

● Коэффициент трансформации

$$N_2/N_1 = \mathcal{E}_2/\mathcal{E}_1 = I_1/I_2,$$

где N , $\mathcal{E}$, I — соответственно число витков, э. д. с. и сила тока в обмотках трансформатора.

● Энергия магнитного поля, создаваемого током в замкнутом контуре индуктивностью L , по которому течет ток I ,

$$W = LI^2/2.$$

● Объемная плотность энергии однородного магнитного поля длинного соленоида

$$w = B^2/(2\mu_0\mu) = \mu_0\mu H^2/2 = BH/2.$$

Магнитные свойства вещества

● Связь орбитального магнитного $\mathbf{p}_m$ и орбитального механического $\mathbf{L}_l$ моментов электрона

$$\mathbf{p}_m = -g\mathbf{L}_l = -\frac{e}{2m}\mathbf{L}_l,$$

где $g = e/(2m)$ — гиромагнитное отношение орбитальных моментов.

● Намагниченность

$$\mathbf{J} = \mathbf{P}_m/V = \sum \mathbf{p}_a/V,$$

где $\mathbf{P}_m = \sum \mathbf{p}_a$ — магнитный момент магнетика, равный векторной сумме магнитных моментов отдельных молекул.

● Связь между намагниченностью и напряженностью магнитного поля

$$\mathbf{J} = \chi\mathbf{H},$$

где χ — магнитная восприимчивость вещества.

● Связь между векторами $\mathbf{B}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{J}$

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{J}),$$

где μ_0 — магнитная постоянная.

● Связь между магнитной проницаемостью и магнитной восприимчивостью вещества

$$\mu = 1 + \chi.$$

● Закон полного тока для магнитного поля в веществе (теорема о циркуляции вектора $\mathbf{B}$)

$$\oint_L \mathbf{B} d\mathbf{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0(I + I'),$$

где $d\mathbf{l}$ — вектор элементарной длины контура, направленный вдоль обхода контура; B_l — составляющая вектора $\mathbf{B}$ в направлении касательной контура L произвольной формы; I и I' — соответственно алгебраические суммы макротоков (токов проводимости) и микротоков (молекулярных токов), охватываемых заданным контуром.

● Теорема о циркуляции вектора напряженности магнитного поля

$$\oint_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = I,$$

где I — алгебраическая сумма токов проводимости, охватываемых контуром L .

Основы теории Максвелла для электромагнитного поля

● Плотность тока смещения

$$\mathbf{j}_{\text{см}} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t},$$

где $\mathbf{D}$ — электрическое смещение; $\epsilon_0 (\partial \mathbf{E}/\partial t)$ — плотность тока смещения в вакууме; $\partial \mathbf{P}/\partial t$ — плотность тока поляризации.

● Полная система уравнений Максвелла: в интегральной форме

$$\oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S}; \quad \oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = \int_V \rho dV;$$

$$\oint_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_S \left(\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) d\mathbf{S}; \quad \oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0,$$

в дифференциальной форме

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B}/\partial t; \quad \text{div} \mathbf{D} = \rho;$$

$$\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D}/\partial t; \quad \text{div} \mathbf{B} = 0,$$

где $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}$; $\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}$; $\mathbf{j} = \gamma \mathbf{E}$ (ϵ_0 и μ_0 — соответственно электрическая и магнитная постоянные; ϵ и μ — диэлектрическая и магнитная проницаемости; γ — удельная проводимость вещества).

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Механические и электромагнитные колебания

- Уравнение гармонических колебаний

$$s = A \cos(\omega_0 t + \varphi),$$

где s — смещение колеблющейся величины от положения равновесия; A — амплитуда колебаний; $\omega_0 = 2\pi/T = 2\pi\nu$ — круговая (циклическая) частота; $\nu = 1/T$ — частота; T — период колебаний; φ_0 — начальная фаза.

- Скорость и ускорение точки, совершающей гармонические колебания,

$$ds/dt = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi) = A\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi + \pi/2);$$

$$d^2s/dt^2 = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi) = -\omega_0^2 s.$$

- Кинетическая энергия колеблющейся точки массой m

$$T = 1/2 mv^2 = 1/2 mA^2 \omega_0^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi).$$

- Потенциальная энергия

$$\Pi = 1/2 mA^2 \omega_0^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi).$$

- Полная энергия

$$E = 1/2 mA^2 \omega_0^2.$$

- Дифференциальное уравнение гармонических колебаний материальной точки массой m

$$m\ddot{x} = -kx, \text{ или } \ddot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad x = A \cos(\omega_0 t + \varphi),$$

где k — коэффициент упругости ($k = \omega_0^2 m$), A — амплитуда колебаний, ω_0 — круговая частота, φ_0 — начальная фаза.

- Период колебаний пружинного маятника

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

где m — масса пружинного маятника; k — жесткость пружины.

- Период колебаний физического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{J/(mgl)} = 2\pi\sqrt{L/g},$$

где J — момент инерции маятника относительно оси колебаний; l — расстояние между точкой подвеса и центром масс маятника; $L = J/(ml)$ — приведенная длина физического маятника; g — ускорение свободного падения.

- Период колебаний математического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{l/g},$$

где l — длина маятника.

- Формула Томсона, устанавливающая связь между периодом T собственных колебаний в контуре без активного сопротивления и индуктивностью L и емкостью контура C ,

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

- Дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний заряда в контуре и его решение:

$$\ddot{Q} + \frac{1}{LC}Q = 0; \quad Q = Q_m \cos(\omega_0 t + \varphi),$$

где Q_m — амплитуда колебаний заряда; $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ — собственная частота контура.

- Амплитуда A результирующего колебания, получающегося при сложении двух гармонических колебаний одинакового направления и одинаковой частоты,

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

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

Начальная фаза результирующего колебания

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

- Период биений

$$T = 2\pi/\Delta\omega.$$

- Уравнение траектории движения точки, участвующей в двух взаимно перпендикулярных колебаниях одинаковой частоты,

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{2xy}{AB} \cos \varphi + \frac{y^2}{B^2} = \sin^2 \varphi,$$

где A и B — амплитуды складываемых колебаний; φ — разность фаз обоих колебаний.

- Дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний линейной системы и его решение:

$$\frac{d^2s}{dt^2} + 2\delta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = 0; \quad s = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi),$$

где s — колеблющаяся величина, описывающая физический процесс; δ — коэффициент затухания ($\delta = r/(2m)$ в случае механического

ких колебаний и $\delta = R/(2L)$ в случае электромагнитных колебаний); ω_0 — циклическая частота свободных незатухающих колебаний той же колебательной системы; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ — частота затухающих колебаний; $A_0 e^{-\delta t}$ — амплитуда затухающих колебаний.

