

Часть 1. МЕХАНИКА

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Предмет физики. Измерения в физике. Физический метод познания

Физика – фундаментальная наука; она изучает самые общие законы и свойства движения материи. Ее понятия и законы являются основой естествознания и техники.

Слово «*физика*» происходит от греческого «phýsis» – «*природа*» – и введено Аристотелем. В своей «Физике» он отразил знания античных людей о мире. Физика тогда охватывала все отрасли знаний о природе. Но по мере расширения знаний о мире из нее выделялись и выделяются другие науки: астрономия, химия, биология, биохимия, молекулярная биология, физическая химия.

Физика – наука экспериментальная. Это означает, что ее понятия и законы опираются на факты, которые устанавливают опытным путем, путем наблюдений и целевых действий. Законы физики высказывают обычно в виде количественных соотношений между *физическими величинами* (между тем, что обладает мерой). Сами взаимосвязи формулируются, как правило, хотя и не всегда, на языке математики в виде определенных математических соотношений или уравнений.

В основании физики как системном познании мира лежит *измерение*. Это ее базисное понятие. *Измерение – сознательная деятельность людей, состоящая в сравнении чего-то с чем-то сходным, взятым как эталон (единицу) сравнения, и осуществляется по выбранному критерию и способу сравнения с некоторой погрешностью при достижении цели сравнения.* Измерение включает в себя *эксперимент, оценку и контрольное измерение.*

Эксперимент – измерение, осуществляющее в интересах познания мира с минимально возможной погрешностью.

Оценка – измерение, осуществляющее в интересах прагматики (для пользы людям в целом) с допустимой для достижения цели сравнения погрешностью.

Контрольное измерение – оценка в условиях общественного производства, то есть измерение в рамках нормативных допусков.

Становление физики как науки в ее современном виде относится к 17–18 векам и обязано таким титанам науки, как Г. Галилей и И. Ньютона.

Г. Галилей (1564–1642) первым отказывается от **умозрительности** восприятия мира, бывшей для Аристотеля венцом миропонимания, и, приняв практику как **критерий истины**, создает **физический метод познания мира**. Этот метод стал живительной силой современной физики благодаря сочетанию **опыта** в форме **наблюдений и измерений, теории** (в форме математического **моделирования**) и проверки **результатов** познания явлений в мире, сопоставляя **опыт и теорию с практикой**. Эта трехзвенная структура процесса познания мира: опыт как измерения, теория как выработка идеальной модели, проверка модели практикой – показала свою исключительнейшую эффективность.

Видится несомненной величайшая роль И. Ньютона (1643–1727) в становлении современной физики и используемого ею метода познания: «Математические начала натуральной философии» (1687 г.) открыли миру сформулированные им основные законы механики, которую и сейчас называют механикой Ньютона или классической механикой. Он также определил целью науки отыскание общих количественно формулируемых законов природы и ввел **понятия физических принципов и состояний** систем как базисное основание методологии науки.

Успехи физики в познании мира и ее роль как фундамента техники породили на житейском уровне ощущение особой ее точности. Но любые опыты не могут охватить все разнообразие условий, в которых протекают явления. Сами измерения проводятся с ошибками или неточностями, то есть *погрешностями*. Опытным путем (а иного пути нет!) можно установить, что **законы справедливы лишь в ограниченных пределах и с ограниченной точностью**.

1.2. Оценка погрешностей измерений

Физики и в физике особую роль придают оценке достоверности результатов опыта. И здесь (словами академика П.Л. Капицы) «никогда невозможна перетрудиться». Результат измерений – всегда набор чисел. Но это лишь видимая часть «айсберга» – эксперимента. «Подводная» часть представлена такими действиями, как: 1) выбор физических величин; 2) выбор эталона сравнения; 3) выбор способа сравнения величины с эталоном; 4) проведение сравнения; 5) выбор момента достижения цели; 6) обработка данных; 7) оценка погрешностей измерения.

Источники ошибок многообразны. Это и опыт человека, и качество приборов, и природа явления, и соотнесенность модели процесса реальному явлению, и математическая обеспеченность обработки данных эксперимента, и т.п. Основанием справедливости физических теорий и представлений, строящихся на принципиальном допущении неточности в силу погрешности измерений и необходимости моделирования реальной природы явлений, служит проверка физических теорий и законов практикой познавательной деятельности людей.

Достоверность результатов измерений количественно оценивается величиной погрешности, которая устанавливается на основе данных некоторой серии измерений. Результат измерения в физике и технике – это некоторое число в виде десятичной дроби. Целая ее часть характеризует, сколько раз соответственная физическая величина A (например, длина отрезка l , площадь S участка некоторой поверхности, временная длительность t процесса и т.д.) содержит в себе ее этalon, а дробная часть – соответственно число его более мелких частей.

Оценку так называемой *абсолютной погрешности* ΔA величины A (то есть, погрешности ΔA , имеющей наименование самой физической величины A) проводят на основе серии измерений при одинаковых условиях эксперимента и получаемого при этом некоторого набора наименованных чисел $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$, причем наименование величины A дается ее эталоном (или единицей), например, для длины l – метр (м), для времени t – секунда (с) и т.п.

Отсчеты $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ для величины A при каждой операции измерений отличаются от ее истинного значения A_0 , в качестве

которого по договоренности принимается среднее арифметическое A_{cp} для этих отсчетов:

$$A_0 \equiv A_{\text{cp}} = (A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n) / n. \quad (1.1)$$

Полученное таким образом истинное значение A_0 величины A позволяет найти набор отклонений ΔA_k ($k = 1, 2, 3, \dots, n$) для конкретного отсчета A_k величины A от ее истинного значения:

$$\Delta A_k = A_k - A_0 \equiv A_k - A_{\text{cp}} \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (1.2)$$

Среднее арифметическое для этих отклонений ΔA_k равно, конечно же, нулю и потому не может служить мерой отклонения от истинного значения A_{cp} нашей физической величины A . Поэтому в качестве меры отклонения ΔA отсчетов при измерении величины A от ее истинного значения $A_0 \equiv A_{\text{cp}}$, то есть в качестве абсолютной погрешности ΔA измерения величины A , принимается некоторое среднее значение от положительных значений этих частных отклонений ΔA_k , которое договорились строить либо как среднее арифметическое для модулей $|\Delta A_k|$ отклонений ΔA_k :

$$\Delta A_{\text{cp}} = (|\Delta A_1| + |\Delta A_2| + |\Delta A_3| + \dots + |\Delta A_n|) / n, \quad (1.3)$$

