



## ПРЕДИСЛОВИЕ К 8-МУ ИЗДАНИЮ

Предлагаемое издание «Справочника по физике» существенно переработано по сравнению с предыдущими изданиями в соответствии с современными представлениями физической науки. Заново написана глава «Элементарные частицы» с учетом последних открытий в области атомной и ядерной физики (эта глава написана А. К. Лебедевым). Однако общая структура и концептуальная основа справочника сохранены.

В книге даны определения физических понятий и принципов физической теории, сформулированы физические законы и приведены необходимые разъяснения. В справочнике отсутствует описание экспериментальных методов исследований, опытов и приборов и другой экспериментальный материал.

Математические знания, необходимые для пользования справочником, соответствуют уровню математического образования выпускника технического вуза и не превышают объёма материала, приведенного в «Справочнике по математике для инженеров и учащихся втузов» И. Н. Бронштейна и К. А. Семендяева и «Справочнике по математике для научных работников и инженеров» Г. Корна и Т. Корна. В ряде случаев дано содержательное описание математических понятий (например понятия «группа»), широко используемых в современной физике.

В справочнике используется Международная система единиц (СИ), в которой ведётся преподавание общих курсов физики в технических вузах. В приложении приведены единицы физических величин в СИ и гауссовой системе СГС. В механике, в разделе о тепловых явлениях и во всех разделах физики, не связанных с вопросами электричества и магнетизма, обе системы практически равноправны, они отличаются только масштабами единиц основных физических величин. При изложении вопросов по электродинамике, атомной, ядерной и теоретической физике в научной и учебной литературе используется

система СГС из-за принципиальных неудобств системы СИ. Поэтому в приложении к справочнику дано сравнительное описание как системы СИ, так и гауссовой системы СГС.

Подробный предметный указатель с прямой ссылкой на страницу данного издания облегчит читателю справочника поиск сведений о нужном термине.

К сожалению, в процессе подготовки издания ушёл из жизни А. А. Детлаф (1922—2003).

Данное издание в определенном смысле подводит итог целой эпохе существования брэнда «Справочник по физике для инженеров и студентов вузов» Б. М. Яворского и А. А. Детлафа.

Справочник рассчитан на широкий круг читателей: инженерно-технических работников, не специализирующихся в какой-либо области физики, студентов и аспирантов высших технических учебных заведений всех специальностей, преподавателей высших и средних специальных учебных заведений и учителей средней школы. Он может быть также использован лицами, интересующимися физикой, и принесет несомненную пользу для нового поколения читателей.

---

# Раздел I

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

---

### Глава 1

#### КИНЕМАТИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ И АБСОЛЮТНО ТВЕРДОГО ТЕЛА

---

##### 1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ПОНЯТИЯ

1°. Механикой называют науку о механическом движении и взаимодействии тел. *Механическое движение* — простейшая форма движения в природе, состоящая в изменении взаимного расположения тел или их частей в пространстве с течением времени. При этом под *телами* понимают макроскопические системы, состоящие из очень большого числа молекул или атомов, так что размеры этих систем во много раз больше межмолекулярных расстояний. В *классической ньютоновской механике* рассматриваются движения тел, происходящие со скоростями, много меньшими скорости света в вакууме. Исследование движений тел, скорости которых соизмеримы со скоростью света, является предметом *релятивистской механики*, основанной на теории относительности.

2°. Вопросы внутреннего строения тел, природы и закономерностей их взаимодействий выходят за рамки механики, составляя содержание других разделов физики. В зависимости от свойств тел и постановки задачи в классической механике используются различные приближенные модели реальных тел: материальная точка, абсолютно твердое тело и др.

*Материальной точкой* называют тело, размеры которого несущественны в рассматриваемой задаче.

*Абсолютно твердым телом* (или просто твердым телом) называют тело, расстояния между любыми двумя

точками которого постоянны. Иначе говоря, размеры и форма абсолютно твердого тела не изменяются при его движении. Всякое твердое тело можно мысленно разбить на достаточно большое число элементарных частей так, чтобы размеры каждой из них были много меньше размеров всего тела. Поэтому абсолютно твердое тело часто рассматривают как *систему материальных точек*, жестко связанных друг с другом.

*Абсолютно упругим телом* называют тело, деформации которого пропорциональны вызывающим их силам и полностью исчезают после прекращения действия этих сил. *Абсолютно неупругим телом* называют тело, которое полностью сохраняет деформированное состояние после прекращения действия на тело сил, вызвавших это состояние.

3°. Классическая механика состоит из трех основных разделов: статики, кинематики и динамики. В *статике* исследуются законы сложения сил и условия равновесия твердых, жидких и газообразных тел. В *кинематике* приводится математическое описание механического движения тел безотносительно к тем причинам, которые вызывают тот или иной конкретный вид механического движения. В *динамике* рассматривается влияние взаимодействия между телами на их механическое движение.

4°. *Системой отсчета* называют систему, снабженную часами и жестко связанную с абсолютно твердым телом, по отношению к которому определяют положения рассматриваемых тел в различные моменты времени. При этом под *часами* понимают любое устройство, используемое для измерения времени, или, точнее, промежутков времени между событиями, так как вследствие однородности времени начало его отсчета можно выбирать произвольно.

Систему отсчета, связанную с Землей, называют *лабораторной (земной) системой отсчета*.

В ньютоновской механике предполагается, что геометрические свойства пространства описываются геометрией Евклида, а ход времени одинаков во всех системах отсчета. Поэтому размеры тела не зависят от выбора системы отсчета так же, как и промежуток времени между любыми двумя событиями.