● Декремент затухания

$$\frac{A(t)}{A(t+T)} = e^{\delta T},$$

где $A(t)$ и $A(t+T)$ — амплитуды двух последовательных колебаний, соответствующих моментам времени, отличающимся на период.

● Логарифмический декремент затухания

$$\Theta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \delta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N},$$

где $\tau = 1/\delta$ — время релаксации; N — число колебаний, совершаемых за время уменьшения амплитуды в e раз.

● Добротность колебательной системы

$$Q = \frac{\pi}{\Theta} = \frac{\omega_0}{2\delta}.$$

● Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение для установившихся колебаний:

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + 2\delta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = x_0 \cos \omega t; \quad s = A \cos(\omega t - \varphi),$$

где s — колеблющаяся величина, описывающая физический процесс ($x_0 = F_0/m$ в случае механических колебаний, $x_0 = U_m/L$ в случае электромагнитных колебаний);

$$A = \frac{x_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}}; \quad \varphi = \arctg \frac{2\delta \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$

● Резонансная частота и резонансная амплитуда

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}; \quad A_{\text{рез}} = \frac{x_0}{2\delta \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}.$$

● Полное сопротивление Z цепи переменного тока, содержащей последовательно включенные резистор сопротивлением R , катушку индуктивностью L и конденсатор емкостью C , на концы которой подается переменное напряжение $U = U_m \cos \omega t$,

$$Z = \sqrt{R^2 + [\omega L - 1/(\omega C)]^2} = \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2},$$

где $R_L = \omega L$ — реактивное индуктивное сопротивление; $R_C = 1/(\omega C)$ — реактивное емкостное сопротивление.

● Сдвиг фаз между напряжением и силой тока

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - 1/(\omega C)}{R}.$$

● Действующие (эффективные) значения тока и напряжения

$$I = I_m / \sqrt{2}; \quad U = U_m / \sqrt{2},$$

где I_m и U_m — амплитудные значения силы тока и напряжения.

● Средняя мощность, выделяемая в цепи переменного тока,

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi,$$

где

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + [\omega L - 1/(\omega C)]^2}}.$$

Упругие волны

● Связь длины волны λ , периода T колебаний и частоты ν

$$\lambda = \nu T; \quad \nu = \lambda \nu,$$

где ν — скорость распространения колебаний в среде (фазовая скорость).

● Уравнение плоской волны, распространяющейся вдоль положительного направления оси x ,

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi_0),$$

где $\xi(x, t)$ — смещение точек среды с координатой x в момент времени t ; A — амплитуда волны; ω — циклическая (круговая) частота; $k = 2\pi/\lambda = 2\pi/(\nu T) = \omega/\nu$ — волновое число (λ — длина волны; ν — фазовая скорость; T — период колебаний); φ_0 — начальная фаза колебаний.

● Связь между разностью фаз δ и разностью хода Δ

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta.$$

● Условия максимума и минимума амплитуды при интерференции волн

$$\Delta_{\text{max}} = \pm 2m \frac{\lambda}{2}; \quad \Delta_{\text{min}} = \pm (2m+1) \frac{\lambda}{2},$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$

- Фазовая v и групповая u скорости, а также связь между ними

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

- Уравнение стоячей волны

$$\xi(x, t) = 2A \cos \frac{2\pi}{\lambda} x \cos \omega t = 2A \cos kx \cos \omega t.$$

- Координаты пучностей и узлов

$$x_n = \pm m \frac{\lambda}{2}; \quad x_y = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2} \quad (m=0, 1, 2, \dots).$$

- Уровень интенсивности звука (в беллах)

$$L = \lg(I/I_0),$$

где I — интенсивность звука; I_0 — интенсивность звука на пороге слышимости ($I_0 = 1 \text{ пВт/м}^2$).

- Скорость распространения звуковых волн в газах

$$v = \sqrt{\gamma RT/M},$$

где R — молярная газовая постоянная; M — молярная масса; $\gamma = C_p/C_v$ — отношение молярных теплоемкостей газа при постоянных давлении и объеме; T — термодинамическая температура.

- Эффект Доплера в акустике

$$v = \frac{(v \pm v_{\text{пр}}) v_0}{v \mp v_{\text{ист}}},$$

где v — частота звука, воспринимаемая движущимся приемником; v_0 — частота звука, посылаемая источником; $v_{\text{пр}}$ — скорость движения приемника; $v_{\text{ист}}$ — скорость движения источника; v — скорость распространения звука. Верхний знак берется, если при движении источника или приемника происходит их сближение, нижний знак — в случае их взаимного удаления.

Электромагнитные волны

- Фазовая скорость распространения электромагнитных волн в среде

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}},$$

где $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ — скорость распространения света в вакууме;

ϵ_0 и μ_0 — соответственно электрическая и магнитная постоянные; ϵ и μ — соответственно электрическая и магнитная проницаемости среды.

- Связь между мгновенными значениями напряженностей электрического (E) и магнитного (H) полей электромагнитной волны

$$\sqrt{\epsilon_0 \epsilon} E = \sqrt{\mu_0 \mu} H.$$

- Уравнения плоской электромагнитной волны

$$E = E_0 \cos(\omega t - kx + \varphi); \quad H = H_0 \cos(\omega t - kx + \varphi),$$

где E_0 и H_0 — соответственно амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей волны; ω — круговая частота; $k = \omega/v$ — волновое число; φ — начальные фазы колебаний в точках с координатой $x=0$.

- Объемная плотность энергии электромагнитного поля

$$w = \epsilon_0 \epsilon E^2 / 2 + \mu_0 \mu H^2 / 2.$$

- Плотность потока электромагнитной энергии — вектор Умова — Пойнтинга

$$S = [EH].$$

ОПТИКА. КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

Элементы геометрической оптики

- Законы отражения и преломления света

$$i_1 = i_1; \quad \sin i_1 / \sin i_2 = n_{21},$$

где i_1 — угол падения; i_1' — угол отражения; i_2 — угол преломления; $n_{21} = n_2/n_1$ — относительный показатель преломления второй среды относительно первой; n_1 и n_2 — абсолютные показатели преломления первой и второй среды.

- Предельный угол полного отражения при распространении света из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную

$$\sin i_{\text{пр}} = n_2/n_1 = n_{21}.$$

- Преломление на сферической поверхности (для параксиальных лучей)

$$n_2/b - n_1/a = (n_2 - n_1)/R,$$

где R — радиус сферической поверхности; n_1 и n_2 — показатели преломления сред по разные стороны сферической поверхности; a — расстояние от точки, лежащей на оптической оси сферической поверхности, до преломляющей поверхности; b — расстояние от поверхности до изображения. В формуле $R > 0$ для выпуклой поверхности, $R < 0$ для вогнутой.

