

Министерство путей сообщения Российской Федерации
Дальневосточный государственный университет путей сообщения

В.Б. ГОРОХОВСКИЙ

ФИЗИКА

Учебно-методическое пособие и
контрольные задания для студентов ИДО

Хабаровск
Издательство ДВГУПС
2002

УДК 53(075.8)

ББК В23

Г 703

Рецензент:

Профессор кафедры "Физика" Дальневосточного
государственного университета путей сообщения,
кандидат физико-математических наук

Д.С. Фалеев

Гороховский В.Б.

Г 703

Физика: Учебно-методическое пособие и контрольные задания
для студентов ИДО – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2002. –
71 с.: ил.

В методических указаниях даны основные формулы, примеры решения задач, контрольные задания и задачи для самостоятельного решения (с ответами), а также справочное приложение.

Указания предназначены для студентов заочной формы обучения.

УДК 53(075.8)

ББК В23

© Издательство Дальневосточного государственного
университета путей сообщения (ДВГУПС), 2002

ВВЕДЕНИЕ

Физика – наука о природе: о строении, свойствах и взаимодействии составляющих ее материальных тел и полей. Главная цель этой науки – выявить и объяснить законы природы, которые определяют все физические явления. Физика основывается на экспериментально установленных фактах. Занимая центральное место среди других наук, в объяснении законов природы, она имеет первостепенное значение в формировании научного материалистического мировоззрения.

Основные задачи курса физики в вузах:

1. Создание основ теоретической подготовки в области физики, позволяющей будущим инженерам ориентироваться в потоке научной и технической информации и обеспечивающей возможность использования новых физических принципов в тех областях техники, в которых они специализируются.

2. Формирование научного мышления, в частности, правильного понимания границ применимости различных физических понятий, законов, теорий и умения оценивать степень достоверности результатов, полученных с помощью экспериментальных или математических методов исследования.

3. Усвоение основных физических явлений и законов классической и современной физики, методов физического исследования.

4. Выработка приемов и навыков решения конкретных задач из разных областей физики, помогающих в дальнейшем решать инженерные задачи.

5. Ознакомление с современной научной аппаратурой и электронно-вычислительной техникой, выработка у студентов начальных навыков проведения экспериментальных исследований различных физических явлений с применением ЭВМ и оценки погрешностей измерений.

Цель методических указаний – оказать помощь студентам-заочникам технических специальностей высших учебных заведений в изучении курса физики.

Вопросы и задачи охватывают все разделы программы. Они разбиты на пять частей.

1. Механика (кинематика, основы динамики, законы сохранения в механике).

2. Молекулярная физика (жидкости и газы, основы молекулярно-кинетической теории, тепловые явления).

3. Электродинамика (электростатика, законы постоянного тока, магнитное поле, электромагнитная индукция).

4. Колебания и волны.

5. Оптика. Квантовая физика (световые кванты, атом и атомное ядро).

В качестве примера приводим содержание одного экзаменационного билета.

ПРОГРАММА ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ В ВЫСШЕМ УЧЕБНОМ ЗАВЕДЕНИИ

1. МЕХАНИКА

1.1. Кинематика

Механическое движение. Относительность движения. Система отсчёта. Материальная точка. Траектория. Путь и перемещение. Мгновенная скорость. Ускорение. Равномерное и равноускоренное прямолинейное движение. Сложение скоростей.

Графики зависимости кинематических величин от времени в равномерном и равноускоренном движении. Уравнение прямолинейного равноускоренного движения.

Свободное падение тел. Ускорение свободного падения.

Равномерное движение по окружности. Ускорение при равномерном движении тела по окружности (центростремительное ускорение).

1.2. Основы динамики

Инерция. Первый закон Ньютона, инерциальные системы отсчета. Принцип относительности Галилея.

Масса. Импульс. Сила. Второй закон Ньютона. Принцип суперпозиции сил. Центр тяжести.

Третий закон Ньютона.

Момент силы. Условия равновесия тел.

Силы упругости. Закон Гука. Силы трения, коэффициент трения скольжения. Закон трения. Гравитационные силы. Закон всемирного тяготения. Сила тяжести. Вес тела. Движение тела под действием силы тяжести. Движение искусственных спутников. Невесомость. Первая космическая скорость.

1.3. Законы сохранения в механике

Импульс тела. Закон сохранения импульса. Реактивное движение. Значение работ К.Э. Циолковского для космонавтики.

Механическая работа. Мощность. Кинетическая и потенциальная энергия.

Закон сохранения энергии в механике.

Простые механизмы. КПД механизма.

2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

2.1. Жидкости и газы

Давление. Закон Паскаля для жидкостей и газов. Сообщающиеся сосуды. Принцип устройства гидравлического пресса. Атмосферное давление. Изменение атмосферного давления с высотой. Архимедова сила для жидкостей и газов. Условия плавания тел на поверхности воды.

Зависимость давления жидкости от скорости ее течения.

Движение жидкости по трубам.

2.2. Основы молекулярно-кинетической теории

Опытное обоснование основных положений теории.

Масса и размер молекул. Постоянная Авогадро. Броуновское движение.

Идеальный газ. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа. Температура и её измерение. Абсолютная температурная шкала. Скорость молекул газа.

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона).

Универсальная газовая постоянная. Изотермический, изохорный и изобарный процессы.

2.3. Основы термодинамики

Внутренняя энергия. Количество теплоты. Удельная теплоемкость вещества. Работа в термодинамике. Закон сохранения энергии в тепловых процессах (первый закон термодинамики). Применение первого закона термодинамики к изопроцессам. Адиабатный процесс. Необратимость тепловых процессов.

Второй закон термодинамики и его статистический смысл.

Принцип действия тепловых двигателей. КПД теплового двигателя и его максимальное значение. Тепловые двигатели и охрана природы.

Испарение и конденсация. Насыщенные и ненасыщенные пары. Зависимость температуры кипения жидкости от давления. Влажность воздуха.

Кристаллические и аморфные тела. Механические свойства твердых тел. Упругие деформации. Преобразование энергии при изменениях агрегатного состояния вещества.

3. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

3.1. Электростатика

Взаимодействие заряженных тел. Закон Кулона. Закон сохранения электрического заряда.

Электрическое поле. Напряжённость электрического поля. Электрическое поле точечного заряда. Проводники в электрическом поле.

Диэлектрики в электрическом поле. Диэлектрическая проницаемость.

Работа электростатического поля при перемещении заряда. Разность потенциалов. Принцип суперпозиции полей.

Электроёмкость. Конденсаторы. Емкость плоского конденсатора.

Энергия электрического поля плоского конденсатора.

3.2. Законы постоянного тока

Электрический ток. Сила тока. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление проводников. Последовательное и параллельное соединение проводников. Электродвижущая сила. Закон Ома для полной цепи. Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца.

Электронная проводимость металлов. Сверхпроводимость. Электрический ток в растворах и расплавах электролитов. Закон электролиза. Электрический ток в газах. Самостоятельный и несамостоятельный разряды. Понятие о плазме. Ток в вакууме. Электронная эмиссия. Диод. Электронно-лучевая трубка.

Полупроводники. Электропроводимость полупроводников и ее зависимость от температуры. Собственная и примесная проводимость полупроводников. Полупроводниковый диод (p – n – переход).

3.3. Магнитное поле. Электромагнитная индукция

Магнитное взаимодействие токов. Магнитное поле. Индукция магнитного поля. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле. Закон Ампера.

Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца.

Магнитные свойства вещества. Магнитная проницаемость. Ферромагнетизм.