В механике в основном применяются следующие *системы координат*: *правая прямоугольная декарто-*

ва (рис. I.1.1, а), цилиндрическая (рис. I.1.1, б) и сферическая (рис. I.1.1, в). Формулы перехода от декартовых координат  $(x, y, z)$  точки  $M$  к цилиндрическим  $(\rho, \varphi, z)$  и обратно имеют вид

$$\begin{aligned}\rho &= \sqrt{x^2 + y^2}, & x &= \rho \cos \varphi, \\ \varphi &= \operatorname{arctg} \frac{y}{x}, & y &= \rho \sin \varphi, \\ z &= z, & z &= z.\end{aligned}$$

Формулы перехода от декартовых координат  $(x, y, z)$  точки  $M$  к сферическим  $(r, \varphi, \theta)$  и обратно имеют вид

$$\begin{aligned}r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, & x &= r \sin \theta \cos \varphi, \\ \varphi &= \operatorname{arctg} \frac{y}{x}, & y &= r \sin \theta \sin \varphi, \\ \theta &= \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}, & z &= r \cos \theta.\end{aligned}$$

5°. Движение точки полностью задано, если указан однозначный закон изменения во времени  $t$  ее пространственных координат  $q_1, q_2$  и  $q_3$  (декартовых, цилиндрических или каких-либо других):

$$q_1 = q_1(t), \quad q_2 = q_2(t), \quad q_3 = q_3(t).$$

Эти уравнения называют *кинематическими уравнениями движения точки*. Они эквивалентны одному векторному уравнению:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t),$$

где  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор, соединяющий начало отсчета с движущейся точкой  $M(q_1, q_2, q_3)$ . Если прямоугольные декартовы координаты точки  $M$  равны  $x, y, z$ , то

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

где  $\mathbf{i}, \mathbf{j}$  и  $\mathbf{k}$  — единичные векторы (орты), совпадающие с положительными направлениями соответственно осей

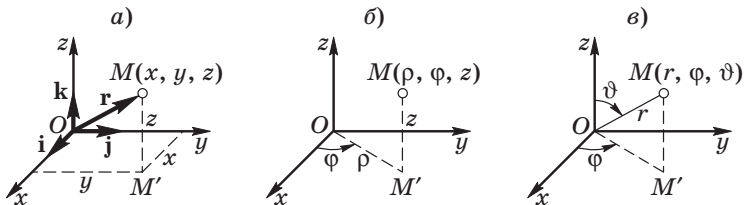


Рис. I.1.1

$Ox$ ,  $Oy$  и  $Oz$ , векторы  $x\mathbf{i}$ ,  $y\mathbf{j}$  и  $z\mathbf{k}$  — составляющие вектора  $\mathbf{r}$  вдоль этих осей, а  $x$ ,  $y$  и  $z$  — координаты (компоненты) вектора  $\mathbf{r}$  в декартовой системе координат. Вследствие ортогональности этой системы координат проекции вектора  $\mathbf{r}$  на оси координат равны соответствующим его координатам:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Приращение  $d\mathbf{r}$  радиуса-вектора за малый промежуток времени  $dt$  называют *элементарным перемещением точки*.

Обозначения в механике производных по времени от радиуса-вектора  $\mathbf{r}$  и координат  $q_1, q_2, q_3$  движущейся точки:

$$\dot{\mathbf{r}} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}, \quad \ddot{\mathbf{r}} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \text{ и т. д.},$$

$$\dot{q}_i = \frac{dq_i}{dt}, \quad \ddot{q}_i = \frac{d^2q_i}{dt^2} \text{ и т. д.}$$

6°. *Траекторией* называют линию, описываемую движущейся точкой в пространстве. Уравнения

$$q_i = q_i(t),$$

где  $i = 1, 2, 3$ , выражают *уравнение траектории в параметрической форме*. Исключая из них время  $t$ , получаем два уравнения поверхности:

$$F_1(q_1, q_2, q_3) = 0, \quad F_2(q_1, q_2, q_3) = 0.$$

Линия пересечения этих поверхностей является траекторией.

**Пример.** Движение точки удовлетворяет условиям:  $x = a \sin \omega t$ ,  $y = b \cos \omega t$ ,  $z = c \sin \omega t$ , где  $a$ ,  $b$  и  $c$  — отличные от нуля постоянные, а  $\omega \neq 0$ . Исключая время  $t$ , находим:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad \text{и} \quad x = \frac{a}{c} z.$$

Траектория точки — линия пересечения этих двух поверхностей.

Геометрическая форма траектории зависит от выбора системы отсчета. Например, если по отношению к диску, равномерно вращающемуся вокруг неподвижной оси, точка равномерно движется вдоль одного из его радиусов, то по отношению к оси траектория этой точки представляет собой спираль Архимеда. В зависи-

мости от формы траектории различают *прямолинейное* и *криволинейное движения* точки. Движение точки называют *плоским*, если все участки ее траектории лежат в одной плоскости. Обычно эту плоскость принимают за координатную плоскость  $z = 0$ , тогда плоское движение точки полностью определяется зависимостями от времени двух ее декартовых координат  $x$  и  $y$  или полярных координат  $\rho$  и  $\varphi$ .

В общем случае траектория точки — пространственная кривая. *Соприкасающейся плоскостью* в какой-либо точке  $M$  траектории называют предельное положение плоскости, проходящей через три точки  $N$ ,  $M$  и  $P$  этой траектории, когда точки  $N$  и  $P$  неограниченно приближаются к точке  $M$ , оставаясь по разные стороны от нее. *Соприкасающейся окружностью* в точке  $M$  траектории называют предельное положение окружности, проходящей через три точки  $N$ ,  $M$  и  $P$  траектории, когда выполняется вышеуказанный предельный переход. Соприкасающаяся окружность лежит в соприкасающейся плоскости, а ее центр и радиус называют *центром кривизны* и *радиусом кривизны траектории* в точке  $M$ .

Прямую, проведенную из точки  $M$  в центр кривизны, называют *главной нормалью* к траектории в точке  $M$ . Главная нормаль и касательная к траектории в точке  $M$  взаимно перпендикулярны и лежат в соприкасающейся плоскости. Прямую, проведенную в точке  $M$  перпендикулярно соприкасающейся плоскости, называют *бинормалью*.