либо как среднеквадратическое ΔA_{cp} от квадратов $(\Delta A_k)^2$ отклонений ΔA_k согласно соотношению вида:

$$\begin{aligned} \Delta A_{\text{cp}} &= \left\{ \left[\sum (\Delta A_k)^2 \right] / n(n-1) \right\}^{\frac{1}{2}} = \\ &= \left\{ \left[(\Delta A_1)^2 + (\Delta A_2)^2 + (\Delta A_3)^2 + \dots + (\Delta A_n)^2 \right] / n(n-1) \right\}^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Если абсолютная погрешность ΔA определяет область достоверности полученных значений физической величины A , то качество (или уровень классности) таких измерений определяет так называемая **относительная** (безразмерная) **погрешность** δA , которую оценивают отношением абсолютной погрешности ΔA измерения величины A к ее истинному значению $A_0 = A_{\text{cp}}$:

$$\delta A = (\Delta A / A_{\text{cp}}). \quad (1.5)$$

На практике различают погрешности, обусловленные конкретными значениями отклонений ΔA_k отсчетов A_k от истинного значения A_{cp} физической величины A при ее непосредственном сравнении с эталоном. Такого рода измерения называют **прямыми**, а оцениваемые на их основе погрешности называют **случайными**. Все изложенное выше относительно оценок погрешностей в первую очередь и полностью относится к погрешностям случайным. Но

достоверность результатов измерений определяется не только случайными погрешностями, но и **систематическими** погрешностями, уровень которых определяется классом точности изготовления соответствующих приборов и уровнем совершенства используемых методик сравнения, а также уровнем совершенства научно-методической техники обработки результатов измерений и даже точностью используемых числовых констант. В совокупности случайная и систематическая погрешности измерений физической величины A определяют ее **полную погрешность** как абсолютную $\Delta A_{\text{полн}}$, так и относительную $\delta A_{\text{полн}}$. При этом **абсолютная полная погрешность** $\Delta A_{\text{полн}}$ получается как арифметическая сумма абсолютных значений (или модулей) случайной $|\Delta A_{\text{случ}}|$ и систематической $|\Delta A_{\text{систем}}|$ погрешностей измерения величины A :

$$\Delta A_{\text{полн}} = |\Delta A_{\text{случ}}| + |\Delta A_{\text{систем}}| \quad (1.6)$$

или как квадратическая величина $\Delta A_{\text{полн кв}}$ от суммы квадратов случайной $\Delta A_{\text{случ}}$ и систематической $\Delta A_{\text{систем}}$ погрешностей:

$$\Delta A_{\text{полн кв}} = \left[(\Delta A_{\text{случ}})^2 + (\Delta A_{\text{систем}})^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (1.7)$$

На практике измерений любая физическая величина P в преобладающем числе случаев реально представляется в виде некоторой опосредованной величины, заданной произведением величин A, B, C и т.п. в степени a, b, c и т.п. как результат так называемых опосредованных или косвенных измерений, а именно:

$$P = A^a B^b C^c \dots, \quad (1.8)$$

причем эти степени a, b, c и т.п. могут быть целыми или дробными положительными или отрицательными числами. Тогда истинное P_0 значение этой опосредованной величины P получается как произведение истинных значений A_0, B_0, C_0 в степени a, b, c соответственно:

$$P_0 = (A_0)^a (B_0)^b (C_0)^c \dots, \quad (1.9)$$

а относительная погрешность:

$$\delta P = (\Delta P / P_0) \quad (1.10)$$

определяется как сумма относительных погрешностей $\delta A, \delta B, \delta C$ и т.п. величин A, B, C и т.п., повторенных соответственно a, b, c и т.п. раз согласно соотношению вида:

$$\delta P = a\delta A + b\delta B + c\delta C + \dots, \quad (1.11)$$

а ее абсолютная погрешность ΔP получается как произведение относительной погрешности δP на значение P_0 самой величины:

$$\Delta P = \delta P \cdot P_0. \quad (1.12)$$

Эти соотношения – фундамент оценки погрешностей в практике измерений.

1.3. Взаимовлияние физики и техники. Связь физики с другими науками

Рассмотрим взаимосвязь физики с другими науками. Физика – основа развития и использования естественных и технических наук. Развиваясь, она порождает новые науки и отрасли техники. С другой стороны, развитие различных отраслей техники (микроэлектроники, информатики и т.п.) дает в ее руки средства и возможности более глубокого познания мира.

Особую роль имеет связь физики и математики. Без математики нет и физики. Но надо правильно видеть их отношения. Математика имеет дело с объектами виртуального мира, а физика – с объектами реального мира. Для математики истина в логической непротиворечивости всей системы ее построений. Для физики истина в согласии ее законов с практикой реальной жизни. Может оказаться, что физический закон применяют вне области, где он справедлив, а модель передает правильно не все свойства реального объекта. И тогда нет смысла исправлять недостатки теории строгостью математических рассуждений. Надо просто изменить модель и разработать новую теорию, отвечающую реалии.

Это замечание имеет и практическую ценность. Так, имея модель, можно провести расчеты математически строго. Но ошибки эксперимента и неточности моделирования такие расчеты лишают смысла. Более того, многие понятия и соотношения, составляющие гордость математики, теряют смысл в реальности: иррациональность величин лишена смысла в физике в силу невозможности проверки ее на опыте. Поэтому нужны и полезны приближенные расчеты.

Вопросы

1. Говорят: «физика – наука экспериментальная». А что это значит?
2. Что такое физическая величина?
3. Что такое физическая модель?

4. Что такое измерение?
 5. Что такое эксперимент, оценка, контрольное измерение?
 6. Что значит «физический метод познания»?
 7. Что такое погрешность измерения?
 8. Назовите источники погрешностей измерений.
 9. Что служит истинным значением физической величины?
 10. Что такое погрешность абсолютная, и как она определяется?
 11. Что такое погрешность относительная, и как она определяется?
 12. Что такое прямое измерение? Что такое косвенное измерение?
 13. Что такое погрешность случайная, систематическая и полная?
 14. Что можно сказать о справедливости законов физики? Почему?
 15. Как проявляется связь физики с другими науками?
 16. В чем состоят особенности связей физики и математики?
- Задачи 1.1, 1.2, 1.3.** См. приложение 1.

2. МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

2.1. Механическое движение и его относительность

Механическое движение – простейшая форма движения материи, и состоит в изменении положения тел со временем в выбранной системе отсчета. Изменение положения тел осмысленно лишь при отнесении их к телу отсчета. В этом и состоит **относительность** механического движения.

Относительность – это свойство быть **относительным**, то есть иметь или приобретать смысл лишь при отсылке к другому условию. **Абсолютность** – свойство быть **абсолютным**, то есть иметь смысл без отсылок к другим условиям.

Механическое движение обретает смысл при указании **тела отсчета** и привязанной к нему системы **координатных осей**, задающих направления в пространстве. Тело отсчета и координатные оси – это **система координат**; вместе с **часами** – это уже **система отсчета**.

Вернемся к понятиям пространства и времени. Это трудные для определений понятия, так как в силу первичности не сводятся к дру-

гим понятиям. При их толковании примем подход Лейбница; он выявил их *соотносительный* характер, признав их как совокупность определенных отношений.

Пространство – форма бытия материи, обусловленная отношениями **размещения и удаленности** тел относительно друг друга в силу невозможности их совмещения, а также способности располагаться рядом или на удалении друг от друга.

Время – форма бытия материи, обязанная отношениям **порядка следования** событий друг за другом в системе тел и **длительности** событий при этом. Пространство и время обладают метрическими и топологическими свойствами. Метрические свойства даны отношениями удаленности для пространства и отношениями длительности для времени.

Измерения пространственных и временных отрезков определили современную систему мер и измерений. Масштабы пространственных и временных мер чрезвычайно широки: от 10^{-18} до 10^{30} м для пространства и от 10^{-23} до 10^{40} с для времени. Эталоны длины и времени наиболее точны, уровень их точности поддерживается технологическим уровнем развитых стран.

2.2. Способы описания положения тел в мире

Механика – это наука о свойствах и законах механического движения.

Кинематика – раздел механики, изучающий ее законы без учета причин изменений положения тел со временем. Для описания положения тел в пространстве со временем пользуются *моделью точечных материальных тел* или *материальных точек*. **Материальная точка** – это физическое тело, размеры *a* которого существенно малы по сравнению с *характерными* для системы линейными размерами *R* ($a \ll R$). Положение тела в пространстве задают тремя числами или его координатами в выбранной системе отсчета. Выбор системы отсчета произведен и диктуется только удобствами. Число координат задано трехмерностью мира.

Трехмерность – это топологическое свойство пространства; оно порождено свойством и способностью тел обладать тремя независимыми линейными размерами: длиной, шириной и высотой.

Положение $A(t)$ точечного тела в пространстве со временем t задают разными способами. Например, **радиус-векторный** способ состоит в том, что направленный отрезок (вектор) $\vec{r}(t)$ (рис. 2.1) проводят от тела отсчета (O) к положению точеч-

ного тела (A) и его концом указывают место положения тела. Сам отрезок (OA) – это **радиус-вектор** тела $\vec{r}(t)$. Линия, описываемая его концом с течением времени t , называется **годографом**. Она является для тела траекторией его движения. **Траектория** – это линия, которую описывает в пространстве конец радиус-вектора материальной точки с течением времени.

По виду траектории выделяют прямолинейное и криволинейное, плоское и неплоское движения. Прямолинейное движение – движение по прямой линии; криволинейное – движение по кривой линии; плоское (неплоское) движение имеет траекторию, остающуюся (не остающуюся) со временем в одной плоскости.

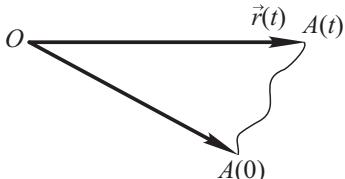


Рис. 2.1

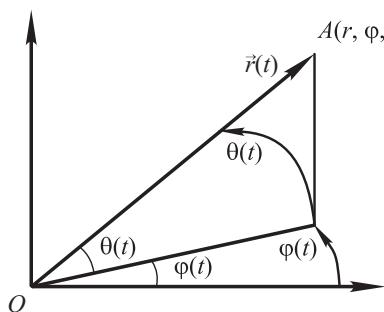


Рис. 2.2

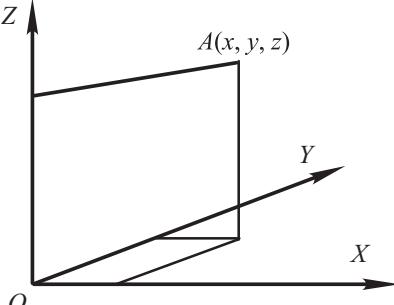


Рис. 2.3

Радиус-вектор $\vec{r}(t)$ точки A определяется его длиной (модулем) $r(t)$, углом азимута $\phi(t)$ для его проекции на выбранную плоскость азимутов относительно некоторого направления (при этом плоскость проводят под прямым углом к некоторой оси) и полярным углом $\theta(t)$ наклона радиус-вектора $\vec{r}(t)$ к плоскости азимутов (рис. 2.2). Координаты **радиус-векторной системы отсчета** – $\vec{r}(t)$, $\phi(t)$ и $\theta(t)$ – в зависимости их от времени t есть **кинематические законы** движения точки в этой системе отсчета.

Координатный способ описания движения использует так называемую **декартову систему отсчета** (рис. 2.3). Она строится как связка трех взаимно перпендикулярных осей OX , OY и OZ с центром O на теле отсчета и часами при нем. Положение точки $A(x, y, z)$ задается тремя числами $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$ в виде функций от времени t . Эти координаты получаются как отрезки вдоль осей, отсекаемые плоскостями, которые проводят через тело перпендикулярно осям. Зависимости координат $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$ от времени t – это **кинематические законы** движения тела в такой декартовой системе отсчета. Исключим время t из этих уравнений и получим уравнение траектории тела в этой системе координат. При этом связь **радиус-векторного и координатного способов** описания движения тела задана тем, что радиус-вектор $\vec{r}(t)$ – это есть **векторная сумма** $\vec{x}(t)$, $\vec{y}(t)$ и $\vec{z}(t)$ в декартовой системе отсчета:

$$\vec{r}(t) = \vec{x}(t) + \vec{y}(t) + \vec{z}(t). \quad (2.1)$$

Траекторный способ описания движения тела во времени используют, если известна траектория тела: *длина пути $L(t)$ вдоль траектории от времени t относительно некоторой точки на траектории O есть траекторный закон движения.*

Графики используют при толковании кинематических законов. На них в выбранном масштабе с указанием единиц измерения откладывают время t вдоль оси абсцисс (оси аргумента), а вдоль оси ординат (оси значений функции) ту или иную координату в выбранной системе отсчета для выбранного способа описания положения тела в пространстве со временем.