Электромагнитная индукция. Магнитный поток. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца. Вихревое электрическое поле. Явление самоиндукции. Индуктивность. Энергия магнитного поля.

4. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

4.1. Механические колебания и волны

Гармонические колебания. Амплитуда, период и частота колебаний. Свободные колебания. Математический маятник. Период колебаний математического маятника. Колебания груза на пружине.

Преобразование энергии при гармонических колебаниях. Вынужденные колебания. Резонанс. Понятия об автоколебаниях.

Распространение колебаний в упругих средах. Поперечные и продольные волны. Длина волны. Связь длины волны со скоростью ее распространения. Уравнение гармонической волны. Звуковые волны. Скорость звука. Громкость звука и высота тона.

4.2. Электромагнитные колебания и волны

Свободные электромагнитные колебания в контуре. Собственная частота колебаний в контуре. Превращение энергии в колебательном контуре.

Вынужденные электрические колебания. Переменный электрический ток. Генератор переменного тока. Действующие значения силы тока и напряжения. Активное, емкостное и индуктивное сопротивление. Производство, передача и потребление электрической энергии. Резонанс в электрической цепи. Трансформатор.

Идеи теории Максвелла.

Электромагнитные волны. Скорость их распространения. Свойства электромагнитных волн. Излучение и приём электромагнитных волн. Принципы радиосвязи. Изобретение радио А.С. Поповым.

Шкала электромагнитных волн.

5. ОПТИКА. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

5.1. Оптика

Прямолинейное распространение света. Скорость света. Законы отражения и преломления света. Показатели преломления. Полное отражение. Предельный угол полного отражения. Ход лучей в призме. Линза, фокусное расстояние линзы. Построение изображений в плоском зеркале и линзах. Формула тонкой линзы. Фотоаппарат. Очки. Глаз.

Когерентность. Интерференция света и её применение в технике. Дифракция света. Дифракционная решетка. Дисперсия света. Поляризация света.

5.2. Основы специальной теории относительности

Принцип относительности Эйнштейна. Скорость света в вакууме как предельная скорость передачи сигнала. Связь между массой и энергией.

5.3. Квантовая физика

Тепловое излучение. Постоянная Планка. Фотоэффект и его законы. Кванты света. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Применение фотоэффекта в технике.

5.4. Атом и атомное ядро

Опыт Резерфорда по рассеянию α -частиц. Ядерная модель атома. Квантовые постулаты Бора. Испускание и поглощение света атомом. Непрерывный и линейчатый спектры. Спектральный анализ. Лазер.

Состав ядра атома. Изотопы. Энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции. Радиоактивность. Альфа- и бета-частицы, гамма-излучение.

Методы регистрации ионизирующих излучений.

Деление ядер урана. Ядерный реактор. Термоядерная реакция. Биологическое действие радиоактивных излучений.

В теоретической части и примерах решенных задач обращается внимание на те вопросы, которые наиболее часто вызывают затруднения у абитуриентов и при ответах на которые допускается большое количество ошибок.

1. МЕХАНИКА

Любое явление природы происходит в пространстве и во времени.

Механическим движением называют перемещение тел или их частей друг относительно друга в пространстве с течением времени.

Механикой называют раздел физики, изучающий различные виды механических движений, причины их возникновения и условия относительного покоя.

Механику подразделяют на три части: статику, кинематику и динамику. В статике изучаются условия покоя или равновесия взаимодействующих друг с другом тел. В кинематике рассматриваются механические движения вне зависимости от вызвавших их причин. В динамике исследуются механические движения в связи с вызвавшими их взаимодействиями тел.

Основной задачей механики является определение положения тела (его координат) относительно выбранной системы в любой момент времени.

1.1. Кинематика

Основные кинематические характеристики механического движения: траектория, путь, перемещение, скорость и ускорение.

Траекторией движения называют линию, которую описывает в пространстве движущаяся материальная точка.

Путь – это суммарная длина пройденных телом (материальной точкой) отрезков траектории, т.е. линии, по которой тело двигалось.

Перемещение тела \vec{S} – вектор, соединяющий начальное положение тела с его последующим.

Скорость V характеризует быстроту изменения перемещения, а ускорение a – быстроту изменения скорости.

Скорость и ускорение наряду с перемещением – векторные величины.

Вычисления при решении задач производятся только с проекциями этих векторов на оси координат.

В зависимости от постоянства направления и модуля скорости поступательные движения разделяют на прямолинейные и криволинейные, равномерные и неравномерные (переменные).

Движение материальной точки прямолинейно, если направление ее скорости постоянно, движение криволинейно, если направление скорости изменяется с течением времени.

Движение материальной точки равномерно, если числовое значение ее скорости постоянно; движение переменное, если модуль скорости изменяется с течением времени.

Неравномерное движение характеризуется средней скоростью и мгновенной. Средняя скорость определяется отношением перемещения тела ко времени, за которое это перемещение произошло $V_{cp} = S/t$.

Мгновенная скорость равна пределу, к которому стремится отношение $\Delta S/\Delta t$ при неограниченном убывании промежутка времени Δt , т.е. первая производная перемещения по времени

$$V = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = S'.$$

Зависимость пути от времени для равномерного прямолинейного движения изображается графически прямой линией (рис. 1.1, а). Тангенс угла наклона этой линии равен скорости движения: $V = \operatorname{tg}\alpha = S/t$.

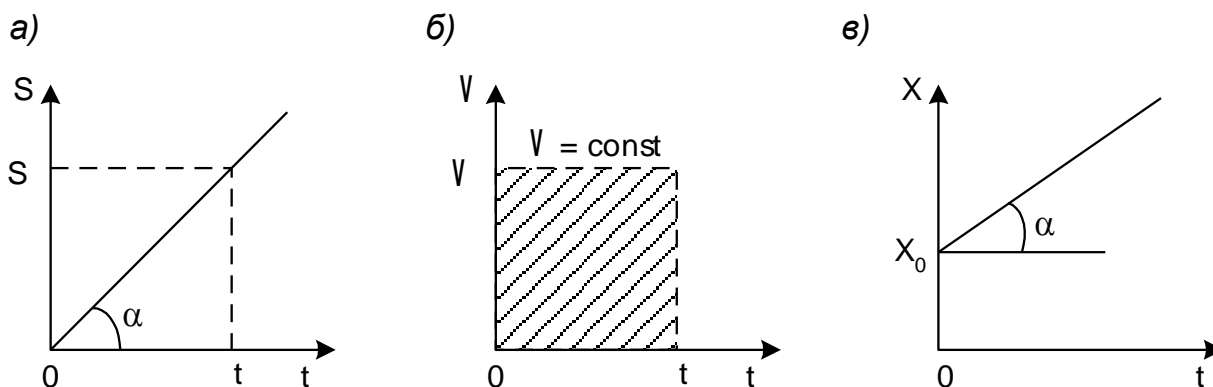


Рис. 1.1. Равномерное движение: а) график пути; б) график скорости; в) графики зависимости координаты тела от времени (график движения)

Графики зависимости пути, скорости и координаты тела от времени равномерного прямолинейного движения представлены на рис. 1.1, а, б, в. Путь, пройденный телом при прямолинейном равномерном движении за время t, равен площади заштрихованного прямоугольника (рис. 1.1, б).

Графиком пути прямолинейного равноускоренного движения является ветвь параболы (рис. 1.2, а).

Зависимость скорости равноускоренного движения от времени изображается прямой линией (рис. 1.2, б).

Ускорение равно тангенсу угла наклона этой линии, а пройденный путь численно равен площади трапеции.

График ускорения равноускоренного, прямолинейного движения – прямая, параллельная оси времени (рис. 1.2, в).