● Формула сферического зеркала

$$1/f = 2/R = 1/a + 1/b,$$

где a и b — соответственно расстояния от полюса зеркала до предмета и изображения; f — фокусное расстояние зеркала; R — радиус кривизны зеркала.

● Оптическая сила тонкой линзы

$$\Phi = 1/f = (N - 1)(1/R_1 + 1/R_2) = 1/a + 1/b,$$

где f — фокусное расстояние линзы; $N = n/n_1$ — относительный показатель преломления (n и n_1 — соответственно абсолютные показатели преломления линзы и окружающей среды); R_1 и R_2 — радиусы кривизны поверхностей ($R > 0$ для выпуклой поверхности; $R < 0$ для вогнутой); a и b — соответственно расстояния от оптического центра линзы до предмета и изображения.

● Сила излучения

$$I_e = \Phi_e / \omega,$$

где Φ_e — поток излучения источника; ω — телесный угол, в пределах которого это излучение распространяется.

● Полный световой поток, испускаемый изотропным точечным источником,

$$\Phi_0 = 4\pi I,$$

где I — сила света источника.

● Светимость поверхности

$$R = \Phi/S,$$

где Φ — световой поток, испускаемый поверхностью; S — площадь этой поверхности.

● Яркость B_φ светящейся поверхности в некотором направлении φ

$$B_\varphi = I/(S \cos \varphi),$$

где I — сила света; S — площадь поверхности; φ — угол между нормалью к элементу поверхности и направлением наблюдения.

● Освещенность поверхности

$$E = \Phi/S,$$

где Φ — световой поток, падающий на поверхность; S — площадь этой поверхности.

● Связь светимости R и яркости B при условии, что яркость не зависит от направления,

$$R = \pi B.$$

Интерференция света

● Скорость света в среде

$$v = c/n,$$

где c — скорость распространения света в вакууме; n — абсолютный показатель преломления среды.

● Разность фаз двух когерентных волн

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} (L_2 - L_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta,$$

где $L = sn$ — оптическая длина пути (s — геометрическая длина пути световой волны в среде; n — показатель преломления этой среды); $\Delta = L_2 - L_1$ — оптическая разность хода двух световых волн; λ_0 — длина волны в вакууме.

● Условие интерференционных максимумов

$$\Delta = \pm m \lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

● Условие интерференционных минимумов

$$\Delta = \pm (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

● Ширина интерференционной полосы

$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda_0,$$

где d — расстояние между двумя когерентными источниками, находящимися на расстоянии l от экрана, параллельного обоим источникам, при условии $l \gg d$.

● Условия максимумов и минимумов при интерференции света, отраженного от верхней и нижней поверхностей тонкой плоско-параллельной пленки, находящейся в воздухе ($n_0 = 1$),

$$2dn \cos r \pm \lambda_0/2 = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \lambda_0/2 = m \lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

$$2dn \cos r \pm \lambda_0/2 = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \lambda_0/2 = (2m + 1) \lambda_0/2 \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

где d — толщина пленки; n — ее показатель преломления; i — угол падения; r — угол преломления. В общем случае член $\pm \lambda_0/2$ обусловлен потерей полуволны при отражении света от границы раздела.

● Радиусы светлых колец Ньютона в отраженном свете (или темных в проходящем свете)

$$r_m = \sqrt{(m-1/2)\lambda_0 R} \quad (m=1, 2, 3, \dots),$$

где m — номер кольца; R — радиус кривизны линзы.

● Радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете (или светлых в проходящем свете)

$$r_m^* = \sqrt{m\lambda_0 R} \quad (m=0, 1, 2, \dots).$$

● В случае «просветления оптики» интерферирующие лучи в отраженном свете гасят друг друга при условии

$$n = \sqrt{n_c},$$

где n_c — показатель преломления стекла; n — показатель преломления пленки.

Дифракция света

● Радиус внешней границы m -й зоны Френеля для сферической волны

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m \lambda},$$

где m — номер зоны Френеля; λ — длина волны, a и b — соответственно расстояния диафрагмы с круглым отверстием от точечного источника и от экрана, на котором дифракционная картина наблюдается.

● Условия дифракционных максимумов и минимумов от одной щели, на которую свет падает нормально:

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

где a — ширина щели; φ — угол дифракции; m — порядок спектра; λ — длина волны.

● Условия главных максимумов и дополнительных минимумов дифракционной решетки, на которую свет падает нормально:

$$d \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} \quad (m=0, 1, 2, \dots);$$

$$d \sin \varphi = \pm m' \frac{\lambda}{N} \quad (m'=1, 2, 3, \dots, \text{кроме } 0, N, 2N, \dots),$$

где d — период дифракционной решетки; N — число штрихов решетки.

● Период дифракционной решетки

$$d = 1/N_0,$$

где N_0 — число щелей, приходящихся на единицу длины решетки.

● Условие дифракционных максимумов от пространственной решетки (формула Вульфа — Брэггов)

$$2d \sin \theta = m \lambda \quad (m=1, 2, 3, \dots),$$

где d — расстояние между атомными плоскостями кристалла; θ — угол скольжения.

● Угловая дисперсия дифракционной решетки

$$D_\varphi = \frac{\delta \varphi}{\delta \lambda} = \frac{m}{d \cos \varphi},$$

где φ — угол дифракции, m — порядок спектра, d — период решетки

● Наименьшее угловое расстояние между двумя светлыми точками, при котором изображения этих точек могут быть разрешены в фокальной плоскости объектива,

$$\varphi \geq 1,22 \lambda / D,$$

где D — диаметр объектива; λ — длина волны света.

● Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = \lambda / \delta \lambda = mN,$$

где λ , $(\lambda + \delta \lambda)$ — длины волн двух соседних спектральных линий, разрешаемых решеткой; m — порядок спектра; N — общее число штрихов решетки.

Взаимодействие электромагнитных волн с веществом

● Связь угла φ отклонения лучей призмой и преломляющего угла A призмы

$$\varphi = A(n-1),$$

где n — показатель преломления призмы.

● Связь между показателем преломления и диэлектрической проницаемостью вещества

$$n = \sqrt{\epsilon}.$$

● Зависимость показателя преломления вещества n от частоты ω внешнего поля, согласно элементарной электронной теории дисперсии,

$$n^2 = 1 + \frac{n_{0i}}{\varepsilon_0} \sum \frac{e^2/m}{\omega_{0i}^2 - \omega^2},$$

где ε_0 — электрическая постоянная; n_{0i} — концентрация электронов с собственной частотой ω_{0i} ; m — масса электрона; e — заряд электрона.