Вопросы

1. Что такое механическое движение?
2. Что такое относительность? Что такое абсолютность?
3. Что такое тело отсчета? Что такое система отсчета?
4. Что такое пространство? Назовите основные свойства пространства.
5. Что такое время? Назовите основные свойства времени.
6. Что такое механика? Что такое кинематика?
7. Что такое материальная точка?

8. Что такое траектория движения точечного тела?
9. Что такое график движения точечного тела?
10. Может ли реальное тело быть одновременно точечным и не-точечным?

3. КИНЕМАТИКА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

3.1. Элементы кинематики материальной точки

3.1.1. Равномерное движение по прямой. Скорость тела и закон движения

При описании механического движения интересно и то, где тело окажется в данный момент времени, и то, как быстро оно там окажется. Все эти вопросы так или иначе связаны с понятием **скорости**. Заметим, что новое понятие следует выявлять и осмысливать при сравнительно простых, но достаточно характерных ситуациях.

Равномерное прямолинейное движение точечного тела и составляет основу для раскрытия понятия скорости тела. Само же оно есть *движение по траектории в виде прямой, когда за любые равные промежутки времени тело проходит отрезки пути равной длины*.

Скорость \bar{v} при таком движении – это векторная физическая величина, модуль которой v определяется отношением длины пути ΔL вдоль траектории ко времени Δt , за которое пройден этот отрезок пути:

$$v = \Delta L / \Delta t, \quad (3.1)$$

а направление вектора скорости v совпадает с направлением движения тела вдоль траектории ($\bar{v} \uparrow \uparrow \Delta \vec{L}$):

$$\bar{v} = \Delta \vec{L} / \Delta t. \quad (3.2)$$

Единица скорости в СИ равна 1 м/с.

Интегральные соотношения, следующие из определений (3.1) – (3.2) в виде формул:

$$\Delta L = v \Delta t \quad \text{и} \quad \Delta \vec{L} = \vec{v} \Delta t \quad (3.3)$$

основа координатного $x(t)$ и траекторного $s(t)$ законов движения тела.

В самом деле, если понимать длину пути ΔL как разность координат конца пути $x(t)$ и его начала x_0 в конечный t и начальный $t_0 = 0$ моменты времени в координатном (соответственно $s(t)$ и s_0 в траекторном) представлении, то получаются кинематические законы равномерного прямолинейного (траекторного) движения точечного тела в виде:

$$x(t) = x_0 + vt; \quad (3.4.1)$$

$$s(t) = s_0 + vt. \quad (3.4.2)$$

Кинематический закон движения $\vec{r}(t)$ в виде:

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v}t \quad (3.5)$$

для радиус-вектора выступает как обобщение координатного кинематического закона $x(t)$ (3.4.1) и в таком виде распространяется на любое равномерное движение точечного тела вдоль прямой в любом направлении в пространстве.

3.1.2. Неравномерное движение. Средняя скорость

Неравномерное движение – это движение тела, проходящего вдоль траектории за равные промежутки времени пути разной длины.

Отношение пути L неравномерного движения ко времени t есть средняя скорость $v_{\text{ср}}$:

$$v_{\text{ср}} = L/t. \quad (3.6)$$

Она служит мерой быстроты неравномерного движения тела в целом.

Законы равномерного прямолинейного движения точечного тела позволяют более тонко описать неравномерное движение, вводя мгновенную скорость $\vec{v}(t)$ как среднюю скорость при физически малом перемещении $\Delta \vec{r}(t)$ за физически малый интервал времени Δt :

$$\vec{v}(t) = \Delta \vec{r}(t)/\Delta t. \quad (3.7)$$

3.1.3. Равноускоренное прямолинейное движение. Касательное ускорение. Закон изменения скорости и пути

Равноускоренное движение тела – это движение тела, при котором за любые равные промежутки времени равны **изменения величины** скорости тела. Это свойство позволяет ввести понятие ускорения.

Ускорение \vec{a} – это векторная физическая величина, определяемая отношением векторного приращения скорости $\Delta\vec{v}$ к длительности интервала времени Δt , за которое произошло такое приращение скорости тела (рис. 3.1):

$$\vec{a} = \Delta\vec{v} / \Delta t. \quad (3.8)$$

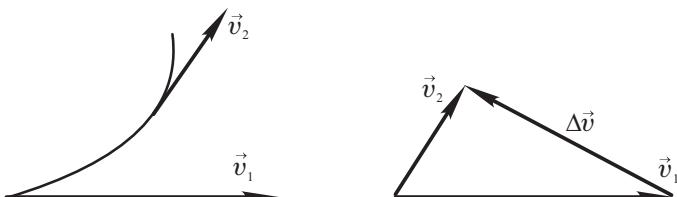


Рис. 3.1

При движении по прямой ускорение \vec{a} направлено либо вдоль скорости тела \vec{v} при ее увеличении ($\vec{a} \uparrow \uparrow \vec{v}$, и ускорение a положительно, то есть $a > 0$), либо против скорости \vec{v} при ее уменьшении ($\vec{a} \uparrow \downarrow \vec{v}$, и $a < 0$).

Скорость \vec{v} зависит от времени t линейно:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t, \quad (3.8)$$

как и координата тела $x(t)$ (3.4.1) при равномерном движении вдоль прямой.

Физическая малость интервалов перемещения $\Delta\vec{r}(t)$ и времени Δt – это малость по сравнению с характерными параметрами движения тела (временем движения t , длиной пути L). Сами же физически малые интервалы измеряются с **достаточной** для целей задачи **точностью**, являясь величинами **существенно большими** в сравнении с погрешностями измерений $|\delta\vec{r}(t)|$ и δt , то есть практика измерений должна отвечать неравенствам:

$$|\delta\vec{r}(t)| \ll |\Delta\vec{r}(t)| \ll L; \quad (3.10)$$

$$\delta t \ll \Delta t \ll t. \quad (3.11)$$

Эти неравенства есть **условия физического смысла** определений в кинематике.