7°. *Длиной пути  $s$*  называют сумму длин всех участков траектории, пройденных точкой за рассматриваемый промежуток времени от  $t_0$  до  $t$ . Если уравнения движения заданы в прямоугольных декартовых координатах, то

$$s = \int_{t_0}^t \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} dt = \int_{t_0}^t \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} dt;$$

в цилиндрических координатах

$$s = \int_{t_0}^t \sqrt{\left(\frac{d\rho}{dt}\right)^2 + \left(\rho \frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} dt = \int_{t_0}^t \sqrt{\dot{\rho}^2 + (\rho\dot{\varphi})^2 + \dot{z}^2} dt;$$



в сферических координатах

$$s = \int_{t_0}^t \sqrt{\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + \left(r\frac{d\theta}{dt}\right)^2 + \left(r\sin\theta\frac{d\phi}{dt}\right)^2} dt =$$

$$= \int_{t_0}^t \sqrt{\dot{r}^2 + (r\dot{\theta})^2 + (r\dot{\phi}\sin\theta)^2} dt.$$

Положение движущейся точки в некоторый фиксированный момент времени  $t = t_0$  называют ее *начальным положением*. В силу произвольности начала отсчета времени обычно полагают  $t_0 = 0$ . Длина пути, пройденного точкой из начального положения, является скалярной функцией времени:  $s = s(t)$ .

За малый промежуток времени  $dt$  точка проходит элементарный путь длиной  $ds = |d\mathbf{r}| = v dt$ , где  $d\mathbf{r}$  — элементарное перемещение точки, а  $v$  — модуль ее скорости.

**8°.** *Механической системой* называют мысленно выделенную совокупность тел, которые в общем случае взаимодействуют как друг с другом, так и с внешними телами, не включенными в состав системы. Механическую систему можно рассматривать как совокупность материальных точек. Например, абсолютно твердое тело можно считать состоящим из непрерывно распределенных по его объему  $V$  материальных точек — малых частей этого тела объемом  $dV$  каждая.

Механическую систему называют *свободной*, если все входящие в нее материальные точки или тела могут занимать произвольные положения в пространстве и иметь произвольные скорости. В противном случае систему называют *несвободной*.

*Связями (механическими связями)* называют ограничения, наложенные на положение или движение рассматриваемой механической системы в пространстве. Связи называют *внутренними*, если они не мешают системе свободно перемещаться после того, как она внезапно отвердеет. Все остальные связи называют *внешними*.

*Уравнениями связей* называют уравнения, которым должны удовлетворять координаты и скорости (первые

производные от координат по времени) точек механической системы в соответствии с наложенными на нее связями.

Связь называют *удерживающей* (*неосвобождаемой* или *двухсторонней*), если соотношения между координатами и скоростями точек системы, обусловленные этой связью, выражаются аналитически в форме уравнения вида

$$\Phi(\dots, x_i, y_i, z_i, \dots, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i, t) = 0,$$

где  $t$  — время,  $x_i, y_i, z_i$  — координаты  $i$ -й точки системы ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),

$$\dot{x}_i = \frac{dx_i}{dt}, \quad \dot{y}_i = \frac{dy_i}{dt} \quad \text{и} \quad \dot{z}_i = \frac{dz_i}{dt}.$$

Примером удерживающих связей могут служить внутренние связи, обуславливающие неизменность расстояний между точками абсолютно твердого тела.

Связь называют *неудерживающей* (*освобождаемой* или *односторонней*), если ограничения, накладываемые ею на механическую систему, выражаются аналитически в виде неравенства

$$\Phi_1(\dots, x_i, y_i, z_i, \dots, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i, \dots, t) \geq 0.$$

Такого рода связь осуществляется, например, при движении тела, подвешенного на гибкой нерастяжимой нити, а также при движении тела по горизонтальной плоскости.

Связи называют *стационарными*, если соответствующие им уравнения связей не содержат явно времени. В противном случае связи называют *нестационарными*.

Связь называют *геометрической*, если она накладывает ограничения только на положения точек системы в пространстве и выражается аналитически в виде

$$f(\dots, x_i, y_i, z_i, \dots, t) = 0.$$

Связи называют *дифференциальными*, если они накладывают ограничения не только на положения точек системы, но и на их скорости:

$$\Phi(\dots, x_i, y_i, z_i, \dots, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i, \dots, t) = 0.$$

Связи называют *голономными*, если соответствующие им уравнения не содержат производных от координат точек системы или могут быть приведены к такому виду путем интегрирования. В противном случае связи называют *неголономными*. Примером неголономной связи может служить условие равенства нулю скорости точки касания шара, катящегося без скольжения по неподвижной шероховатой плоскости.

Механическую систему называют *голономной*, если она подчинена только голономным связям. Если в числе связей имеется хотя бы одна неголономная связь, то механическую систему называют *неголономной*.

## 2. СКОРОСТЬ ТОЧКИ

1°. *Скоростью* (или *мгновенной скоростью*) называют векторную величину  $\mathbf{v}$ , равную первой производной по времени от радиуса-вектора движущейся точки:

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \dot{\mathbf{r}}.$$

Скорость направлена по касательной к траектории в сторону движения точки и равна первой производной от длины пути по времени:

$$v = \frac{ds}{dt} = \dot{s}.$$

Проекции скорости  $v_x$ ,  $v_y$  и  $v_z$  на оси прямоугольных декартовых координат равны первым производным по времени от соответствующих координат движущейся точки:

$$v_x = \dot{x}, v_y = \dot{y}, v_z = \dot{z}.$$

Отсюда

$$\mathbf{v} = \dot{x}\mathbf{i} + \dot{y}\mathbf{j} + \dot{z}\mathbf{k}, \quad v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}.$$

В цилиндрических координатах

$$v = \sqrt{\dot{\rho}^2 + (\rho\dot{\phi})^2 + \dot{z}^2};$$

в сферических координатах

$$v = \sqrt{\dot{r}^2 + (r\dot{\theta})^2 + (r\dot{\phi}\sin\theta)^2}.$$

2°. В случае плоского движения, заданного в полярных координатах, скорость  $\mathbf{v}$  точки  $M(\rho, \varphi)$  можно разложить на две взаимно перпендикулярные составляющие — радиальную (лучевую) скорость  $\mathbf{v}_\rho$  и трансверсальную (поперечную) скорость  $\mathbf{v}_\varphi$  (рис. 1.1.2):