- Закон ослабления света в веществе (закон Бугера)

$$I = I_0 e^{-\alpha x},$$

где I_0 и I — интенсивности плоской монохроматической световой волны соответственно на входе и выходе слоя поглощающего вещества толщиной x ; α — коэффициент поглощения.

- Эффект Доплера для электромагнитных волн в вакууме

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + (v/c) \cos \theta},$$

где ν_0 и ν — соответственно частоты электромагнитного излучения, испускаемого источником и воспринимаемого приемником; v — скорость источника электромагнитного излучения относительно приемника; c — скорость света в вакууме; θ — угол между вектором скорости v и направлением наблюдения, измеряемый в системе отсчета, связанной с наблюдателем.

- Поперечный эффект Доплера для электромагнитных волн в вакууме ($\theta = \pi/2$)

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

- Эффект Вавилова — Черенкова

$$\cos \theta = c/(nv),$$

где θ — угол между направлением распространения излучения и вектором скорости частицы; n — показатель преломления среды.

Поляризация света

- Степень поляризации света

$$P = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}),$$

где $I_{\max}$ и $I_{\min}$ — соответственно максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света, пропускаемого анализатором.

- Закон Малюса

$$I = I_0 \cos^2 \alpha,$$

где I — интенсивность плоскополяризованного света, прошедшего через анализатор; I_0 — интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор; α — угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора.

- Закон Брюстера

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21},$$

где i_B — угол падения, при котором отраженный от диэлектрика луч является плоскополяризованным; n_{21} — относительный показатель преломления.

- Оптическая разность хода между обыкновенным и необыкновенным лучами на пути l в ячейке Керра

$$\Delta = l(n_o - n_e) = klE^2,$$

где n_o , n_e — показатели преломления соответственно обыкновенного и необыкновенного лучей в направлении, перпендикулярном оптической оси; E — напряженность электрического поля; k — постоянная.

- Оптическая разность хода для пластинки в четверть длины волны

$$\Delta = (n_o - n_e)d = \pm (m + 1/4)\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

где знак плюс соответствует отрицательным кристаллам, минус — положительным; λ_0 — длина волны в вакууме.

- Угол поворота плоскости поляризации:
для оптически активных кристаллов и чистых жидкостей

$$\varphi = \alpha d;$$

для оптически активных растворов

$$\varphi = [\alpha]Cd,$$

где d — длина пути, пройденного светом в оптически активном веществе; $\alpha_0[\alpha]$ — удельное вращение; C — массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

Квантовая природа излучения

- Закон Стефана — Больцмана

$$R_e = \sigma T^4,$$

где R_e — энергетическая светимость (излучательность) черного тела; σ — постоянная Стефана — Больцмана; T — термодинамическая температура.

- Связь энергетической светимости R_e и спектральной плотности энергетической светимости $r_{e,T}$ ($r_{\lambda,T}$) черного тела

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda.$$

- Энергетическая светимость серого тела

$$R_T^e = A_T \sigma T^4,$$

где A_T — поглощательная способность серого тела.

- Закон смещения Вина

$$\lambda_{\max} = b/T,$$

где $\lambda_{\max}$ — длина волны, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости черного тела; b — постоянная Вина.

- Зависимость максимальной спектральной плотности энергетической светимости черного тела от температуры

$$(r_{\lambda,T})_{\max} = CT^5,$$

где $C = 1,30 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{К}^5\text{)}$.

- Формула Рэлея — Джинса для спектральной плотности энергетической светимости черного тела

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT,$$

где k — постоянная Планка.

- Энергия кванта

$$\varepsilon_0 = h\nu = hc/\lambda.$$

- Формула Планка

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{\exp[h\nu/(kT)] - 1}, \quad r_{\lambda,T} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{\exp[hc/(kT\lambda)] - 1}.$$

- Связь радиационной T_p и истинной T температур

$$T_p = \sqrt[4]{A_T} T,$$

где A_T — поглощательная способность серого тела.

- Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$\varepsilon = h\nu = A + T_{\max},$$

где $\varepsilon = h\nu$ — энергия фотона, падающего на поверхность металла; A — работа выхода электрона из металла; $T_{\max}$ — максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона.

- «Красная граница» фотоэффекта для данного металла

$$\nu_0 = A/h; \quad \lambda_0 = hc/A,$$

где λ_0 — максимальная длина волны излучения (ν_0 — соответственно минимальная частота), при которой фотоэффект еще возможен.

- Масса и импульс фотона

$$m_\gamma = \varepsilon/c^2 = h\nu/c^2; \quad p_\gamma = h\nu/c,$$

где $h\nu$ — энергия фотона.

- Давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность,

$$p = \frac{E_e}{c} (1 + \rho) = w (1 + \rho),$$

где $E_e = Nh\nu$ — облученность поверхности (энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени); ρ — коэффициент отражения; w — объемная плотность энергии излучения.

- Изменение длины волны рентгеновского излучения при комптоновском рассеянии

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta) = \frac{2h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2} = 2\lambda_C \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

где λ и λ' — длины волн падающего и рассеянного излучений; m_0 — масса электрона; θ — угол рассеяния; $\lambda_C = h/(m_0 c)$ — комптоновская длина волны.

ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ АТОМОВ, МОЛЕКУЛ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Теория атома водорода по Бору

- Обобщенная формула Бальмера, описывающая серии в спектре водорода,

$$\nu = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где ν — частота спектральных линий в спектре атома водорода; R — постоянная Ридберга; m определяет серию ($m=1, 2, 3, \dots$); n определяет отдельные линии соответствующей серии ($n=m+1, m+2, \dots$): $m=1$ (серия Лаймана), $m=2$ (серия Бальмера), $m=3$ (серия Пашена), $m=4$ (серия Брэкета), $m=5$ (серия Пфунда), $m=6$ (серия Хэмфри).

- Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний)

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

где m_e — масса электрона; v — скорость электрона по n -й орбите радиусом r_n .

- Второй постулат Бора (правило частот)

$$h\nu = E_n - E_m,$$

где E_n и E_m — соответственно энергии стационарных состояний атома до и после излучения (поглощения).

- Энергия электрона на n -й стационарной орбите

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{Z^2 m_e e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2} \quad (n=1, 2, 3, \dots),$$

где Z — порядковый номер элемента в системе Менделеева; ε_0 — электрическая постоянная.