Закон $x(t)$ равноускоренного движения вдоль оси OX является результатом интегрирования скорости $v(t)$ тела (3.8) по времени t :

$$x(t) = \int v(t) dt = \int (v_0 + at) dt = v_0 t + (at)^2 / 2 + C, \quad (3.12)$$

где постоянная C является начальной координатой тела x_0 при $t = 0$.

Окончательно получаем закон $x(t)$:

$$x(t) = x_0 + v_0 t + (at)^2 / 2. \quad (3.13)$$

Скорость $v(t)$ определяется его **продольным (касательным, тангенциальным, траекторным)** ускорением a :

$$v = v_0 + at. \quad (3.14)$$

Закон движения тела по траектории $s(t)$ получают интегрированием скорости $v(t)$ по времени t :

$$s(t) = \int v(t) dt = \int (v_0 + a_s t) dt = v_0 t + a_s t^2 / 2. \quad (3.15)$$

Знание кинематических законов $x(t)$ и $s(t)$ позволяет, применяя технику дифференцирования физических величин по времени t , получать скорость тела $v(t)$:

$$v(t) = dx / dt = x'_t = \lim(\Delta v / \Delta t) \text{ (при } \Delta t \rightarrow 0 \text{ и } \Delta x \rightarrow 0\text{),} \quad (3.16)$$

а знание скорости $v(t)$, в свою очередь, позволяет, дифференцируя ее также по времени t , получать ускорение a_s тела на траектории:

$$a_s = dv / dt = \lim(\Delta v / \Delta t) \text{ (при } \Delta t \rightarrow 0 \text{ и } \Delta v \rightarrow 0\text{).} \quad (3.17)$$

Заметим, что в математике скорость $v(t) = dx / dt$ представляет собой величину, получаемую как результат предельной операции $\lim(\Delta x / \Delta t)$, когда интервалы времени $\Delta t \rightarrow 0$ и длины $\Delta x \rightarrow 0$. В физике же – это измерение, которое проводится неизбежно с ошибками, погрешностями. И выбор так называемых бесконечно малых интервалов времени $\Delta t \rightarrow 0$ и длины $\Delta x \rightarrow 0$, логически допустимый в математике до сколь угодно малых значений, в физике ограничен требованиями физической осмысленности малости интервалов в соответствии с неравенствами (3.10) и (3.11).

3.2. Сложение движений

3.2.1. Принцип суперпозиции движения твердого тела

Рассмотренные способы описания положения тела относятся к точечным телам. На самом деле тела неточечные и могут быть твердыми и жидкими.

Твердое тело – это физическая система, которая ведет себя как целостная совокупность точечных тел, расстояния между которыми остаются с течением времени неизменными. В противном случае – это жидкое тело.

Все, что мешает изменениям в расположении частей тела или его самого относительно других тел, называют **связями**. Итак, **связи** – это физические ограничения в изменениях положения тел в выбранной системе отсчета с течением времени. Они называются внутренними для частей, составляющих твердое тело, и внешними связями для других тел.

Траектории отдельных точечных тел, составляющих конкретное тело, могут различаться весьма заметно. Кинематическое описание движения тел конечных размеров по модели точечных тел оказывается непригодным. Но есть важный для практики случай, когда такой подход оказывается пригодным. Это **поступательное движение твердого тела** – движение твердого тела, при котором любой отрезок прямой (рис. 3.2), соединяющий два его точечных элемента, перемещается параллельно самому себе (говоря «высоким штилем», обладает свойством **трансляции** – параллельного переноса).

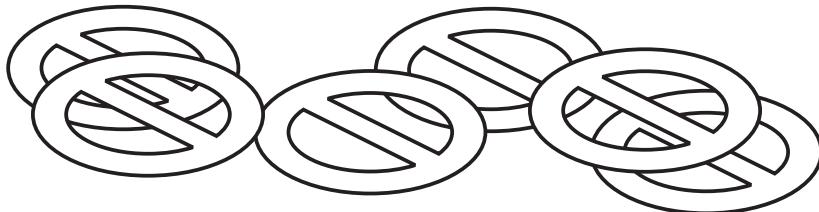


Рис. 3.2

Тогда траектории всех точек, составляющих твердое тело, отличаются лишь операцией трансляции, а само твердое тело можно представлять уже как точечное тело и его движение описывать законами кинематики для точечных тел.

Описание движения твердого тела опирается на установленный опытным путем **принцип сложения** или **суперпозиции** механических движений. В согласии с ним путь $s(t)$ тела – сумма путей ΔS_k на отдельных участках траектории тела:

$$s(t) = \sum s_k, \quad (3.18)$$

а вектор перемещения $\vec{r}(t)$ тела есть сумма векторов перемещения $\vec{r}_k(t)$ на отдельных k -участках пути:

$$\vec{r}(t) = \sum \vec{r}_k(t). \quad (3.19)$$

На практике этот принцип позволяет разбить все перемещение $\vec{r}(t)$ тела на отдельные физически малые интервалы перемещения $\Delta \vec{r}_k$, для которых можно в пределах точности измерений считать движение тела равномерным с постоянным вектором скорости \vec{v}_k , так что:

$$\Delta \vec{r}_k = \vec{v}_k \Delta t_k \quad (3.20)$$

для времени Δt_k движения на физически малом участке пути.

А закон движения тела $\vec{r}(t)$ – это интеграл по отдельным путям $\Delta \vec{r}_k$ (3.20) или скорости $\vec{v}(t)$ по времени t :

$$\vec{r}(t) = \int d\vec{r} = \int \vec{v}(t) dt; \quad (3.21)$$

и скорость $v(t)$ – интеграл от ускорения $\vec{a}(t)$ по t :

$$\vec{v}(t) = \int d\vec{v} = \int \vec{a}(t) dt. \quad (3.22)$$

На практике для получения закона движения $\vec{r}(t)$ тела и его скорости $\vec{v}(t)$ в соответствии с приведенными интегральными соотношениями (3.21) и (3.22) широко используют графическое представление модуля скорости $v(t)$ и ускорения $a(t)$ от времени t , при этом значения координатной величины $r(t)$ и скорости $v(t)$ понимаются как площади криволинейных трапеций, образуемых кривыми для модуля скорости $v(t)$ и соответственно ускорения $a(t)$ от времени t .