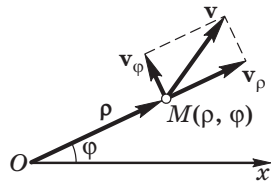


Рис. 1.1.2

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_\rho + \mathbf{v}_\varphi,$$

причем

$$\mathbf{v}_\rho = \dot{\rho} \mathbf{e}_\rho, \quad \mathbf{v}_\varphi = \dot{\varphi} (\mathbf{k} \times \rho),$$

где  $\rho$  — полярный радиус-вектор, проведенный из полюса  $O$  в точку  $M$ , а  $\mathbf{k}$  — единичный вектор, направленный перпендикулярно к плоскости движения точки таким образом, что из его конца вращение радиуса-вектора  $\rho$  в сторону увеличения угла  $\varphi$  видно происходящим против часовой стрелки (на рис. 1.1.2 вектор  $\mathbf{k}$  направлен из-за чертежа перпендикулярно к его плоскости). Запись  $\mathbf{k} \times \rho$  означает векторное произведение векторов  $\mathbf{k}$  и  $\rho$ . Проекции радиальной и трансверсальной скоростей точки  $M$  на направления соответственно радиуса-вектора  $\rho$  и прямой, проведенной перпендикулярно к  $\rho$  в сторону возрастания угла  $\varphi$ :

$$v_\rho = \dot{\rho}, \quad v_\varphi = \rho \dot{\varphi}.$$

Пр и м е р. Движение точки задано уравнениями:

$$x = at \cos bt, \quad y = at \sin bt \quad \text{и} \quad z = 0,$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные коэффициенты. В полярных координатах уравнения движения точки будут:  $\rho = at$  и  $\varphi = bt$ . Следовательно,  $\dot{\rho} = a$ ,  $\dot{\varphi} = b$ ,

$$v_\rho = a, \quad v_\varphi = abt \quad \text{и} \quad v = \sqrt{v_\rho^2 + v_\varphi^2} = a \sqrt{1 + b^2 t^2}.$$

3°. Движение точки называют *равномерным*, если модуль ее скорости не зависит от времени ( $v = \text{const}$ ). Длина пути, пройденного равномерно движущейся точкой, является линейной функцией времени:

$$s = v(t - t_0).$$

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |           |
|---|-----------|
| ПРЕДИСЛОВИЕ. . . . .  | 3         |
| <b>Р а з д е л I</b>  |           |
| <b>Физические основы классической механики</b>  |           |
| <b>Г л а в а 1. Кинематика материальной точки<br/>и абсолютно твердого тела . . . . .</b> | <b>5</b>  |
| 1. Предварительные понятия. . . . .   | 5         |
| 2. Скорость точки. . . . .  | 12        |
| 3. Ускорение точки . . . . .  | 15        |
| 4. Кинематика твердого тела . . . . .   | 18        |
| 5. Абсолютное, относительное<br>и переносное движения . . . . .                           | 24        |
| 6. Некоторые случаи сложения движений<br>твердого тела . . . . .                          | 27        |
| <b>Г л а в а 2. Динамика поступательного движения</b>                                     | <b>29</b> |
| 1. Первый закон Ньютона . . . . .   | 29        |
| 2. Сила . . . . .   | 30        |
| 3. Масса тела . . . . .   | 34        |
| 4. Второй закон Ньютона . . . . .   | 37        |
| 5. Третий закон Ньютона . . . . .   | 39        |
| 6. Закон изменения импульса . . . . .   | 40        |
| 7. Закон сохранения импульса . . . . .  | 42        |
| 8. Движение тела переменной массы. . . . .  | 43        |
| 9. Механический принцип относительности   | 45        |
| 10. Закон всемирного тяготения . . . . .  | 46        |
| 11. Гравитационное поле . . . . .   | 49        |
| 12. Внешнее трение . . . . .  | 53        |
| 13. Движение в неинерциальных<br>системах отсчета . . . . .                               | 55        |
| <b>Г л а в а 3. Работа и механическая энергия . . . .</b>                                 | <b>58</b> |
| 1. Энергия . . . . .  | 58        |
| 2. Работа . . . . .   | 59        |

|                     |   |            |
|---------------------|---|------------|
| 3.                  | Потенциальные поля и силы.<br>Силовая функция . . . . .                 | 62         |
| 4.                  | Механическая энергия . . . . .  | 65         |
| 5.                  | Закон сохранения механической энергии                                   | 71         |
| 6.                  | Удар . . . . .  | 72         |
| <b>Г л а в а 4.</b> | <b>Динамика вращательного движения</b>                                  | <b>74</b>  |
| 1.                  | Момент инерции . . . . .  | 74         |
| 2.                  | Момент импульса . . . . .   | 79         |
| 3.                  | Закон изменения момента импульса . . . . .                              | 82         |
| 4.                  | Закон сохранения момента импульса . . . . .                             | 85         |
| 5.                  | Движение под действием центральных сил                                  | 87         |
| 6.                  | Гироскоп . . . . .  | 92         |
| <b>Г л а в а 5.</b> | <b>Основы аналитической механики . . . . .</b>                          | <b>96</b>  |
| 1.                  | Основные понятия и определения . . . . .                                | 96         |
| 2.                  | Уравнения Лагранжа второго рода . . . . .                               | 100        |
| 3.                  | Функция Гамильтона.<br>Канонические уравнения Гамильтона . . . . .      | 103        |
| 4.                  | Понятие о вариационных<br>принципах механики . . . . .                  | 107        |
| 5.                  | Канонические преобразования . . . . .                                   | 114        |
| 6.                  | Законы сохранения . . . . .   | 121        |
| <b>Г л а в а 6.</b> | <b>Механические колебания . . . . .</b>                                 | <b>124</b> |
| 1.                  | Основные понятия . . . . .  | 124        |
| 2.                  | Малые колебания системы,<br>имеющей одну степень свободы . . . . .      | 130        |
| 3.                  | Малые колебания системы<br>с несколькими степенями свободы . . . . .    | 140        |
| 4.                  | Колебания нелинейной системы,<br>имеющей одну степень свободы . . . . . | 154        |