Элементы квантовой механики

- Связь дебройлевской длины волны частицы с импульсом p

$$\lambda = h/p.$$

- Фазовая скорость свободно движущейся со скоростью v частицы массой m

$$v_{\text{фаз}} = \omega/k = E/p = c^2/v,$$

где $E = \hbar\omega$ — энергия частицы (ω — круговая частота); $p = \hbar k$ — импульс ($k = 2\pi/\lambda$ — волновое число).

- Групповая скорость свободно движущейся частицы

$$u = d\omega/dk = dE/dp.$$

- Соотношения неопределенностей:
для координаты и импульса частицы

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar, \quad \Delta y \Delta p_y \geq \hbar, \quad \Delta z \Delta p_z \geq \hbar,$$

где Δx , Δy , Δz — неопределенности координат; Δp_x , Δp_y , Δp_z — неопределенности соответствующих проекций импульса частицы на оси координат;
для энергии и времени

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar,$$

где ΔE — неопределенность энергии данного квантового состояния; Δt — время пребывания системы в данном состоянии.

- Вероятность нахождения частицы в объеме dV

$$dW = \Psi \Psi^* dV = |\Psi|^2 dV,$$

где $\Psi = \Psi(x, y, z, t)$ — волновая функция, описывающая состоя-

ние частицы; Ψ^* — функция, комплексно сопряженная с Ψ ; $|\Psi|^2 = \Psi \Psi^*$ — квадрат модуля волновой функции.

Для стационарных состояний

$$dW = \psi \psi^* dV = |\psi|^2 dV,$$

где $\psi = \psi(x, y, z)$ — координатная (амплитудная) часть волновой функции.

- Условие нормировки вероятностей

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi|^2 dV = 1,$$

где интегрирование производится по всему бесконечному пространству, т. е. по координатам x, y, z от $-\infty$ до $+\infty$.

- Вероятность обнаружения частицы в интервале от x_1 и x_2

$$W = \int_{x_1}^{x_2} |\psi(x)|^2 dx.$$

- Среднее значение физической величины L , характеризующей частицу, находящуюся в состоянии, описываемом волновой функцией Ψ ,

$$\langle L \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} L |\Psi|^2 dV.$$

- Общее уравнение Шредингера (уравнение Шредингера, зависящее от времени)

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U(x, y, z, t) \Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t},$$

где $\Psi = \Psi(x, y, z, t)$ — волновая функция, описывающая состояние частицы; $\hbar = h/(2\pi)$; m — масса частицы; Δ — оператор Лапласа ($\Delta \Psi = \partial^2 \Psi / \partial x^2 + \partial^2 \Psi / \partial y^2 + \partial^2 \Psi / \partial z^2$); $i = \sqrt{-1}$ — мнимая единица; $U = U(x, y, z, t)$ — потенциальная энергия частицы в силовом поле, в котором она движется.

- Уравнение Шредингера для стационарных состояний

$$\Delta \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0,$$

где $\psi = \psi(x, y, z)$ — координатная часть волновой функции ($\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z) \exp[-i(E/\hbar)t]$); $U = U(x, y, z)$ — потенциальная энергия частицы; E — полная энергия частицы.

- Волновая функция, описывающая одномерное движение свободной частицы,

$$\Psi(x, t) = A \exp\left[-\frac{i}{\hbar}(Et - p_x x)\right],$$

где A — амплитуда волн де Бройля; $p_x = \hbar k$ — импульс частицы; $E = \hbar \omega$ — энергия частицы.

● Собственные значения энергии E_n частицы, находящейся на n -м энергетическом уровне в одномерной прямоугольной «потенциальной яме» с бесконечно высокими «стенками»,

$$E_n = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m l^2} \quad (n=1, 2, 3, \dots),$$

где l — ширина ямы.

● Собственная волновая функция, соответствующая вышеприведенному собственному значению энергии,

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{n\pi}{l} x \quad (n=1, 2, 3, \dots).$$

● Коэффициент прозрачности D прямоугольного потенциального барьера конечной ширины l

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

где D_0 — множитель, который можно приравнять к единице; U — высота потенциального барьера; E — энергия частицы.

● Уравнение Шредингера для линейного гармонического осциллятора в квантовой механике

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E - \frac{m \omega_0^2 x^2}{2} \right) \psi = 0,$$

где $m \omega_0^2 x^2 / 2 = U$ — потенциальная энергия осциллятора; ω_0 — собственная частота колебаний осциллятора; m — масса частицы.

● Собственные значения энергии гармонического осциллятора

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_0 \quad (n=0, 1, 2, \dots).$$

● Энергия нулевых колебаний гармонического осциллятора

$$E_0 = \frac{1}{2} \hbar \omega_0.$$

Элементы физики атомов и молекул

● Потенциальная энергия $U(r)$ взаимодействия электрона с ядром в водородоподобном атоме

$$U(r) = -Ze^2 / (4\pi \epsilon_0 r),$$

где r — расстояние между электроном и ядром; Z — порядковый номер элемента; ϵ_0 — электрическая постоянная.

● Собственное значение энергии E_n электрона в водородоподобном атоме

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

● Энергия ионизации атома водорода

$$E_i = -E_1 = m e^4 / (8 h^2 \epsilon_0^2).$$

● Момент импульса (механический орбитальный момент) электрона

$$L_l = \hbar \sqrt{l(l+1)},$$

где l — орбитальное квантовое число, принимающее при заданном n следующие значения: $l=0, 1, \dots, n-1$ (всего n значений).

● Проекция момента импульса на направление z внешнего магнитного поля

$$L_{lz} = \hbar m_l,$$

где m_l — магнитное квантовое число, принимающее при заданном l следующие значения: $m_l=0, \pm 1, \dots, \pm l$ (всего $(2l+1)$ значений).

● Правила отбора для орбитального и магнитного квантовых чисел

$$\Delta l = \pm 1, \quad \Delta m_l = 0, \pm 1.$$

● Нормированная волновая функция, отвечающая $1s$ -состоянию (основному состоянию) электрона в атоме водорода,

$$\psi_{100}(r) = \frac{1}{\sqrt{\pi a^3}} \exp(-r/a),$$

где $a = 4\pi \epsilon_0 \hbar^2 / (m e^2)$ — величина, совпадающая с первым боровским радиусом.

● Вероятность обнаружить электрон в атоме водорода, находящемся в $1s$ -состоянии, в интервале от r до $r+dr$

$$dW = |\psi_{100}|^2 dV = |\psi_{100}|^2 \cdot 4\pi r^2 dr.$$

- Спин (собственный механический момент импульса) электрона

$$L_s = \hbar \sqrt{s(s+1)},$$

где s — спиновое квантовое число ($s = 1/2$).

- Проекция спина на направление z внешнего магнитного поля

$$L_{sz} = \hbar m_s,$$

где m_s — магнитное спиновое квантовое число ($m_s = \pm 1/2$).