3.2.2. Кинематика свободного падения тел: основные теоремы

Свободное падение тел у поверхности Земли – красивый пример равноускоренного движения. Направим ось OZ по вертикали вверх, а начало отсчета связем с местом падения тела на поверхность Земли. Координата $z(t)$ от времени t принимает вид:

$$z(t) = z_0 + v_0 t - (1/2)gt^2. \quad (3.23)$$

Здесь Z_0 и v_0 – начальные значения положения и скорости тела ($t=0$), знак скорости $v_0 (+/-)$ и знак $(-)$ ускорения свободного падения \bar{g} соотнесены с положительным направлением оси OZ вверх. Тогда для зависимости скорости $v(t)$ от времени t имеем соотношение вида:

$$v(t) = v_0 - gt, \quad (3.24)$$

и траектория – прямая линия вдоль оси OZ .

Разберем некоторые общие теоремы, относящиеся к свободному падению тел.

Теорема 1. Время подъема тела при броске вверх равно времени его падения.

Доказательство. Время подъема t_1 – промежуток времени для двух событий – броска тела вверх ($t=0$) со скоростью v_0 и остановки на максимальной высоте в момент времени t_1 , когда скорость тела v_1 обращается в нуль:

$$t_1 = v_0 / g. \quad (3.25)$$

Время полета T тела определяется моментом его возвращения в точку броска на поверхности Земли с нулевой координатой:

$$0 = v_0 T - (1/2)gT^2. \quad (3.26)$$

И соответственно:

$$T = (2v_0 / g) = 2t_1. \quad (3.27)$$

Время спуска t_2 – это разность времен T и t_1 :

$$t_2 = T - t_1 = 2t_1 - t_1 = t_1, \quad (3.28)$$

что и требовалось доказать.

Теорема 2. Скорость тела, брошенного вертикально вверх, при падении его на поверхность Земли численно равна его начальной скорости, но направлена противоположно.

Доказательство. За время полета T по вертикали тело возвращается в точку броска с нулевой координатой и скоростью $v(T)$:

$$0 = v_0 T - (1/2)gT^2; \quad (3.29)$$

$$v(T) = v_0 - gT. \quad (3.30)$$

С помощью выражения (3.29) находим время полета T и, используя (3.30), находим и скорость:

$$v(T) = v_0 - g(2v_0 / g) = v_0 - 2v_0 = -v_0. \quad (3.31)$$

Итак, модуль скорости $v(T)$ тела, брошенного вертикально вверх, при падении на Землю равен модулю скорости тела при броске его вверх v_0 , а знак минус (-) означает, что направление скорости тела при падении на Землю противоположно ее направлению при броске его вверх, что и требовалось доказать

Вопросы

1. Что такое равномерное прямолинейное движение точечного тела?
 2. Что такое скорость равномерного движения точечного тела по прямой линии?
 3. Что такое неравномерное движение тела?
 4. Что такое средняя скорость неравномерного движения тела?
 5. Что такое равноускоренное движение тела?
 6. Что такое равноускоренное движение тела по прямой?
 7. Что такое ускорение тела при равноускоренном движении по прямой?
 8. Что такое мгновенная скорость неравномерного движения тела?
 9. Что такое физическая малость интервалов перемещения и времени?
 10. Что такое касательное ускорение?
 11. Что такое твердое и жидкое тела с позиций механики?
 12. Что такое связи тел? внутренние связи? внешние связи тел?
 13. В чем состоит принцип суперпозиции движений тела?
 14. Как пользуются принципом суперпозиции движений тела?
- Задачи 3.1, 3.2, 3.3.** См. приложение 1.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Часть 1. МЕХАНИКА.	3
1. ВВЕДЕНИЕ	3
1.1. Предмет физики. Измерения в физике. Физический метод познания	3
1.2. Оценка погрешностей измерений	5
1.3. Взаимовлияние физики и техники. Связь физики с другими науками	8
Вопросы	8
2. МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ	9
2.1. Механическое движение и его относительность	9
2.2. Способы описания положения тел в мире	10
Вопросы	12
3. КИНЕМАТИКА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ	13
3.1. Элементы кинематики материальной точки	13
3.1.1. Равномерное движение по прямой. Скорость тела и закон движения	13
3.1.2. Неравномерное движение. Средняя скорость	14
3.1.3. Равноускоренное прямолинейное движение. Касательное ускорение. Закон изменения скорости и пути	15
3.2. Сложение движений	17
3.2.1. Принцип суперпозиции движения твердого тела	17
3.2.2. Кинематика свободного падения тел. Основные теоремы	18
Вопросы	20
4. КИНЕМАТИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ	21
4.1. Элементы кинематики вращательного движения. Радиус-векторное и траекторное описание положения тела при движении по окружности	21

Оглавление

4.2. Нормальное, касательное и полное ускорение	23
4.3. Сложное движение твердого тела	26
4.4. Качение без проскальзывания	27
Вопросы	27
5. ЗАКОНЫ НЬЮТОНА И СИЛЫ В ПРИРОДЕ	28
5.1. Законы Ньютона. Понятия силы, массы, импульса	28
5.2. Фундаментальные силы, силы связи и закон Гука, силы трения.	31
5.3. Международная система единиц СИ и система СГС	35
Вопросы	35
6. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА	36
6.1. Силы внутренние и внешние. Центр масс (центр инерции) системы тел	36
6.1.1. Силы внутренние и внешние	36
6.1.2. Центр масс (центр инерции) механической системы	37
6.1.3. Центр тяжести системы тел. Равновесие тел и момент сил.	38
6.2. Закон движения центра масс механической системы	39
6.3. Закон сохранения импульса механической системы	40
6.4. Реактивное движение	41
Вопросы	44
7. ЭНЕРГЕТИКА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ	45
7.1. Механическая работа. Работа переменной силы	45
7.2. Энергия как универсальная мера различных форм движения	47
7.3. Механическая энергия. Кинетическая и потенциальная энергия тел	48
7.4. Поле как форма материи.	50
7.5. Закон сохранения механической энергии системы тел	52
7.6. Упругие и неупругие столкновения.	54
Вопросы	54
8. ДИНАМИКА ВРАЩЕНИЯ ТОЧЕЧНОГО ТЕЛА	55
8.1. Динамика вращения точечного тела	55