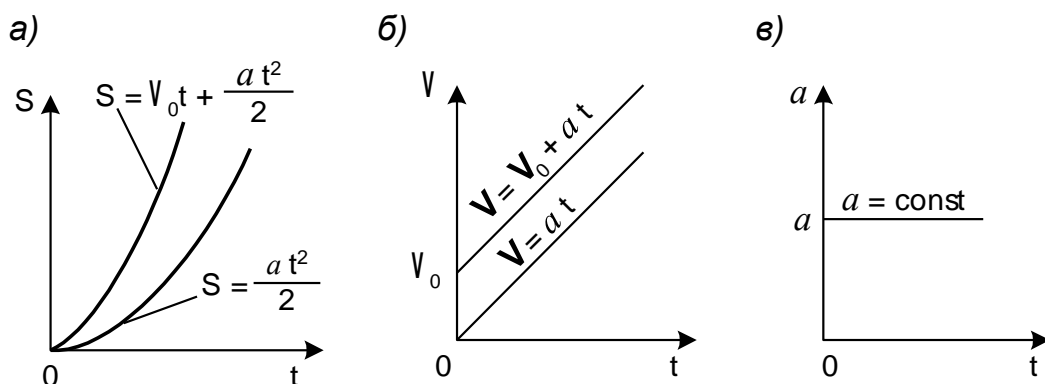


Рис. 1.2. Равноускоренное движение: а) график пути; б) график скорости; в) графики ускорения

Таблица 1.1

Уравнения равномерного и равноускоренного поступательного движения

Равномерное	Равноускоренное	Свободное падение – равноускоренное
$S = V t$ $V = S/t$ $V = \text{const}$ $a = 0$ $X = \pm X_0 \pm S$ $X = \pm X_0 \pm Vt$	$S = V_0 t + at^2/2$ $V = V_0 + at$ $\vec{a} = \text{const}$ $a = \frac{V - V_0}{t}$ $X = \pm X_0 \pm S$ $X = \pm X_0 \pm V_0 t \pm at^2/2$ $V^2 - V_0^2 = 2aS$	Вместо S записывают h , а вместо $a = g = 9,81 \text{ м/с}^2$ $h = V_0 t + gt^2/2$ при $V_0 = 0, h = gt^2/2$ $V = V_0 + gt$ при $V_0 = 0, V = gt$ $V_0 = 0, V^2 = 2gh$

Относительность движения заключается в том, что кинематические характеристики тела относительно различных систем отсчета, движущихся друг относительно друга, различны. Зная перемещение тела \vec{S}' и его скорость \vec{V}' относительно движущейся системы отсчета, можно определить его перемещение \vec{S} и скорость \vec{V} в неподвижной системе отсчета по формулам:

$$\vec{S} = \vec{S}_0 + \vec{S}'; \quad \vec{S}_0 = \vec{V}_0 t \quad \text{и} \quad \vec{V} = \vec{V}_0 + \vec{V}',$$

где \vec{V}_0 – скорость движущейся системы отсчёта относительно неподвижной системы отсчета.

Равномерное движение по окружности с постоянной по модулю скоростью есть движение с ускорением. Ускорение связано с изменением

направления вектора скорости. Направлено оно в любой точке окружности по радиусу к центру и называется центростремительным ускорением. Его модуль равен $a_{ц.с.} = V^2/R$.

1.2. Основы динамики

Масса тела характеризует инерционные свойства тела, является мерой его инерции.

Сила характеризует степень воздействия на данное тело других тел, является мерой взаимодействия тел.

Причиной изменения скорости движения тела является действие на него других тел, т.е. действие силы.

Второй закон Ньютона может быть записан в двух видах:

1) $\vec{F} = m\vec{a}$, где $\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$ – равнодействующая всех сил, действующих на тело;

2) $\vec{F} \cdot \Delta t = \Delta(m\vec{V})$.

Во втором случае формулировка 2-го закона Ньютона такова: "Импульс силы равен изменению импульса тела".

Условием равновесия невращающегося тела является равенство нулю геометрической суммы всех сил, приложенных к телу, т.е. $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$.

Тело с закрепленной осью вращения находится в равновесии при условии, если алгебраическая сумма моментов всех сил относительно этой оси равна нулю, т.е. $\sum_{i=1}^n M_i = 0$ (правило моментов).

Силы упругости – это внутренние силы, возникающие вследствие деформации тела (пружины) и действующие между отдельными частями тела. Деформацией называют изменение объема и формы тела под действием внешних сил. Деформацию называют упругой, если она полностью исчезает после прекращения действия деформирующих сил.

Модуль силы упругости пропорционален деформации тела $F_{упр} = -KX$ (закон Гука). K – жесткость, характеризующая материал, из которого сделано деформируемое тело, и первоначальные размеры тела. Знак минус показывает, что сила упругости направлена в сторону, противоположную деформации.

Силами трения называют силы, возникающие между соприкасающимися поверхностями двух тел и направленные по касательным к этим поверхностям, противодействуя их относительному смещению. Обе поверхности испытывают численно равные, но противоположно направленные силы трения. Различают три вида трения: покоя, скольжения и

качения. Сила трения покоя проявляется, когда мы сдвигаем предмет с места. Как максимальная сила трения покоя, так и сила трения скольжения пропорциональны силе нормального давления $F_{\text{тр}} = K \cdot N$, где K – коэффициент трения, зависящий от материала трущихся поверхностей и не зависящий от площади соприкосновения этих тел. Смазка уменьшает коэффициент трения.

Сила тяжести – это одно из проявлений силы всемирного тяготения. Под влиянием силы тяжести все тела падают с одинаковым ускорением $g = G \cdot M/R^2$ относительно поверхности Земли. Поэтому, согласно 2-му закону Ньютона, сила тяжести $\vec{F}_T = m\vec{g}$. Сила тяжести, действующая на тело, не зависит от того, движется с ускорением его опора (подвес) или нет. Вес тела P в отличие от силы тяжести приложен не к самому телу, а к опоре или подвесу. В зависимости от величины ускорения вес тела может быть больше силы тяжести, меньше её и даже равен нулю (в состоянии невесомости). Тело находится в состоянии невесомости, если оно движется только под действием силы тяжести с ускорением свободного падения $a = g$. Увеличение веса тела при ускоренном движении называется перегрузкой.

Движение спутника вокруг Земли происходит под действием силы тяготения $F = G \cdot mM / (R_3 + h)^2$, сообщающей ему центростремительное ускорение $a_{\text{ц.с.}} = V^2/(R_3 + h)$.

Первая космическая скорость определяется по формуле $V_1 = \sqrt{gR_3}$.

1.3. Законы сохранения в механике

Направление импульса тела $\vec{P} = m\vec{V}$ совпадает с направлением скорости. Закон сохранения импульса формулируется так: "Геометрическая сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, остается постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой", т.е. $\sum_{i=1}^n m_i \vec{V}_i = \text{const}$. Этот закон выполняется в проекциях импульса на оси координат (именно в такой форме закон используется при решении задач).

Механическая работа любой силы (упругости, трения, тяжести или равнодействующей их), приложенной к телу, равна изменению кинетической энергии тела $A = E_{k2} - E_{k1}$ – это теорема о кинетической энергии.

Кинетическая энергия $E_k = mV^2/2$ – это энергия движущегося тела. Она равна работе, которую должна совершить сила, действующая на тело, для сообщения ему скорости V . Силы тяжести и силы упругости

принадлежат к особой категории сил, отличающихся тем, что работа этих сил не зависит от формы пути, а зависит только от начального и конечного положений тела.