- Принцип Паули

$$Z(n, l, m_l, m_s) = 0 \text{ или } 1,$$

где $Z(n, l, m_l, m_s)$ — число электронов, находящихся в квантовом состоянии, описываемом набором четырех квантовых чисел: n — главного, l — орбитального, m_l — магнитного, m_s — магнитного спинного.

- Максимальное число электронов $Z(n)$, находящихся в состояниях, определяемых заданным главным квантовым числом n ,

$$Z(n) = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2n^2.$$

- Коротковолновая граница сплошного рентгеновского спектра

$$\lambda_{\min} = ch/(eU),$$

где e — заряд электрона; U — разность потенциалов, приложенная к рентгеновской трубке.

- Закон Мозли, определяющий частоты спектральных линий характеристического рентгеновского излучения,

$$\nu = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где R — постоянная Ридберга; Z — порядковый номер элемента в периодической системе; σ — постоянная экранирования; m определяет рентгеновскую серию ($m = 1, 2, 3, \dots$); n определяет отдельные линии соответствующей серии ($n = m+1, m+2, \dots$).

- Закон Мозли для линии K_α ($\sigma = 1$)

$$\nu = R(Z - 1)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right).$$

- Распределение Бозе — Эйнштейна и Ферми — Дирака

$$\langle N_i \rangle = \frac{1}{\exp[(E_i - \mu)/(kT)] - 1} \text{ и } \langle N_i \rangle = \frac{1}{\exp[(E_i - \mu)/(kT)] + 1},$$

где $\langle N_i \rangle$ — соответственно средние числа бозонов и фермионов в квантовом состоянии с энергией E_i ; k — постоянная Больцмана; T — термодинамическая температура; μ — химический потенциал. При $\exp[(E_i - \mu)/(kT)] \gg 1$ оба распределения переходят в классическое распределение Максвелла — Больцмана $\langle N_i \rangle = A \exp[-E_i/(kT)]$, где $A = \exp[\mu/(kT)]$.

- Распределение Ферми — Дирака по энергиям для свободных электронов в металле

$$\langle N(E) \rangle = \frac{1}{\exp[(E - E_F)/(kT)] + 1},$$

где E_F — энергия Ферми.

При $T = 0\text{K}$

$$\langle N(E) \rangle = \begin{cases} 1 & \text{при } E < E_F, \\ 0 & \text{при } E > E_F. \end{cases}$$

- Характеристическая температура Дебая (при $T \ll T_D$)

$$T_D = \hbar \omega_D / k,$$

где ω_D — предельная частота упругих колебаний кристаллической решетки.

- Электрическая проводимость металла, согласно квантовой теории электропроводности металлов,

$$\gamma = ne^2 \langle l_F \rangle / (m \langle u_F \rangle),$$

где n — концентрация электронов проводимости в металле; $\langle l_F \rangle$ — средняя длина свободного пробега электрона, имеющего энергию Ферми; $\langle u_F \rangle$ — средняя скорость теплового движения такого электрона.

- Концентрация электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне

$$n_e = C_1 \exp[(E_2 - E_F)/(kT)], \quad n_p = C_2 \exp[(E_1 - E_F)/(kT)],$$

где E_2 — энергия, соответствующая дну зоны проводимости; E_1 — энергия, соответствующая верхней границе валентной зоны; E_F — энергия Ферми; T — термодинамическая температура; C_1 и C_2 — постоянные, зависящие от температуры и эффективных масс электронов проводимости и дырок (при равенстве последних $C_1 = C_2$).

- Уровень Ферми в собственном полупроводнике

$$E_F = \Delta E / 2,$$

где ΔE — ширина запрещенной зоны.

- Удельная проводимость собственных полупроводников

$$\gamma = \gamma_0 \exp[\Delta E / (kT)],$$

где γ_0 — постоянная, характерная для данного полупроводника.

Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц

- Радиус ядра

$$R = R_0 A^{1/3},$$

где $R_0 = 1,4 \cdot 10^{-15}$ м; A — массовое число (число нуклонов в ядре).

- Энергия связи нуклонов в ядре

$$E_{св} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\alpha}]c^2 = [Zm_H + (A - Z)m_n - m]c^2,$$

где m_p , m_n , m_{α} — соответственно массы протона, нейтрона и ядра; Z — зарядовое число ядра (число протонов в ядре); A — массовое число; $m_H = m_p + m_e$ — масса атома водорода (${}^1_1\text{H}$); m — масса атома.

- Дефект массы ядра

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{\alpha} = [Zm_H + (A - Z)m_n] - m.$$

- Удельная энергия связи (энергия связи, отнесенная к одному нуклону)

$$\delta E_{св} = E_{св} / A.$$

- Собственный момент импульса (спин) ядра

$$L_{\alpha} = \hbar \sqrt{I(I+1)},$$

где $\hbar = h / (2\pi)$ — постоянная Планка, I — спиновое ядерное квантовое число ($I = 0, 1/2, 1, 3/2, \dots$).

- Связь магнитного момента μ_{α} и собственного момента импульса (спина) L_{α} ядра

$$\mu_{\alpha} = g_{\alpha} L_{\alpha},$$

где g_{α} — ядерное гиромагнитное отношение.

- Ядерный магнетон

$$\mu_{\alpha} = e\hbar / (2m_p),$$

где e — заряд электрона, $\hbar = h / (2\pi)$ — постоянная Планка, m_p — масса протона.

- Число ядер, распавшихся в среднем за промежуток времени от t до $t + dt$,

$$dN = -\lambda N dt,$$

где N — число нераспавшихся ядер к моменту времени t ; λ — постоянная радиоактивного распада.

- Закон радиоактивного распада

$$N = N_0 \exp(-\lambda t),$$

где N — число нераспавшихся ядер в момент времени t ; N_0 — начальное число нераспавшихся ядер (в момент времени $t = 0$); λ — постоянная радиоактивного распада.

- Число ядер, распавшихся за время t ,

$$\Delta N = N_0 - N = N_0 [1 - \exp(-\lambda t)].$$

- Связь периода полураспада $T_{1/2}$ и постоянной радиоактивного распада λ

$$T_{1/2} = (\ln 2) / \lambda.$$

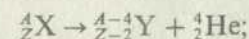
- Связь среднего времени жизни τ радиоактивного ядра и постоянной λ радиоактивного распада

$$\tau = 1 / \lambda.$$

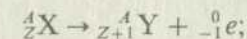
- Активность нуклида

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N.$$

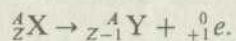
- Правила смещения:
для α -распада



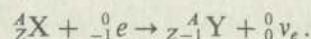
для β^- -распада



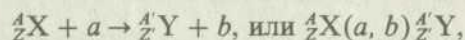
для β^+ -распада



- Схема e -захвата:



- Символическая запись ядерной реакции



где A_ZX и ${}^A_{Z'}Y$ — исходное и конечное ядра соответственно с зарядовыми числами Z и Z' и массовыми числами A и A' ; a и b — соответственно бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частицы.