8.2. Космические скорости тел.	56
8.3. Закон сохранения момента импульса в поле тяготения	57
Вопросы	58
9. ДИНАМИКА И ЭНЕРГЕТИКА ВРАЩЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ.	59
9.1. Второй закон Ньютона вращения твердых тел.	59
9.2. Момент инерции. Теорема Гюйгенса-Штейнера.	62
9.3. Кинетическая энергия вращающегося тела. Теорема Кёнига.	64
9.4. Гироскоп, его свойства.	66
Вопросы	70
10. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ	70
10.1. Гармонические колебания и их характеристики	70
10.2. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний.	73
10.3. Осцилляторы и маятники.	74
10.4. Энергия гармонических осцилляторов	77
Вопросы	77
11. ЗАТУХАЮЩИЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ.	78
11.1. Затухающие колебания и их характеристики	78
11.2. Вынужденные колебания и их характеристики	82
11.3. Резонанс	84
Вопросы	86
Часть 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА.	88
12. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО- КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ВЕЩЕСТВА	88
12.1. Основные положения молекулярно-кинетической теории.	88
12.2. Основное уравнение идеального газа. Средняя кинетическая энергия молекул идеального газа	91
12.3. Закон распределения энергии молекул по степеням свободы	95
Вопросы	97

Оглавление

13. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЛЕКУЛ ГАЗА	97
13.1. Закон распределения Максвелла	
молекул газа по скоростям	97
13.2. Барометрическая формула	102
13.3. Распределение Больцмана для частиц во внешнем силовом поле	103
Вопросы	104
14. ТЕРМОДИНАМИКА КАК НАУЧНЫЙ МЕТОД. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ	105
14.1. Термодинамический метод, уравнение состояния системы	105
14.2. Равновесные состояния и их изображения на диаграммах	106
14.3. Первое начало термодинамики	107
14.4. Теория теплоемкостей идеальных газов	110
14.5. Адиабатный процесс	112
Вопросы	113
15. ТЕОРЕМА КАРНО. ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ. ЭНТРОПИЯ	114
15.1. Обратимые и необратимые процессы	114
15.2. Круговой процесс. Цикл Карно. Теорема Карно и КПД машин	115
15.3. Второе начало термодинамики	118
15.4. Энтропия	119
15.5. Статистическое толкование второго начала термодинамики	121
Вопросы	123
16. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ. ПАРЫ. ВЛАЖНОСТЬ . .	123
16.1. Агрегатные состояния вещества	123
16.2. Понятие о фазах неоднородных термодинамических систем	125
16.3. Общая картина фазовых превращений в МКТ	126
16.4. Испарение тел. Пары. Влажность	127
16.5. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса	128
Вопросы	130

Часть 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ	132
17. ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ	132
17.1. Два рода электрических зарядов	132
17.2. Закон сохранения электрических зарядов	133
17.3. Электрическое поле, напряженность, потенциал	135
17.4. Принцип суперпозиции полей	137
17.5. Закон Кулона для вакуума	139
17.6. Теорема Гаусса и ее применение	140
17.7. Теорема о циркуляции вектора напряженности электрического поля	142
Вопросы	143
18. ПРОВОДНИК В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ	144
18.1. Проводник в электрическом поле.	144
18.2. Конденсаторы и электроемкость	147
18.3. Энергия и давление электростатического поля	150
18.4. Понятие о сторонних силах в электростатических полях	151
18.5. Расчет электрических цепей с конденсаторами и правила Кирхгофа.	153
Вопросы	154
19. ДИЭЛЕКТРИКИ	155
19.1. Электрические диполи в диэлектриках.	155
19.2. Вектор поляризации диэлектрика.	157
19.3. Теорема Гаусса для диэлектрика	160
19.4. Закон Кулона для диэлектрика	161
19.5. Границные условия для электрических векторов \bar{D} и \bar{E} . .	163
19.6. Энергия и давление электрического поля в диэлектриках	163
Вопросы	165
20. ПОСТОЯННЫЙ ТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ	166
20.1. Сила тока электрических зарядов.	166
20.2. Плотность тока электрических зарядов	169
20.3. Уравнение непрерывности тока электрических зарядов .	171
20.4. Условия поддержания стационарного тока зарядов	173
20.5. Электродвижущие силы источников сторонних сил	174

Оглавление

20.6. Электрические цепи и их элементы	175
Вопросы	178
21. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА	179
21.1. Интегральный закон Ома для однородного участка цепи.	179
21.2. Электросопротивление проводников тока	181
21.3. Последовательное и параллельное соединение проводников.	183
21.4. Закон Джоуля-Ленца для участка цепи в интегральной форме	184
21.5. Закон Ома для замкнутого одиночного контура	186
21.6. Закон Ома и закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме	187
21.7. Закон Ома для неоднородного участка цепи.	188
21.8. Правила Кирхгофа для разветвленной электрической цепи.	190
Вопросы	192
22. МАГНЕТИЗМ	193
22.1. Общие сведения о магнетизме	193
22.2. Опыт Х. Эрстеда о магнитном действии тока зарядов	196
22.3. Закон Ампера для силы действия магнитного поля на ток	197
22.4. Момент сил для витка с током в магнитном поле	199
22.5. Закон Ампера о силах взаимодействия линейных проводников с током	201
22.6. Магнитное поле тока линейного проводника	202
22.7. Сила Лоренца	203
Вопросы	204
23. МАГНЕТИЗМ ТОКОВ ПРОВОДИМОСТИ И ВЕЩЕСТВА	205
23.1. Закон Био-Савара-Лапласа и его применения к расчету полей	205
23.2. Теорема о циркуляции вектора индукции магнитного поля	209
23.3. Магнитный поток и теорема Гаусса для магнитного поля	210

23.4. Работа магнитного поля над проводником с током	211
23.5. Магнитное поле в веществе	213
23.6. Граничные условия для магнитных векторов \vec{B} и \vec{H}	216
23.7. Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость	216
Вопросы	218
24. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ	219
24.1. Явление электромагнитной индукции	219
24.2. Закон Фарадея	219
24.3. Правило Ленца и закон Фарадея-Ленца	220
24.4. Электромагнитная индукция – следствие закона сохранения энергии.	221
24.5. Максвелловская трактовка электромагнитной индукции	222
24.6. Вихревые токи Фуко.	223
24.7. Явление самоиндукции и индуктивность	224
24.8. Установление тока в цепи при ее замыкании и размыкании	224
24.9. Индуктивность длинного соленоида	226
24.10. Энергия и давление магнитного поля	226
24.11. Явление взаимной индукции и взаимная индуктивность.	227
24.12. Электромагнитная индукция в промышленной энергетике	228
Вопросы	230
25. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ	231
25.1. Свободные незатухающие электрические колебания	231
25.2. Свободные затухающие электрические колебания	234
25.3. Вынужденные электрические колебания.	236
25.4. Резонанс вынужденных электрических колебаний	238
25.5. Энергетика в цепи переменного тока.	239
Вопросы	242
Часть 4. ВОЛНЫ: СВЕТ И ЗВУК	244
26. КИНЕМАТИКА ВОЛН	244
26.1. Понятие о волнах	244
26.2. Поперечные и продольные волны	246