## Р а з д е л II

### Основы термодинамики и молекулярной физики

|                     |   |            |
|---------------------|---|------------|
| <b>Г л а в а 1.</b> | <b>Основные понятия . . . . .</b>           | <b>166</b> |
| <b>Г л а в а 2.</b> | <b>Законы идеальных газов . . . . .</b>     | <b>172</b> |
| 1.                  | Идеальные газы . . . . .                    | 172        |
| 2.                  | Смеси идеальных газов . . . . .             | 174        |
| <b>Г л а в а 3.</b> | <b>Первый закон термодинамики . . . . .</b> | <b>176</b> |
| 1.                  | Внутренняя энергия и энтальпия . . . . .    | 176        |
| 2.                  | Работа и теплота . . . . .                  | 179        |

|  |  |            |
|--|--|------------|
| 3.   | Теплоемкость . . . . .   | 180        |
| 4.   | Первый закон термодинамики . . . . .   | 181        |
| 5.   | Простейшие термодинамические процессы идеальных газов . . . . .                          | 185        |
| <b>Г л а в а 4. Второй и третий законы термодинамики . . . . .</b> |  | <b>186</b> |
| 1.   | Обратимые и необратимые процессы . . . . .   | 186        |
| 2.   | Круговые процессы (циклы). Цикл Карно . . . . .  | 190        |
| 3.   | Второй закон термодинамики . . . . .   | 196        |
| 4.   | Энтропия . . . . .   | 198        |
| 5.   | Основное соотношение термодинамики . . . . .   | 202        |
| 6.   | Характеристические функции и термодинамические потенциалы . . . . .                      | 203        |
| 7.   | Основные дифференциальные уравнения термодинамики . . . . .                              | 208        |
| 8.   | Диаграмма $s-T$ . . . . .  | 212        |
| 9.   | Многокомпонентные и многофазные системы. Условия термодинамического равновесия . . . . . | 216        |
| 10.  | Химическое равновесие . . . . .  | 225        |
| 11.  | Третий закон термодинамики . . . . .   | 229        |
| <b>Г л а в а 5. Кинетическая теория газов . . . . .</b>            |  | <b>231</b> |
| 1.   | Основное уравнение кинетической теории газов . . . . .                                   | 231        |
| 2.   | Закон распределения молекул по скоростям . . . . .                                       | 232        |
| 3.   | Средняя длина свободного пробега молекул . . . . .                                       | 236        |
| 4.   | Явления переноса в газах . . . . .   | 237        |
| 5.   | Свойства разреженных газов . . . . .   | 243        |
| <b>Г л а в а 6. Элементы статистической физики . . . . .</b>       |  | <b>246</b> |
| 1.   | Введение . . . . .   | 246        |
| 2.   | Вероятность состояния системы. Средние значения физических величин . . . . .             | 247        |
| 3.   | Распределение Гиббса . . . . .   | 249        |
| 4.   | Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы . . . . .                   | 253        |
| 5.   | Распределение Максвелла—Больцмана . . . . .  | 254        |
| 6.   | Квантовая статистика . . . . .   | 256        |
| 7.   | Квантовые распределения Бозе—Эйнштейна и Ферми—Дирака . . . . .                          | 256        |
| 8.   | Вырожденный газ . . . . .  | 258        |
| 9.   | Теплоемкости одноатомных и двухатомных газов . . . . .                                   | 264        |

|   |            |
|---|------------|
| 10. Статистический смысл второго начала термодинамики . . . . .             | 268        |
| 11. Флуктуации . . . . .  | 269        |
| 12. Влияние флуктуаций на чувствительность измерительных приборов . . . . . | 273        |
| 13. Электрические флуктуации в радиоаппаратуре . . . . .                    | 275        |
| 14. Броуновское движение . . . . .  | 276        |
| <b>Г л а в а 7. Реальные газы и пары . . . . .</b>                          | <b>277</b> |
| 1. Уравнения состояния реальных газов . . . . .                             | 277        |
| 2. Силы межмолекулярного взаимодействия в газах . . . . .                   | 280        |
| 3. Дросселирование газов. Эффект Джоуля—Томсона . . . . .                   | 282        |
| 4. Изотермы реальных газов. Пары. Критическое состояние вещества . . . . .  | 283        |
| 5. Сжижение газов . . . . .   | 285        |
| <b>Г л а в а 8. Жидкости . . . . .</b>                                      | <b>286</b> |
| 1. Общие свойства и строение жидкостей . . . . .                            | 286        |
| 2. Свойства поверхностного слоя жидкости . . . . .                          | 290        |
| 3. Смачивание. Капиллярные явления . . . . .                                | 292        |
| 4. Испарение и кипение жидкостей . . . . .                                  | 295        |
| 5. Свойства разбавленных растворов . . . . .                                | 297        |
| 6. Сверхтекучесть гелия . . . . .   | 298        |
| <b>Г л а в а 9. Кристаллические твердые тела . . . . .</b>                  | <b>300</b> |
| 1. Общие свойства и строение твердых тел . . . . .                          | 300        |
| 2. Тепловое расширение твердых тел . . . . .                                | 304        |
| 3. Теплопроводность твердых тел . . . . .                                   | 306        |
| 4. Теплоемкость твердых тел . . . . .                                       | 311        |
| 5. Фазовые превращения твердых тел . . . . .                                | 313        |
| 6. Адсорбция . . . . .  | 316        |
| 7. Упругие свойства твердых тел . . . . .                                   | 318        |