- Энергия ядерной реакции

$$Q = c^2[(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)],$$

где m_1 и m_2 — массы покоя ядра-мишени и бомбардирующей частицы; $(m_3 + m_4)$ — суммы масс покоя ядер продуктов реакции. Если $Q > 0$ — экзотермическая реакция, $Q < 0$ — эндотермическая реакция.

- Энергия ядерной реакции представляется также в виде

$$Q = (T_1 + T_2) - (T_3 + T_4),$$

где T_1, T_2, T_3, T_4 — соответственно кинетические энергии ядра-мишени, бомбардирующей частицы, испускаемой частицы и ядра продукта реакции.

- Скорость нарастания цепной реакции

$$\frac{dN}{dt} = N(k-1)/T, \text{ откуда } N = N_0 \exp[(k-1)t/T],$$

где N_0 — число нейтронов в начальный момент времени; N — число нейтронов в момент времени t ; T — среднее время жизни одного поколения; k — коэффициент размножения нейтронов.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Некоторые математические формулы

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta$$

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha \quad \cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha$$

$$\sin^2 \alpha = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha) \quad \cos^2 \alpha = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\alpha)$$

$$\frac{d}{dx}(x^n) = nx^{n-1}$$

$$\frac{d}{dx}(\ln x) = \frac{1}{x}$$

$$\frac{d}{dx}(e^x) = e^x$$

$$\frac{d}{dx}(\operatorname{tg} x) = \frac{1}{\cos^2 x}$$

$$\frac{d}{dx}(\cos x) = -\sin x$$

$$\int \frac{dx}{x^2} = -\frac{1}{x}$$

$$\int \frac{dx}{x} = \ln x$$

$$\int e^x dx = e^x$$

$$\int \cos x dx = \sin x$$

$$\int_0^\infty x e^{-ax^2} dx = \frac{1}{2a}$$

$$\int_0^\infty x^n e^{-ax} dx = \frac{n!}{a^{n+1}}$$

$$\int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}$$

$$\int_0^\infty \frac{x dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^2}{6}$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{x^n} \right) = -\frac{n}{x^{n+1}}$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{x} \right) = -\frac{1}{x^2}$$

$$\frac{d}{dx}(\sin x) = \cos x$$

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} \quad (n \neq -1) \quad \int_0^\infty x e^{-ax^2} dx = \frac{1}{2} a^{-2}$$

$$\int \sin x dx = -\cos x \quad \int u dv = uv - \int v du$$

$$\int_0^\infty x^n e^{-x} dx = n!$$

2. Десятичные приставки к названиям единиц

Т — тера (10^{12})	д — деци (10^{-1})	н — нано (10^{-9})
Г — гига (10^9)	с — санти (10^{-2})	п — пико (10^{-12})
М — мега (10^6)	м — милли (10^{-3})	ф — фемто (10^{-15})
к — кило (10^3)	мк — микро (10^{-6})	а — атто (10^{-18})

3. Некоторые внесистемные величины

1 сут = 86400 с	1'' = $4,85 \cdot 10^{-6}$ рад
1 год = 365,25 сут = $3,16 \cdot 10^7$ с	1 мм рт. ст. = 133,3 Па
1° = $1,75 \cdot 10^{-2}$ рад	1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж
1' = $2,91 \cdot 10^{-4}$ рад	

4. Некоторые астрономические величины

Радиус Земли	$6,37 \cdot 10^6$ м
Масса Земли	$5,98 \cdot 10^{24}$ кг
Радиус Солнца	$6,95 \cdot 10^8$ м
Масса Солнца	$1,98 \cdot 10^{30}$ кг
Радиус Луны	$1,74 \cdot 10^6$ м
Масса Луны	$7,33 \cdot 10^{22}$ кг
Расстояние от центра Земли до центра Солнца	$1,49 \cdot 10^{11}$ м
Расстояние от центра Земли до центра Луны	$3,84 \cdot 10^8$ м

5. Основные физические постоянные

Скорость света в вакууме	$c = 3,00 \cdot 10^8$ м/с
Нормальное ускорение свободного падения	$g = 9,81$ м/с ²
Гравитационная постоянная	$G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ м ³ /(кг·с ²)
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Молярная газовая постоянная	$R = 8,31$ Дж/(К·моль)
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Элементарный заряд	$e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ кг
Удельный заряд электрона	$e/m_e = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Постоянная Стефана — Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м ² ·К ⁴)
Постоянная Вина	$b = 2,90 \cdot 10^{-3}$ м·К
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Ридберга	$R = 3,29 \cdot 10^{15}$ с ⁻¹
	$R' = 1,10 \cdot 10^7$ м ⁻¹
Первый боровский радиус	$a_0 = 5,28 \cdot 10^{-11}$ м
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12}$ м
Магнетон Бора	$\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
	$\kappa = 1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9$ м/Ф
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Атомная единица массы	1 а.е. м. = $1,6606 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса изотопа ^1_1H	$m_H = 1,6736 \cdot 10^{-27}$ кг

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Периоды	а I б	а II б	а III б	а IV б	а V б
1	1 H				
2	3 Li 6,941 ЛИТИЙ	4 Be 9,01218 БЕРИЛИЙ	5 B 10,81 БОР	6 C 12,011 УГЛЕРОД	7 N 14,0067 АЗОТ
3	11 Na 22,98977 НАТРИЙ	12 Mg 24,305 МАГНИЙ	13 Al 26,98154 АЛЮМИНИЙ	14 Si 28,086 КРЕМНИЙ	15 P 30,97376 ФОСФОР
4	19 K 39,098 КАЛИЙ	20 Ca 40,08 КАЛЬЦИЙ	21 Sc 44,9559 СКАНДИЙ	22 Ti 47,90 ТИТАН	23 V 50,9415 ВАНАДИЙ
	29 Cu 63,546 МЕДЬ	30 Zn 65,38 ЦИНК	31 Ga 69,72 ГАЛЛИЙ	32 Ge 72,59 ГЕРМАНИЙ	33 As 74,9216 АРАСЕН
5	37 Rb 85,4678 РУБИДИЙ	38 Sr 87,62 СТРОНЦИЙ	39 Y 88,9059 ИТРИЙ	40 Zr 91,22 ЦИРКОНИЙ	41 Nb 92,9064 НИОБИЙ
	47 Ag 107,866 СЕРЕБРО	48 Cd 112,40 КАДМИЙ	49 In 114,82 ИНДИЙ	50 Sn 118,69 ОЛОВО	51 Sb 121,75 СУРЬМА
6	55 Cs 132,9054 ЦЕЗИЙ	56 Ba 137,34 БАРИЙ	57 La 138,9056 ЛАНТАН	72 Hf 178,49 ГАФНИЙ	73 Ta 180,9479 ТАНТАЛ
	79 Au 196,9665 ЗОЛОТО	80 Hg 200,59 РТУТЬ	81 Tl 204,37 ТАЛЛИЙ	82 Pb 207,2 СВИНЦ	83 Bi 208,9804 ВИСМУТ
7	87 Fr [223] ФРАНЦИЙ	88 Ra [226] РАДИЙ	89 Ac** [227] АКТИНИЙ	104 (Ku) [261] КУРЧАТОВИЙ	105 (Ns) [261] НЬИЛЬСБОРВИЙ