Потенциальная энергия – это энергия взаимодействия. Она зависит от положения тела относительно нулевого уровня. Энергия поднятого над Землёй тела равна $E_{\text{п}} = mgh$.

Энергия упруго деформированного тела $E_{\text{п}} = KX^2/2$, где X – величина деформации.

При работе силы тяжести (упругости) изменение потенциальной энергии равно изменению кинетической энергии, но с противоположным знаком, т.е. $\Delta E_{\text{п}} = -\Delta E_{\text{к}}$.

Значит сумма кинетической и потенциальной энергии в замкнутой системе постоянна – это закон превращения и сохранения механической энергии

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \text{const.}$$

Работа силы трения зависит от траектории движения тела. Она уменьшает механическую энергию тела, превращая её во внутреннюю энергию как самого тела, так и окружающих его тел в соответствии с общим законом сохранения и превращения энергии в природе.

1.4. Примеры решения задач

1.4.1. Первую половину пути тело двигалось со скоростью $V_1 = 2$ м/с, вторую половину пути со скоростью $V_2 = 8$ м/с. Определить среднюю скорость движения.

<p>Д а н о:</p> <p>$V_1 = 2$ м/с;</p> <p>$V_2 = 8$ м/с;</p> <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black;"/> <p>$V_{\text{ср}} = ?$</p>	<p>Р е ш е н и е. Поскольку тело двигалось прямолинейно в одном направлении, то путь равен модулю перемещения, поэтому</p> $V_{\text{ср}} = S/t, \tag{1}$
---	---

где S – модуль полного перемещения тела; t – полное время движения.

$S = S_1 + S_2$; $t = t_1 + t_2$, где S_1, S_2 и t_1, t_2 – соответственно модули перемещений и время на двух участках движения. Считаем, что на каждом участке тело двигалось равномерно, поэтому

$$t_1 = \frac{S_1}{V_1} = \frac{S}{2V_1}; \quad t_2 = \frac{S_2}{V_2} = \frac{S}{2V_2}, \quad \text{тогда} \quad t = \frac{S}{2V_1} + \frac{S}{2V_2}. \tag{2}$$

Подставим выражение (2) в формулу (1), получим

$$V_{\text{cp}} = \frac{S}{S/2V_1 + S/2V_2} = \frac{2V_1 V_2}{V_1 + V_2}.$$

Проверим размерность:

$$[V] = \frac{\text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{с} \cdot \text{с} \cdot \text{м}} = \text{м/с}.$$

Подставим числовые значения:

$$V_{\text{cp}} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 8}{2 + 8} = 3,2 \text{ м/с}.$$

Ответ: $V_{\text{cp}} = 3,2 \text{ м/с}$.

1.4.2. Лодка движется от одного берега к другому берегу со скоростью (относительно воды, перпендикулярно к берегу), равной 7,2 км/ч. Течение реки относит ее на 150 м вниз по реке. Ширина реки 0,5 км (рис. 1.3).

Определить: 1) скорость течения реки; 2) время, затраченное на переезд через реку; 3) время, необходимое, чтобы проехать расстояние в 2 км вниз по течению и обратно; скорость лодки относительно воды – 7,2 км/ч.

Д а н о:

$$U = 7,2 \text{ км/ч} = \frac{7,2 \cdot 10^3}{3,6 \cdot 10^3} = 2 \text{ м/с};$$

$$S = 150 \text{ м};$$

$$\ell = 0,5 \text{ км} = 500 \text{ м};$$

$$S_0 = 2 \text{ км} = 2 \cdot 10^3 \text{ м}$$

$$V = ?, t = ?, t' = t_1 + t_2 = ?$$

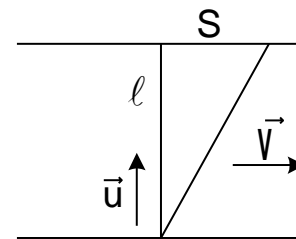


Рис. 1.3

Р е ш е н и е. Лодка одновременно участвует в двух движениях.

1. Лодка движется равномерно со скоростью \bar{U} относительно воды перпендикулярно берегу. Время движения лодки в этом направлении найдём по формуле

$$t = \ell / U. \quad (1)$$

2. Лодка движется равномерно по течению реки. Обозначим скорость течения реки – V . Время движения в этом направлении рассчитаем по формуле

$$t = S / V . \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) имеем: $l/U = S/ V$, откуда

$$V = \frac{US}{l}, \quad V = \frac{2 \cdot 150}{500} = 0,6 \text{ м/с.}$$

Время, затраченное на переезд, можно определить из любой формулы (1) или (2)

$$t = \frac{500}{2} = 250 \text{ с} \quad \text{или} \quad t = \frac{150}{0,6} = 250 \text{ с.}$$

Если лодка движется вниз по течению реки, то скорость лодки \vec{U} относительно воды и скорость течения реки $-\vec{V}$ направлены в одну сторону; когда же лодка движется против течения реки, скорости \vec{U} и \vec{V} направлены в противоположные стороны. Следовательно, путь $S_0 = 2$ км, пройденный лодкой по течению реки и в обратном направлении, будет равен:

$$S_0 = (U + V) t_1, \quad \text{откуда} \quad t_1 = \frac{S_0}{U + V};$$

$$S_0 = (U - V) t_2, \quad t_2 = \frac{S_0}{U - V}.$$

Время движения лодки для прохождения пути S_0 туда и обратно по реке будет равно:

$$t' = t_1 + t_2 = \frac{S_0}{U + V} + \frac{S_0}{U - V} = S_0 \left(\frac{U - V + U + V}{U^2 - V^2} \right) = \frac{2U \cdot S_0}{U^2 - V^2}.$$

$$t' = \frac{2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^3}{2^2 - (0,6)^2} = 2197 \text{ с} = 36,6 \text{ мин.}$$

Ответ: $V = 0,6$ м/с; $t = 250$ с; $t' = 36,6$ мин.

1.4.3. Два автомобиля движутся навстречу друг другу: один с начальной скоростью 54 км/ч и ускорением $-0,5$ м/с², а другой – с начальной скоростью 36 км/ч и ускорением $0,5$ м/с². Через какое время встретятся автомобили и какое перемещение совершит каждый из них до встречи, если начальное расстояние между автомобилями 250 м.

Д а н о:

$$V_{01} = 54 \text{ км/ч} = 15 \text{ м/с};$$

$$a_1 = -0,5 \text{ м/с}^2;$$

$$V_{02} = 36 \text{ км/ч} = 10 \text{ м/с};$$

$$a_2 = 0,5 \text{ м/с}^2;$$

$$X_{02} = 250 \text{ м}$$

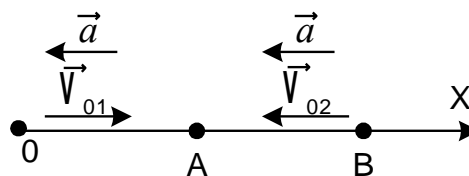


Рис. 1.4

$$t = ?; S_1 = ?; S_2 = ?$$

Р е ш е н и е. Пусть ось x совпадает с направлением движения первого автомобиля, а начало координат – с точкой O , в которой находился первый автомобиль в момент времени $t = 0$ (рис. 1.4), второй автомобиль в этот момент времени находился в точке B . Тогда уравнения движения автомобилей имеют вид:

$$X_1 = V_{01} \cdot t - \frac{a_1 t^2}{2} \quad (X_{01} = 0), \quad X_2 = X_{02} - V_{02} \cdot t - \frac{a_2 t^2}{2}.$$