### Р а з д е л III

#### Основы гидроаэромеханики

|  |            |
|--|------------|
| <b>Г л а в а 1. Гидроаэростатика . . . . .</b>           | <b>324</b> |
| 1. Введение . . . . .                                    | 324        |
| 2. Гидроаэростатика . . . . .                            | 325        |
| <b>Г л а в а 2. Кинематика жидкости и газа . . . . .</b> | <b>328</b> |
| 1. Основные понятия . . . . .                            | 328        |
| 2. Уравнение неразрывности . . . . .                     | 332        |



|   |            |
|---|------------|
| <b>Глава 3. Гидроаэродинамика . . . . .</b>                     | <b>334</b> |
| 1. Уравнения движения идеальной<br>и вязкой жидкостей . . . . . | 334        |
| 2. Уравнение энергии. . . . .                                   | 341        |
| 3. Элементы теории размерностей<br>и теории подобия . . . . .   | 344        |
| 4. Движение тел в жидкости.<br>Пограничный слой. . . . .        | 350        |
| 5. Движение жидкостей в трубах . . . . .                        | 354        |

## **Раздел IV**

### **Электричество и магнетизм**

|   |            |
|---|------------|
| <b>Глава 1. Электростатика . . . . .</b>  | <b>359</b> |
| 1. Основные понятия. Закон Кулона . . . . .   | 359        |
| 2. Электрическое поле. Напряженность поля   | 361        |
| 3. Электрическое смещение.<br>Теорема Гаусса—Остроградского<br>для потока смещения. . . . . | 366        |
| 4. Потенциал электростатического поля . . . .   | 367        |
| 5. Проводники в электростатическом поле . . .   | 373        |
| 6. Емкость . . . . .  | 376        |
| 7. Диэлектрики в электрическом поле . . . . .   | 378        |
| 8. Пьезоэлектрики.<br>Пьезоэлектрический эффект . . . . .                                   | 387        |
| 9. Энергия заряженного проводника<br>и электрического поля. . . . .                         | 389        |
| <b>Глава 2. Постоянный электрический ток<br/>в металлах . . . . .</b>                       | <b>392</b> |
| 1. Основные понятия и определения . . . . .   | 392        |
| 2. Электронная теория проводимости . . . . .  | 393        |
| 3. Законы постоянного тока. . . . .   | 397        |
| 4. Правило Кирхгофа. . . . .  | 401        |
| <b>Глава 3. Электрический ток<br/>в жидкостях и газах . . . . .</b>                         | <b>404</b> |
| 1. Проводимость жидкостей.<br>Электролитическая диссоциация . . . . .                       | 404        |
| 2. Законы электролиза. . . . .  | 405        |
| 3. Дискретность электрического заряда . . . .   | 406        |
| 4. Закон Ома для тока в жидкостях. . . . .  | 407        |

---

|  |            |
|--|------------|
| 5. Электропроводность газов . . . . .  | 407        |
| 6. Несамостоятельный газовый разряд . . . . .  | 408        |
| 7. Самостоятельный газовый разряд . . . . .  | 409        |
| 8. Понятие о плазме . . . . .  | 414        |
| <b>Г л а в а 4. Электрический ток</b>  |            |
| <b>в полупроводниках . . . . .</b>   | <b>419</b> |
| 1. Собственная проводимость<br>полупроводников . . . . .                                   | 419        |
| 2. Примесная проводимость<br>полупроводников . . . . .                                     | 421        |
| 3. Явление Холла в металлах<br>и полупроводниках . . . . .                                 | 427        |
| <b>Г л а в а 5. Контактные, термоэлектрические</b>   |            |
| <b>и эмиссионные явления . . . . .</b>   | <b>428</b> |
| 1. Контактные явления в металлах.<br>Законы Вольты . . . . .                               | 428        |
| 2. Контактные явления в полупроводниках  | 432        |
| 3. Термоэлектрические явления<br>в металлах и полупроводниках . . . . .                    | 440        |
| 4. Эмиссионные явления в металлах . . . . .  | 446        |
| <b>Г л а в а 6. Магнитное поле постоянного тока . . .</b>                                  | <b>450</b> |
| 1. Магнитное поле. Закон Ампера . . . . .  | 450        |
| 2. Закон Био—Савара—Лапласа . . . . .  | 451        |
| 3. Простейшие магнитные поля токов. . . . .  | 454        |
| 4. Действие магнитного поля на проводники<br>с токами. Взаимодействие проводников. . . . . | 458        |
| 5. Закон полного тока. Магнитные цепи . . . . .  | 460        |
| 6. Работа перемещения проводника<br>с током в магнитном поле . . . . .                     | 463        |
| <b>Г л а в а 7. Движение заряженных частиц</b>   |            |
| <b>в электрическом и магнитном полях. . . . .</b>  | <b>464</b> |
| 1. Сила Лоренца . . . . .  | 464        |
| 2. Удельный заряд частиц.<br>Масс-спектрография . . . . .                                  | 466        |
| 3. Ускорители заряженных частиц . . . . .  | 467        |
| 4. Основы электронной оптики . . . . .   | 471        |
| <b>Г л а в а 8. Электромагнитная индукция . . . . .</b>                                    | <b>477</b> |
| 1. Основной закон<br>электромагнитной индукции . . . . .                                   | 477        |
| 2. Вихревые индукционные токи. . . . .   | 480        |
| 3. Явление самоиндукции . . . . .  | 480        |