* ЛАНТА

58 Ce 140,12 ЦЕРИЙ	59 Pr 140,9077 ПРАЗЕОДИМ	60 Nd 144,24 НЕОДИМ	61 Pm [145] ПРОМЕТИЙ	62 Sm 150,4 САМАРИЙ	63 Eu 151,96 ЕВРОПИЙ	64 Gd 157,25 ГАДОЛИНИЙ
--------------------------	--------------------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	------------------------------

** АКТИ

90 Th 232,0381 ТОРИЙ	91 Pa [231] ПРОТАКТИНИЙ	92 U 238,029 УРАН	93 Np [237] НЕПТУНИЙ	94 Pu [244] ПУТОНИЙ	95 Am [243] АМЕРИЦИЙ	96 Cm [247] КУРИЙ
----------------------------	-------------------------------	-------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	-------------------------

ЭЛЕМЕНТЫ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

VI б		VII б		VIII б	
		1 H 1,0079 ВОДОРОД	2 He 4,00260 ГЕЛИЙ		
8 O 15,9994 КИСЛОРОД		9 F 18,99840 ФТОР	10 Ne 20,179 НЕОН		
16 S 32,06 СЕРА		17 Cl 35,453 ХЛОР	18 Ar 39,948 АРГОН		
24 Cr 51,996 ХРОМ		25 Mn 54,9380 МАРГАНЕЦ	26 Fe 55,847 ЖЕЛЕЗО	27 Co 58,9332 КОБАЛЬТ	28 Ni 58,70 НИКЕЛЬ
34 Se 78,96 СЕЛЕН		35 Br 79,904 БРОМ	36 Kr 83,80 КРИПТОН		
42 Mo 95,94 МОЛИБДЕН		43 Tc [97] ТЕХНЕЦИЙ	44 Ru 101,07 РУТЕНИЙ	45 Rh 102,9055 РОДИЙ	46 Pd 106,4 ПАЛЛАДИЙ
52 Te 127,80 ТЕЛЛУР		53 I 126,9045 ИОД	54 Xe 131,30 КСЕНОН		
74 W 183,84 ВОЛЬФРАМ		75 Re 186,207 РЕНИЙ	76 Os 190,2 ОСМИЙ	77 Ir 192,22 ИРИДИЙ	78 Pt 195,08 ПЛАТИНА
84 Po [209] ПОЛОНИЙ		85 At [210] АСТАТ	86 Rn [222] РАДОН		
106 E-W [263]					

НОИДЫ

65 Tb 158,9254 ТЕРБИЙ	66 Dy 162,50 ДИСПРОЗИЙ	67 Ho 164,9304 ГОЛЬМИЙ	68 Er 167,26 ЭРБИЙ	69 Tm 168,9342 ТУЛИЙ	70 Yb 173,04 ИТТЕРБИЙ	71 Lu 174,97 ЛЮТЕЦИЙ
-----------------------------	------------------------------	------------------------------	--------------------------	----------------------------	-----------------------------	----------------------------

НОИДЫ

97 Bk [247] БЕРКЛИЙ	98 Cf [251] КАЛИФОРНИЙ	99 Es [254] ЭЙНШТЕЙНОВИЙ	100 Fm [257] ФЕРМИЙ	101 Md [258] МЕНДЕЛЕВИЙ	102 (No) [259] НОБЕЛИЙ	103 (Lr) [260] ЛОУРЕНСОВИЙ
---------------------------	------------------------------	--------------------------------	---------------------------	-------------------------------	------------------------------	----------------------------------

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

Кинематика	3
Динамика материальной точки и поступательного движения твердого тела	4
Работа и энергия	5
Механика твердого тела	6
Тяготение. Элементы теории поля	9
Элементы механики жидкостей	10
Элементы специальной (частной) теории относительности	12

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

Молекулярно-кинетическая теория идеальных газов	13
Основы термодинамики	16
Реальные газы, жидкости и твердые тела	19

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Электрическое поле	20
Постоянный электрический ток	25
Электрические токи в металлах, в вакууме и газах	27
Магнитное поле	27
Электромагнитная индукция	31
Магнитные свойства вещества	32
Основы теории Максвелла для электромагнитного поля	33

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Механические и электромагнитные колебания	34
Упругие волны	37
Электромагнитные волны	38

ОПТИКА. КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

Элементы геометрической оптики	39
Интерференция света	41
Дифракция света	42
Взаимодействие электромагнитных волн с веществом	43
Поляризация света	44
Квантовая природа излучения	45

ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ АТОМОВ, МОЛЕКУЛ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Теория атома водорода по Бору	47
Элементы квантовой механики	48
Элементы физики атомов и молекул	51
Элементы квантовой статистики	53
Элементы физики твердого тела	53
Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц	54
Приложения	57

Справочное издание

Трофимова Таисия Ивановна

ФИЗИКА

**500 ОСНОВНЫХ ЗАКОНОВ
И ФОРМУЛ**

Редактор *Г. Н. Чернышева*

Художественный редактор *Т. А. Коленкова*

Художник *В. А. Маслов*

Технический редактор *Г. А. Виноградова*

ИБ № 10273

ЛР № 010146 от 25.12.91. Изд. № ФМ-141. Сдано в набор 18.05.94. Подп. в печать 06.02.95. Формат 60 × 88/16. Бум. тип. № 2. Гарнитура «Таймс». Печать офсетная. Объем 3,92 усл. печ. л. 4,17 усл. кр.-отт. 2,55 уч. изд. л. Тираж 20 000 экз. Зак. № 375.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Набрано на персональном компьютере издательства.

Отпечатано в АООТ «Оригинал». 101898, Москва, Центр, Хохловский пер., 7.