В момент встречи в точке A

$$X_1 = X_2. \quad (1)$$

Подставляя выражения для X_1 и X_2 в уравнение (1), получим

$$V_{01} \cdot t - \frac{a_1 t^2}{2} = X_{02} - V_{02} \cdot t - \frac{a_2 t^2}{2}, \text{ так как } a_1 = a_2, \text{ то}$$

$$V_{01} \cdot t = X_{02} - V_{02} \cdot t \quad \text{или} \quad (V_{01} + V_{02}) \cdot t = X_{02},$$

откуда
$$t = \frac{X_{02}}{V_{01} + V_{02}}; \quad t = \frac{250}{15 + 10} \text{ с} = 10 \text{ с}.$$

$$S_1 = X_1 - X_{01} = V_{01} t - \frac{a_1 t^2}{2}; \quad S_1 = 15 \cdot 10 - \frac{0,5 \cdot 10^2}{2} = 125 \text{ м};$$

$$S_2 = X_2 - X_{02} = V_{02} t + \frac{a_2 t^2}{2}; \quad S_2 = 10 \cdot 10 + \frac{0,5 \cdot 10^2}{2} = 125 \text{ м}.$$

Ответ: $t = 10 \text{ с}; S_1 = 125 \text{ м}; S_2 = 125 \text{ м}.$

1.4.4. Тело брошено вверх со скоростью 20 м/с . Определить время и высоту подъема тела, скорость, с которой тело достигло Земли, и время падения тела.

Д а н о:

$$V_0 = 20 \text{ м/с}$$

Р е ш е н и е. При бросании тела вверх, оно двигается равнозамедленно. Время подъема определим из

$$\begin{array}{l}
 h = ? \quad V = ? \\
 t_1 = ? \quad t_2 = ?
 \end{array}
 \left| \begin{array}{l}
 \text{формулы } V = V_0 - gt_1, \text{ так как в верхней точке подъёма} \\
 V = 0, \text{ то } 0 = V_0 - gt_1, \text{ откуда } t_1 = V_0/g, \quad t_1 = 20/9,8 = 2 \text{ с.}
 \end{array} \right.$$

Высоту подъёма определим по формуле

$$h = V_0 t_1 - \frac{gt_1^2}{2}; \quad h = 20 \cdot 2 - \frac{9,8 \cdot 2^2}{2} = 20,4 \text{ м.}$$

Скорость, с которой тело достигло Земли,

$$V = \sqrt{2gh}; \quad V = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 20,4} = 20 \text{ м/с.}$$

При бросании тела вверх всегда скорость падения равна скорости бросания. Время падения тела определим из формулы

$$h = \frac{g \cdot t_2^2}{2}; \quad \text{откуда } t_2 = \sqrt{\frac{2h}{g}}, \quad t_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot 20,4}{9,8}} = 2 \text{ с.}$$

При бросании тела вверх время падения всегда равно времени подъёма тела вверх.

Ответ: $h = 20,4 \text{ м}; V = 20 \text{ м/с}; t_1 = 2 \text{ с}; t_2 = 2 \text{ с.}$

1.4.5. В последнюю секунду свободно падающее тело прошло половину своего пути. Сколько времени и с какой высоты падало тело?

<p>Д а н о: $h - h_1 = 1/2 h$ $t = ? \quad h = ?$</p>	<p>Р е ш е н и е. Путь, пройденный телом за все время падения</p> $h = gt^2 / 2. \tag{1}$ <p>До последней секунды тело прошло путь</p>
---	--

$$\frac{h}{2} = \frac{g(t-1)^2}{2}, \quad \text{т.е. } h = g(t-1)^2. \tag{2}$$

Приравняв выражения (1) и (2), получим

$$\frac{gt^2}{2} = g(t-1)^2 \quad \text{или} \quad t^2 - 4t + 2 = 0, \quad t = 2 + 1,4 = 3,4 \text{ с.}$$

Высота падения $h = \frac{9,8 \cdot 3,4}{2} = 57 \text{ м.}$

Ответ: $t = 3,4 \text{ с}; h = 57 \text{ м.}$

1.4.6. Камень падает в шахту. Через 6 с слышен удар камня о дно шахты. Определить глубину шахты, если скорость звука 330 м/с.

Д а н о:

$$t = 6 \text{ с};$$

$$V = 330 \text{ м/с}$$

h = ?

Р е ш е н и е. Путь, пройденный камнем при свободном падении, равен

$$h = gt_1^2/2, \quad (1)$$

где t_1 – время падения камня.

Путь, пройденный звуком, $h = V \cdot t_2$, где t_2 – время распространения звука, $t_2 = t - t_1$.

$$\text{Следовательно} \quad h = V(t - t_1). \quad (2)$$

Приравняв формулы (1) и (2), получим $gt_1^2/2 = V(t - t_1)$ или

$$gt_1^2 + 2Vt_1 - 2Vt = 0.$$

$$9,8 t_1^2 + 2 \cdot 330t_1 - 2 \cdot 330 \cdot 6 = 0 \text{ или } t_1^2 + 66t_1 - 396 = 0.$$

$$t_{1,2} = -33 \pm \sqrt{1089 + 396} = -33 \pm 38,54; \quad t_1 = 5,5 \text{ с}.$$

Глубина шахты равна

$$h = \frac{gt_1^2}{2} = \frac{9,8 \cdot 5,5^2}{2} = 148 \text{ м}.$$

Ответ: $h = 148 \text{ м}$.

1.4.7. Скорость поезда в течение 10 с увеличилась от 10 до 15 м/с, далее в течение 18 с он двигался равномерно. Определить перемещение и среднюю скорость поезда. Построить графики скорости и перемещения.

Д а н о:

$$t_1 = 10 \text{ с};$$

$$V_0 = 10 \text{ м/с};$$

$$V = 15 \text{ м/с};$$

$$t_2 = 18 \text{ с}$$

$$V_{\text{cp}} = ?; S = ?$$

Р е ш е н и е. Совместим ось X с направлением движения поезда, а начало оси выберем в точке O , в которой скорость поезда равна V_0 . Рассмотрим движение поезда на двух участках. На первом участке перемещение $S_1 = V_{\text{cp1}} t_1$.

Так как движение на первом участке равноускоренное, то средняя скорость его движения на

этом участке: $V_{\text{cp1}} = (V_0 + V)/2$.

Тогда

$$S_1 = \frac{V_0 + V}{2} t_1. \quad (1)$$

Так как движение поезда на втором участке равномерное, то

$$S_2 = V t_2. \quad (2)$$

Следовательно, полное перемещение поезда $S = S_1 + S_2$

или
$$S = \frac{V_0 + V}{2} t_1 + V t_2, \quad S = \frac{10+15}{2} \cdot 10 + 15 \cdot 18 = 395 \text{ м.}$$

Средняя скорость движения

$$V_{\text{cp}} = S/t,$$

где $t = t_1 + t_2$.

Тогда

$$V_{\text{cp}} = \frac{S}{t_1 + t_2}, \quad V_{\text{cp}} = \frac{395}{10 + 18} = 14,1 \text{ м/с.}$$

Построим графики скорости (рис. 1.5) и перемещения (рис. 1.6), рассматривая каждый участок движения отдельно.