|                      |   |            |
|----------------------|---|------------|
| 4.                   | Взаимная индукция . . . . .   | 484        |
| 5.                   | Энергия магнитного<br>поля электрического тока . . . . .  | 485        |
| <b>Г л а в а 9.</b>  | <b>Магнитные свойства вещества . . . . .</b>  | <b>487</b> |
| 1.                   | Магнитные моменты электронов и атомов   | 487        |
| 2.                   | Классификация магнетиков . . . . .  | 490        |
| 3.                   | Диамагнетизм . . . . .  | 492        |
| 4.                   | Парамагнетизм . . . . .   | 493        |
| 5.                   | Магнитное поле в магнетиках . . . . .   | 495        |
| 6.                   | Ферромагнетизм . . . . .  | 498        |
| 7.                   | Сверхпроводимость . . . . .   | 504        |
| <b>Г л а в а 10.</b> | <b>Электромагнитные колебания . . . . .</b>   | <b>507</b> |
| 1.                   | Колебательный контур . . . . .  | 507        |
| 2.                   | Вынужденные электромагнитные<br>колебания . . . . .   | 510        |
| <b>Г л а в а 11.</b> | <b>Основы электродинамики<br/>неподвижных сред . . . . .</b>  | <b>515</b> |
| 1.                   | Общая характеристика теории Максвелла   | 515        |
| 2.                   | Первое уравнение Максвелла . . . . .  | 517        |
| 3.                   | Ток смещения.<br>Второе уравнение Максвелла . . . . .   | 517        |
| 4.                   | Полная система уравнений Максвелла<br>для электромагнитного поля . . . . .  | 519        |
| 5.                   | Решение уравнений Максвелла<br>методом запаздывающих<br>потенциалов (при $\epsilon, \mu = \text{const}$ ) . . . . . | 521        |
| 6.                   | Законы сохранения<br>в электромагнитном поле . . . . .  | 522        |
| 7.                   | Основные положения электромагнитной<br>теории. Система уравнений Лоренца . . . . .                                  | 524        |
| 8.                   | Усреднение уравнений микрополя . . . . .  | 525        |
| <b>Г л а в а 12.</b> | <b>Основы магнитной гидродинамики</b>   | <b>527</b> |
| 1.                   | Уравнение магнитной гидродинамики . . .   | 527        |
| 2.                   | Магнитогидродинамические волны . . . . .  | 531        |
| 3.                   | Разрывы и ударные волны . . . . .   | 534        |
| <b>Г л а в а 13.</b> | <b>Основы специальной теории<br/>относительности . . . . .</b>  | <b>538</b> |
| 1.                   | Принцип относительности Эйнштейна . . .   | 538        |
| 2.                   | Интервал . . . . .  | 540        |
| 3.                   | Преобразования Лоренца и их следствия . . .   | 542        |
| 4.                   | Преобразования скорости и ускорения . . .   | 544        |

|   |     |
|---|-----|
| 5. Релятивистская динамика . . . . .                              | 546 |
| 6. Преобразования Лоренца<br>для электромагнитного поля . . . . . | 550 |
| 7. Эффект Доплера<br>для электромагнитных волн . . . . .          | 552 |

## Р а з д е л V

### Волновые процессы

|  |            |
|--|------------|
| <b>Г л а в а 1. Основы акустики . . . . .</b>  | <b>553</b> |
| 1. Введение . . . . .  | 553        |
| 2. Скорость распространения<br>звуковых волн (скорость звука) . . . . .                                      | 554        |
| 3. Волновое уравнение . . . . .  | 555        |
| 4. Продольные синусоидальные волны . . . . .   | 559        |
| 5. Энергия акустических волн . . . . .   | 562        |
| 6. Отражение и преломление продольных<br>акустических волн<br>(в отсутствие дифракционных явлений) . . . . . | 565        |
| 7. Стоячие волны . . . . .   | 569        |
| 8. Эффект Доплера в акустике . . . . .   | 573        |
| 9. Поглощение и рассеяние звуковых волн . . . . .  | 573        |
| 10. Элементы физиологической акустики . . . . .  | 575        |
| 11. Ультразвук . . . . .   | 577        |
| 12. Ударные волны в газах . . . . .  | 580        |
| <b>Г л а в а 2. Электромагнитные волны . . . . .</b>   | <b>586</b> |
| 1. Общая характеристика . . . . .  | 586        |
| 2. Излучение электромагнитных волн<br>в вакууме . . . . .  | 594        |
| <b>Г л а в а 3. Прохождение света<br/>через границу двух сред . . . . .</b>                                  | <b>603</b> |
| 1. Взаимодействие электромагнитных волн<br>с веществом . . . . .   | 603        |
| 2. Отражение и преломление света<br>диэлектриками . . . . .  | 605        |
| 3. Поляризация света при отражении<br>и преломлении . . . . .  | 611        |
| 4. Основы металлооптики . . . . .  | 613        |
| <b>Г л а в а 4. Интерференция света . . . . .</b>  | <b>616</b> |
| 1. Когерентные волны . . . . .   | 616        |
| 2. Интерференция в тонких пленках . . . . .  | 622        |
| 3. Интерференция многих волн . . . . .   | 626        |

---

|   |     |
|---|-----|
| <b>Глава 5. Дифракция света</b> . . . . .   | 628 |
| 1. Принцип Гюйгенса—Френеля . . . . .   | 628 |
| 2. Графическое сложение амплитуд<br>вторичных волн . . . . .                                | 631 |
| 3. Дифракция Френеля . . . . .  | 633 |
| 4. Дифракция Фраунгофера . . . . .  | 636 |
| 5. Дифракционные явления<br>на многомерных структурах . . . . .                             | 644 |
| 6. Дифракция радиоволн . . . . .  | 647 |
| <b>Глава 6. Геометрическая оптика</b> . . . . .   | 648 |
| 1. Основные положения . . . . .   | 648 |
| 2. Плоское зеркало.<br>Плоскопараллельная пластинка. Призма                                 | 650 |
| 3. Преломление и отражение<br>на сферической поверхности . . . . .                          | 651 |
| 4. Тонкие линзы. . . . .  | 655 |
| 5. Центрированные оптические системы . . . . .  | 659 |
| 6. Основные оптические приборы . . . . .  | 662 |
| 7. Погрешности оптических систем . . . . .  | 667 |
| 8. Разрешающая способность<br>оптических приборов . . . . .                                 | 672 |
| 9. Основы фотометрии . . . . .  | 675 |
| <b>Глава 7. Поляризация света</b> . . . . .   | 678 |
| 1. Способы получения поляризованного света  | 678 |
| 2. Элементы кристаллооптики . . . . .   | 680 |
| 3. Двойное лучепреломление . . . . .  | 686 |
| 4. Искусственное двойное лучепреломление  | 690 |
| 5. Анализ поляризованного света.<br>Эллиптическая и круговая<br>поляризация света . . . . . | 692 |
| 6. Интерференция поляризованных лучей . . . . .   | 694 |
| 7. Вращение плоскости поляризации . . . . .   | 697 |
| <b>Глава 8. Молекулярная оптика</b> . . . . .   | 699 |
| 1. Дисперсия света . . . . .  | 699 |
| 2. Спектральный анализ . . . . .  | 704 |
| 3. Поглощение света . . . . .   | 709 |
| 4. Рассеяние света . . . . .  | 711 |
| <b>Глава 9. Тепловое излучение</b> . . . . .  | 715 |
| 1. Тепловое излучение . . . . .   | 715 |
| 2. Законы излучения черного тела . . . . .  | 719 |
| 3. Понятие об оптической пирометрии . . . . .   | 723 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Г л а в а 10. Действия света</b> . . . . .                         | 725 |
| 1. Фотоэлектрический эффект . . . . .                                 | 725 |
| 2. Эффект Комптона . . . . .  | 730 |
| 3. Давление света . . . . .   | 732 |
| 4. Химические действия света . . . . .                                | 734 |
| <b>Г л а в а 11. Люминесценция</b> . . . . .                          | 735 |
| 1. Классификация процессов<br>люминесценции и их протекание . . . . . | 735 |
| 2. Закономерности люминесценции . . . . .                             | 738 |