Оглавление

26.3. Поляризация волн	247
26.4. Уравнение бегущей волны	248
Вопросы	252
27. ДИНАМИКА И ЭНЕРГЕТИКА ВОЛН	253
27.1. Фазовая скорость упругих волн.	253
27.2. Волновое уравнение бегущих плоских упругих волн	256
27.3. Система уравнений Максвелла	257
27.4. Волновое уравнение плоских электромагнитных волн	258
27.5. Волновая функция плоской бегущей электромагнитной волны с линейной поляризацией в изотропной среде	260
27.6. Волновая функция плоской бегущей гармонической электромагнитной волны с линейной поляризацией	261
27.7. Энергия и поток энергии в упругой волне	263
27.8. Энергия и поток энергии в электромагнитной волне	264
Вопросы	265
28. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН. ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ВОЛН	266
28.1. Источники волн и их общая характеристика.	266
28.2. Интерференция волн как проявление принципа суперпозиции волн. Принцип Гюйгенса-Френеля	268
28.3. Прямолинейное распространение волн в однородной среде	270
28.4. Отражение и преломление волн на границе раздела сред	270
28.5. Полное отражение волн	272
28.6. Основное уравнение двулучевой интерференции	273
28.7. Контрастность или видность интерференционной картины	276
Вопросы	276
29. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА	277
29.1. Понятие об оптике – науке о свете	277
29.2. Геометрическая оптика – база формирования пучков света и изображений	278
29.3. Интерференция световых волн	282
29.4. Расчет интерференционной картины для света	282
29.5. К закону сохранения энергии при интерференции света	284
29.6. Примеры оптических двулучевых интерферометров	285

29.7. Интерференция в тонких пленках	286
29.8. Многолучевая интерференция и просветление оптики . .	288
29.9. О пространственной когерентности при интерференции света.	289
29.10. О влиянии на интерференцию немоно- хроматичности света	290
Вопросы	291
30. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА	292
30.1. Понятие о дифракции света	292
30.2. К природе явления дифракции	293
30.3. Принцип Гюйгенса-Френеля	294
30.4. Метод зон Френеля	296
30.5. Векторная диаграмма в методе зон Френеля.	300
30.6. Дифракция на круглом отверстии	301
30.7. Дифракция на круглом диске	302
Вопросы	303
31. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА И СПЕКТРОСКОПИЯ	303
31.1. Понятие о спектрах и спектральном анализе	303
31.2. Дифракция Фраунгофера и дифракция Френеля	305
31.3. Дифракция Фраунгофера на прямоугольной щели . . .	306
31.4. Дифракция Фраунгофера на объективе	308
31.5. Дифракционная решетка	308
31.6. Дифракционная решетка как спектральный прибор . .	311
31.7. Дифракция рентгеновских лучей	314
31.8. Понятие о голограммах и голографии	314
Вопросы	316
32. ДИСПЕРСИЯ И ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА	316
32.1. Дисперсия света	316
32.2. Поглощение света и закон Бугера	319
32.3. Поляризованный и естественный свет	321
32.4. Закон Малюса	322
32.5. Формулы Френеля и закон Брюстера	323
32.6. Двухлучепреломление света	324
32.7. Получение света с круговой поляризацией	329
32.8. Поляризационные призмы	330
32.9. Вращение плоскости поляризации	331
Вопросы	333

Часть 5. ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ	335
33. КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА	335
33.1. Общее замечание о квантах и квантовой парадигме	335
33.2. О «темных» облаках на «чистом» небе классической физики	338
33.3. Равновесное тепловое излучение тел: опыты, свойства, законы	340
33.4. Квантовая гипотеза М. Планка	342
33.5. Фотоэффект	343
33.6. Законы фотоэффекта.	344
33.7. Фотоэффект и классическая физика	345
33.8. Квантовая теория фотоэффекта А. Эйнштейна	346
33.9. Фотопроводники и фотоэлектронные умножители	347
33.10. Давление света	348
33.11. Эффект Комптона	349
Вопросы	352
34. ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ. СООТНОШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ГЕЙЗЕНБЕРГА. ВОЛНОВОЕ УРАВНЕНИЕ ШРЕДИНГЕРА	353
34.1. Двойственный характер природы света	353
34.2. Гипотеза де Броиля о волнах материи	355
34.3. Физический смысл волновой функции волн де Броиля . .	356
34.4. Дифракция волн де Броиля	358
34.5. Соотношение неопределенностей Гейзенберга	360
34.6. Квантование энергии частиц в потенциальной яме	361
34.7. Понятие о волновом уравнении Шредингера	362
Вопросы	364
35. НАЧАЛА АТОМНОЙ ФИЗИКИ	365
35.1. Дискретные спектры испускания и поглощения газов .	365
35.2. Спектральные закономерности дискретных спектров водорода	367
35.3. Модель атома Томсона	367
35.4. Ядерная (планетарная) модель атома Резерфорда	368
35.5. Атом водорода по Бору: постулаты Бора, квантование .	370
35.6. Линейчатые спектры в модели атома водорода	372
Вопросы	373

36. ПОНЯТИЕ ОБ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ГЕНЕРАТОРАХ	374
36.1. Спонтанное и вынужденное излучение атомов	374
36.2. Теория индуцированного излучения А. Эйнштейна.	376
36.3. Изобретение мазеров и лазеров	378
Вопросы	381
37. НАЧАЛА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ	382
37.1. Открытие радиоактивности	382
37.2. Сложный состав радиоактивного излучения.	384
37.3. Основной закон радиоактивности	385
37.4. Нуклонная – протонно-нейтронная – модель ядер атомов	386
37.5. Ядерные реакции и законы сохранения	388
37.6. Сечение ядерных реакций	390
37.7. Массы ядер атомов и дефект массы ядер.	390
37.8. Субатомные частицы и теория夸рков	393
Вопросы	395
<i>Приложение 1:</i>	
Тексты к задачам	397
Ответы к задачам	417
<i>Приложение 2:</i> Таблицы некоторых физических констант . . .	419