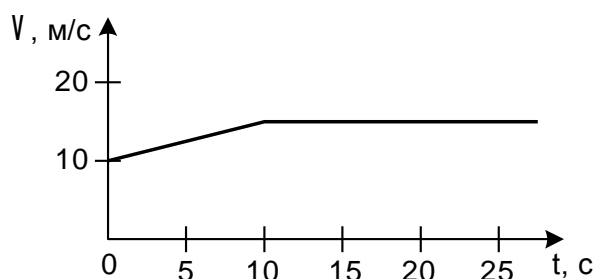


Рис. 1.5

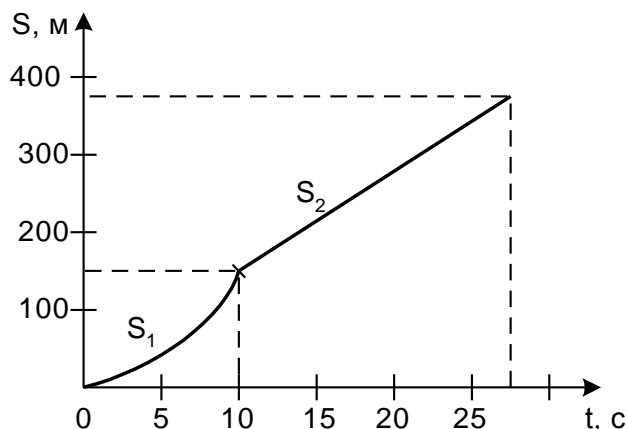


Рис. 1.6

Ответ: $V_{\text{cp}} = 14 \text{ м/с}$; $S = 395 \text{ м}$.

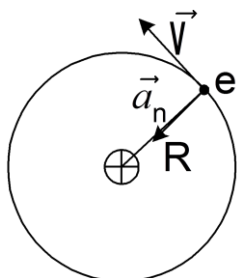


Рис. 1.7

1.4.8. В первом приближении можно считать, что электрон в атоме водорода движется по круговой орбите с постоянной скоростью $2,2 \cdot 10^6 \text{ м/с}$, радиус орбиты электрона $0,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. Найти угловую скорость вращения электрона вокруг ядра и его нормальное ускорение (рис. 1.7).

Дано:

$$V = 2,2 \cdot 10^6 \text{ м/с};$$

$$R = 0,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

$$\omega = ? \quad a_n = ?$$

Решение. Угловая скорость вращения элект-

трона вокруг ядра связана с линейной скоростью соотношением $\omega = V/R$, где R – радиус орбиты электрона.

$$\omega = \frac{2,2 \cdot 10^6 \text{ м/с}}{0,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}} = 4,4 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}.$$

Нормальное или центростремительное ускорение определим по формуле

$$a_n = \frac{V^2}{R}, \quad a_n = \frac{(2,2 \cdot 10^6)^2}{0,5 \cdot 10^{-10}} = \frac{4,84 \cdot 10^{12} \text{ м}^2/\text{с}^2}{0,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}} = 9,68 \cdot 10^{22} \text{ м/с}^2$$

Ответ: $\omega = 4,4 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$; $a_n = 9,68 \cdot 10^{22} \text{ м/с}^2$.

1.4.9. Автомобиль движется по закруглению дороги. Одинаковое ли расстояние проходят его правые и левые колёса?

Р е ш е н и е. Правые и левые колеса проходят различные расстояния, так как их линейные скорости неодинаковы: чем дальше находятся колёса от центра закругления дороги, тем больше их линейная скорость.

1.4.10. Автомобиль массой 1,2 т, имея начальную скорость 36 км/ч, остановился при торможении за 2 с. Определить коэффициент трения колёс о полотно дороги, силу торможения и перемещение автомобиля до остановки.

Д а н о:

$$V_0 = 36 \text{ км/ч} = 10 \text{ м/с};$$

$$t = 2 \text{ с};$$

$$m = 1,2 \text{ т} = 1200 \text{ кг}$$

$$K = ? \quad F_{\text{тр}} = ? \quad S = ?$$

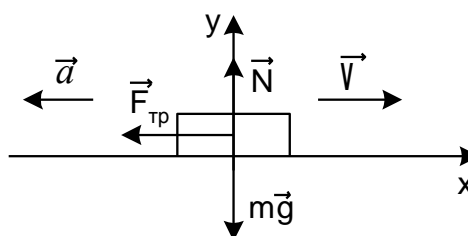


Рис. 1.8

Р е ш е н и е. На автомобиль действуют сила тяжести $m\vec{g}$, сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ и сила нормальной реакции \vec{N} (рис. 1.8). Запишем уравнение второго закона Ньютона в векторной форме:

$$m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N} = m\vec{a}. \quad (1)$$

За положительное направление оси X примем направление движения автомобиля. Так как движение автомобиля равнозамедленное, то вектор ускорения направлен в сторону, противоположную направлению движения. Проецируя обе части уравнения (1) на ось X , получим:

$$-F_{\text{тр}} = -ma \quad \text{или} \quad F_{\text{тр}} = ma. \quad (2)$$

Проецируя уравнение (1) на ось Y , получим:

$$N - mg = 0 \quad \text{или} \quad N = mg. \quad (3)$$

Сила трения равна $F_{\text{тр}} = K N$, но из выражения (3) $N = mg$, тогда

$$F_{\text{тр}} = K mg. \quad (4)$$

Приравняв уравнения (2) и (4), получим: $K mg = ma$, откуда

$$K = a/g, \quad (5)$$

где a – ускорение автомобиля.

Считая движение автомобиля при торможении равнозамедленным, определим ускорение из уравнения $V - V_0 = at$, так как конечная скорость равна нулю $V = 0$, то $a = -V_0/t$. Для вычисления K берем абсолютное значение ускорения. Из выражения (5), имеем $K = a/g = V_0/gt$.

Проверим размерность:

$$[K] = \frac{\text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{с} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}.$$

Подставим численные значения $K = \frac{10}{9,8 \cdot 2} = 0,5$.

Тормозной путь найдем из выражения $V^2 - V_0^2 = 2a S$, но $V = 0$, тогда

$$-V_0^2 = 2a S, \quad \text{так как} \quad a = -V_0/t, \quad \text{то} \quad -V_0^2 = 2\left(-\frac{V_0}{t}\right) S, \quad V_0 = \frac{2S}{t},$$

откуда $S = \frac{V_0 t}{2}$, $S = \frac{10 \cdot 2}{2} = 10 \text{ м}$.

Силу торможения определим из формулы (2)

$$F_{\text{тр}} = ma = m\left(-\frac{V_0}{t}\right), \quad F_{\text{тр}} = -1200 \frac{10}{2} = -6 \cdot 10^3 \text{ Н} = -6 \text{ кН}.$$

Знак минус указывает, что сила торможения направлена в сторону, противоположную скорости.

Ответ: $K = 0,5$; $F_{\text{тр}} = -6 \text{ кН}$; $S = 10 \text{ м}$.

1.4.11. Через неподвижный блок перекинута нить с грузами 3 и 5 кг. С каким ускорением движутся грузы и какова сила натяжения нити?

Д а н о:

$$m_1 = 3 \text{ кг};$$

$$m_2 = 5 \text{ кг}$$

$$a = ? \quad F = ?$$

Р е ш е н и е. Рассмотрим силы, действующие на каждый груз. На каждый груз действуют две силы: сила тяжести и сила натяжения нити (сила упругости). Направим оси Y_1 и Y_2 , как показано на рис. 1.9. Векторные уравнения второго закона Ньютона для первого и второго тела имеют вид:

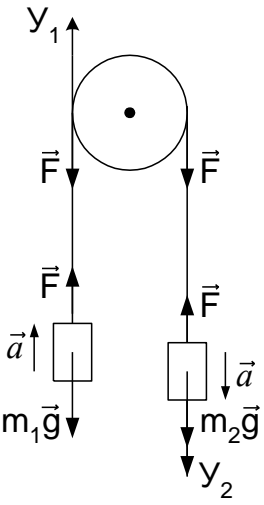


Рис. 1.9

$$\vec{F} + m_1\vec{g} = m_1\vec{a} \quad \text{и} \quad \vec{F} + m_2\vec{g} = m_2\vec{a}.$$

Проецируя эти уравнения на оси Y_1 и Y_2 получим

$$F - m_1g = m_1a \quad \text{и} \quad m_2g - F = m_2a.$$

Решая эти два равенства относительно a и F , получим

$$m_2g - m_1g = m_2a + m_1a, \text{ откуда}$$

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} g, \quad a = \frac{5 - 3}{5 + 3} 9,8 = 2,45 \text{ м/с}^2.$$

$$F = m_1g + m_1a_1 = m_1g + m_1 \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} g = m_1g \left(1 + \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} \right) = \frac{2m_1m_2g}{m_1 + m_2},$$

$$[F] = \frac{\text{кг} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} = \text{Н}, \quad F = \frac{2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 9,8}{3 + 5} = 36,8 \text{ Н}$$

Ответ: $a = 2,45 \text{ м/с}^2$; $F = 36,8 \text{ Н}$.