## **Р а з д е л VI**

### **Основы квантовой механики и атомной физики**

|   |     |
|---|-----|
| <b>Г л а в а 1. Введение в нерелятивистскую<br/>квантовую механику</b> . . . . .                        | 741 |
| 1. Волновая функция . . . . .   | 741 |
| 2. Соотношение неопределенностей<br>Гейзенберга . . . . .   | 743 |
| 3. Линейные самосопряженные операторы   | 745 |
| 4. Операторы динамических переменных . . . . .  | 747 |
| 5. Уравнение Шредингера . . . . .   | 753 |
| 6. Уравнения движения<br>и законы сохранения . . . . .  | 755 |
| 7. Основы теории представлений . . . . .  | 759 |
| <b>Г л а в а 2. Простейшие задачи<br/>нерелятивистской квантовой механики</b> . . . . .                 | 764 |
| 1. Гармонический осциллятор . . . . .   | 764 |
| 2. Ротатор . . . . .  | 766 |
| 3. Одномерная прямоугольная<br>потенциальная яма . . . . .  | 768 |
| 4. Трехмерная прямоугольная<br>потенциальная яма . . . . .  | 770 |
| 5. Потенциальный барьер . . . . .   | 771 |
| 6. Движение электрона в центральном<br>кулоновском поле ядра атома<br>(водородоподобные ионы) . . . . . | 775 |
| 7. Рассеяние частиц в центральном поле сил  | 779 |
| 8. Квазиклассическое приближение . . . . .  | 783 |
| 9. Движение электрона в периодическом поле  | 785 |
| 10. Квантовые переходы . . . . .  | 789 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Г л а в а 3. Атом</b> . . . . .                | 796 |
| 1. Атомы и ионы с одним валентным электроном      | 798 |
| 2. Многоэлектронные атомы                         | 800 |
| 3. Векторная модель атома                         | 805 |
| 4. Эффект Зеемана и явления резонанса             | 810 |
| 5. Эффект Штарка в водородоподобных системах      | 817 |
| 6. Принцип Паули. Периодическая система элементов | 818 |
| 7. Рентгеновское излучение                        | 826 |
| <b>Г л а в а 4. Молекула</b> . . . . .            | 829 |
| 1. Ионные молекулы                                | 829 |
| 2. Атомные молекулы                               | 831 |
| 3. Электронные спектры молекул                    | 836 |
| 4. Колебательные спектры молекул                  | 841 |
| 5. Вращательные спектры молекул                   | 843 |
| 6. Электронно-колебательные спектры молекул       | 847 |
| 7. Вращательно-колебательные спектры молекул      | 849 |
| 8. Комбинационные спектры молекул                 | 850 |
| 9. Сплошные и диффузные спектры молекул           | 851 |
| 10. Молекулярная спектроскопия                    | 853 |
| 11. Ионизация атомов и молекул                    | 854 |

## **Р а з д е л VII**

### **Основы ядерной физики и физики элементарных частиц**

|   |     |
|---|-----|
| <b>Г л а в а 1. Атомное ядро</b> . . . . .                        | 856 |
| 1. Состав и размеры атомных ядер                                  | 856 |
| 2. Энергия связи ядер. Ядерные силы                               | 858 |
| 3. Магнитные и электрические свойства ядер                        | 862 |
| 4. Модели ядра  | 866 |
| <b>Г л а в а 2. Радиоактивность</b> . . . . .                     | 870 |
| 1. Основные понятия   | 870 |
| 2. Альфа-распад   | 877 |
| 3. Бета-распад  | 879 |
| 4. Гамма-излучение  | 884 |
| 5. Прохождение заряженных частиц и гамма-излучения через вещество | 887 |

---

|  |      |
|--|------|
| <b>Г л а в а 3. Ядерные реакции</b> . . . . .            | 895  |
| 1. Основные понятия . . . . .                            | 895  |
| 2. Общая классификация ядерных реакций . . . . .         | 900  |
| 3. Физические основы ядерной энергетики . . . . .        | 905  |
| <b>Г л а в а 4. Элементарные частицы</b> . . . . .       | 912  |
| 1. Принципы теории . . . . .                             | 912  |
| 2. Фундаментальные частицы<br>и взаимодействия . . . . . | 925  |
| 3. Гравитация. Квантовая электродинамика . . . . .       | 945  |
| 4. Сильное (цветное) взаимодействие . . . . .            | 956  |
| 5. Слабое взаимодействие . . . . .                       | 974  |
| 6. Электрослабое взаимодействие . . . . .                | 982  |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> . . . . .                              | 992  |
| <b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ</b> . . . . .                    | 1011 |