1.4.12. Деревянный брусок массой 2 кг скользит по горизонтальной поверхности под действием груза массой 0,5 кг, прикрепленного к концу шнура, перекинутого через неподвижный блок. Коэффициент трения бруска о поверхность равен 0,1. Найти ускорение движения тел и силу натяжения шнура.

Д а н о:
 $m_1 = 2 \text{ кг};$
 $m_2 = 0,5 \text{ кг};$
 $K = 0,1$

 $a = ? \quad F = ?$

Р е ш е н и е. Рассмотрим силы, действующие на каждое из тел. На брусок действуют: $m_1\vec{g}$ – сила тяжести; \vec{N} – сила реакции поверхности; \vec{F} – сила натяжения шнура; $\vec{F}_{\text{тр}}$ – сила трения. На груз действуют силы: $m_2\vec{g}$ – сила

тяжести; \vec{F} – сила натяжения шнура (рис. 1.10).

Запишем второй закон Ньютона для движения тел в векторной форме. Для первого тела $m_1\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{F} = m_1\vec{a}$, для второго тела

$$m_2\vec{g} + \vec{F} = m_2\vec{a}.$$

Проецируя эти уравнения на оси X и Y , получим:

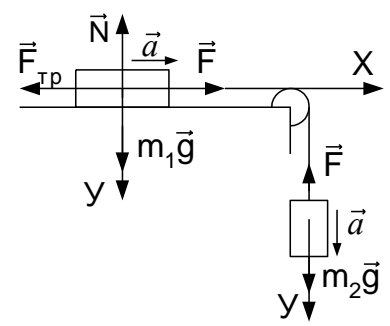


Рис. 1.10

$$F - F_{\text{тр}} = m_1 a; \quad (1)$$

$$m_2 g - F = m_2 a. \quad (2)$$

Сложив почленно, выразим ускорение из выражения

$$m_2 g - F_{\text{тр}} = m_1 a + m_2 a;$$

$$a = \frac{m_2 g - F_{\text{тр}}}{m_1 + m_2}, \text{ но } F_{\text{тр}} = K N = K m_1 g,$$

тогда

$$a = \frac{m_2 g - K m_1 g}{m_1 + m_2} = \frac{g(m_2 - K m_1)}{m_1 + m_2},$$

$$a = \frac{9,8(0,5 - 0,1 \cdot 2)}{2 + 0,5} = 1,2 \text{ м/с}^2.$$

Силу натяжения найдем из уравнения (2):

$$F = m_2 g - m_2 a = m_2 (g - a), \quad F = 0,5(9,8 - 1,2) = 4,3 \text{ Н.}$$

Ответ: $a = 1,2 \text{ м/с}^2$; $F = 4,3 \text{ Н}$.

1.4.13. Бомбардировщик пикирует на цель под углом 60° к горизонту со скоростью 540 км/ч и сбрасывает бомбу на высоте 600 м . На каком расстоянии от цели по горизонтальному направлению надо освободить бомбу, чтобы она попала в цель?

Д а н о:

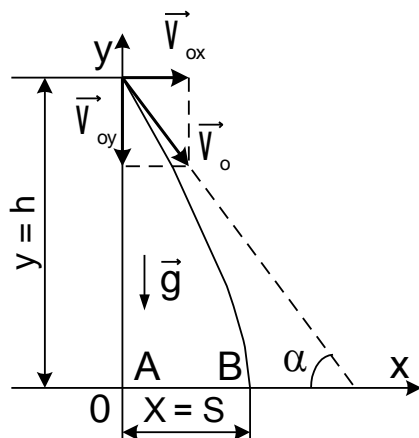
$$V_0 = 540 \text{ км/ч} = 150 \text{ м/с};$$

$$h = 600 \text{ м};$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$S = ?$$

Р е ш е н и е . Выберем систему координат с началом в точке А вылета бомбы. Раскладываем начальную скорость на горизонтальную и вертикальную составляющие (рис. 1.11):



$$V_{ox} = V_0 \cos \alpha; \quad V_{oy} = V_0 \sin \alpha.$$

В горизонтальном направлении бомба движется равномерно со скоростью

$$V_x = V_{ox} = V_0 \cos \alpha.$$

В вертикальном же направлении она совер-

Рис. 1.11

шает равноускоренное движение, мгновенная скорость которого в произвольный момент времени t определяется формулой $V_y = V_{oy} + g t$.

При этом величина пути, проходимого по вертикали, будет определяться соотношением $y = V_{oy} t + g t^2 / 2$.

Полагая $y = h$, а $t = t_1$, где t_1 – время падения бомбы, получим $h = V_{oy} t_1 + g t_1^2 / 2$ или

$$t_1^2 + \frac{2V_{oy}}{g} t_1 - \frac{2h}{g} = 0,$$

отсюда

$$t_1 = -\frac{V_{oy}}{g} \pm \sqrt{\left(\frac{V_{oy}}{g}\right)^2 + 2\frac{h}{g}}.$$

За это время в горизонтальном направлении бомба проходит путь

$$S = X = V_{ox} t_1 = -\frac{V_{ox} V_{oy}}{g} + V_{ox} \sqrt{\left(\frac{V_{oy}}{g}\right)^2 + 2\frac{h}{g}};$$

где $V_{ox} = V_o \cos \alpha = 150 \text{ м/с} \cos 60^\circ = 150 \cdot 0,5 = 75 \text{ м/с};$

$$V_{oy} = 150 \sin 60^\circ = 130 \text{ м.}$$

Подставим численные значения:

$$S = -\frac{130 \cdot 75}{9,8} + 130 \sqrt{\left(\frac{130}{9,8}\right)^2 + 2\frac{600}{9,8}} = 490 \text{ м.}$$

На этом расстоянии от цели по горизонтальному направлению летчик и должен сбросить бомбу, чтобы она поразила цель (точка В, рис. 1.11).

Ответ: $S = 490 \text{ м.}$

1.4.14. Человек, стоя в лодке, тянет к себе с помощью веревки вторую лодку. Определить перемещения лодок за 5 с, если масса первой лодки 200 кг, второй – 100 кг, а сила натяжения веревки 100 Н. Силами трения пренебречь, воду считать покоящейся, а движение лодок равноускоренным.

Д а н о:

$t = 5 \text{ с};$

$m_1 = 200 \text{ кг};$

$m_2 = 100 \text{ кг};$

$F = 100 \text{ Н}$

$S_1 = ?; S_2 = ?$

Р е ш е н и е. Учитывая, что движение лодок равноускоренное и начальные скорости их равны нулю,

перемещения лодок найдем по формулам:

$$S_1 = \frac{a_1 t^2}{2} \text{ и } S_2 = \frac{a_2 t^2}{2},$$

где
$$a_1 = \frac{F}{m_1}; a_2 = \frac{F}{m_2}.$$

Подставив вместо a_1 и a_2 их выражения, получим $S_1 = \frac{Ft^2}{2m_1}, S_2 = \frac{Ft^2}{2m_2}; [S] = \frac{Н \cdot с^2}{кг} = \frac{кг \cdot м \cdot с^2}{кг \cdot с^2} = м;$

$$S_1 = \frac{100 \cdot 5^2}{2 \cdot 200} = 6,25 \text{ м}; S_2 = \frac{100 \cdot 5^2}{2 \cdot 100} = 12,5 \text{ м}.$$

Ответ: $S_1 = 6,25 \text{ м}; S_2 = 12,5 \text{ м}.$

1.4.15. Мальчик догнал тележку, движущуюся со скоростью 3 м/с, и вскочил на неё. Чему равна скорость тележки после того, как на неё вскочил мальчик, если скорость прыжка мальчика 4 м/с, масса мальчика 50 кг, масса тележки 80 кг? Чему равна скорость тележки, если мальчик прыгает навстречу движущейся тележке?

Д а н о:

$$V_1 = 3 \text{ м/с};$$

$$V_2 = 4 \text{ м/с};$$

$$m_1 = 80 \text{ кг};$$

$$m_2 = 50 \text{ кг}$$

$$V = ?$$

Р е ш е н и е. По закону сохранения импульса для замкнутой системы мальчик – тележка, имеем:

$$m_1 V_1 + m_2 V_2 = (m_1 + m_2) V,$$

откуда

$$V = \frac{m_1 V_1 + m_2 V_2}{m_1 + m_2},$$

$$V = \frac{80 \cdot 3 + 50 \cdot 4}{80 + 50} = 3,4 \text{ м/с}.$$

При встречном движении тележки $m_1 V_1 - m_2 V_2 = (m_1 + m_2) V,$

$$V = \frac{m_1 V_1 - m_2 V_2}{m_1 + m_2}, \quad V = \frac{80 \cdot 3 - 50 \cdot 4}{80 + 50} = 0,6 \text{ м/с}.$$

Ответ: $V = 0,6 \text{ м/с}.$

1.4.16. Чему равен вес тела массой 100 кг на высоте 200 км над поверхностью Земли?

Д а н о:
 $m = 100$ кг;
 $h = 200$ км = $2 \cdot 10^5$ м;
 $R = 6,4 \cdot 10^6$ м
 $P = ?$

Р е ш е н и е. Вес тела в инерциальной системе вычисляется по формуле $P = mg$.

Ускорение g на высоте h над поверхностью Земли определим по упрощенной формуле

$$g = G \frac{M}{(R+h)^2},$$

где R – радиус Земли; G – гравитационная постоянная; M – масса Земли. А так как g на поверхности Земли равно

$$g_0 = G \frac{M}{R^2}, \quad \text{то} \quad \frac{g}{g_0} = \frac{R^2}{(R+h)^2}$$

или

$$g = g_0 \frac{R^2}{R^2(1+h/R)^2} \approx \frac{g_0}{1+2h/R}; \quad g = \frac{9,8}{1+2 \frac{2 \cdot 10^5}{6,4 \cdot 10^6}} \approx 9,3 \text{ м/с}^2.$$

Следовательно, $P = 100 \cdot 9,3 = 93$ Н.

Ответ: $P = 93$ Н.

1.4.17. Определить силу, прижимающую летчика к сидению самолета, в верхней и нижней точках петли Нестерова, если масса летчика 75 кг, радиус петли $R = 200$ м, а скорость самолета при прохождении петли постоянна и равна 360 км/ч. Чему равны перегрузки, испытываемые летчиком в этих точках?

Д а н о:
 $m = 75$ кг;
 $R = 200$ м;
 $V = 360$ км/ч = 100 м/с
 $F_1 = ?$ $F_2 = ?$ $F_1/P = ?$
 $F_2/P = ?$

Р е ш е н и е. На летчика в рассматриваемых точках действуют две силы: сила тяжести $m\vec{g}$ и сила нормальной реакции сиденья \vec{N}_1 или \vec{N}_2 (рис. 1.12). Второй закон Ньютона в векторной форме запишется для верхней точки $m\vec{g} + \vec{N}_1 = m\vec{a}_n$ для нижней точки $m\vec{g} + \vec{N}_2 = m\vec{a}_n$.

Направим ось Y вертикально вниз и запишем эти уравнения для проекции сил на эту ось $mg + N_1 = ma_n$, $mg - N_2 = -ma_n$, где a_n – центростремительное ускорение $a_n = V^2/R$. Сила, прижимающая летчика к сидению, равна по величине и противоположна по направлению силе реакции, т.е. силе, действующей на летчика со стороны сидения (третий закон Ньютона): $|\vec{F}_1| = |\vec{N}_1|$; $|\vec{F}_2| = |\vec{N}_2|$.

Следовательно, силы F_1 и F_2 равны

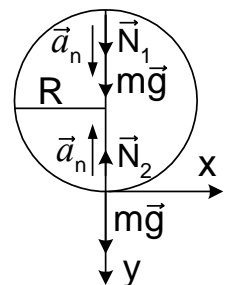


Рис. 1.12

$$F_1 = m(a_n - g) = m\left(\frac{V^2}{R} - g\right); \quad F_2 = m(a_n + g) = m\left(\frac{V^2}{R} + g\right);$$

$$F_1 = 75\left(\frac{10^4}{200} - 9,8\right) = 3000 \text{ Н}; \quad F_2 = 75\left(\frac{10^4}{200} + 9,8\right) = 4500 \text{ Н}.$$

Перегрузки, испытываемые летчиком $\frac{F_1}{P} = \frac{3000}{75 \cdot 9,8} = 4$, т. е. $F_1 = 4P$;

$$\frac{F_2}{P} = \frac{4500}{75 \cdot 9,8} = 6, \text{ т. е. } F_2 = 6P;$$

Ответ: $F_1 = 3000 \text{ Н}$; $F_2 = 4500 \text{ Н}$; $F_1/P = 4$; $F_2/P = 6$.

1.4.18. Автомобиль, двигаясь равноускоренно, на участке пути 100 м набрал скорость 72 км/ч. Определить работу двигателя автомобиля на этом участке, если масса его с грузом 1800 кг, а коэффициент трения 0,05.

Д а н о:

$$S = 100 \text{ м};$$

$$V = 72 \text{ км/ч} = 20 \text{ м/с};$$

$$m = 1800 \text{ кг};$$

$$K = 0,05$$

$$A = ?$$

Р е ш е н и е. Работа определяется по формуле $A = F S$. Сила тяги F состоит из двух слагаемых сил

$F = F_1 + F_2$, где F_1 – сила, необходимая для равномерного перемещения автомобиля,

$$F_1 = F_{\text{тр}} = K N = K m g;$$

F_2 – сила, которая сообщает автомобилю ускорение,

$F_2 = ma$. Следовательно,

$$A = K m g S + m a S; \tag{1}$$

Ускорение найдем из формулы $V^2 = 2a S$.

$$V_0 = 0, \quad a = V^2 / 2 S. \tag{2}$$

Подставив выражение (2) в формулу (1), получим

$$A = K m g S + (m V^2)/2;$$

$$A = 0,05 \cdot 1800 \cdot 9,8 \cdot 100 + (1800 \cdot 20^2)/2 = 4,48 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 0,448 \text{ МДж}.$$

Ответ: $A = 0,448 \text{ МДж}$.

1.4.19. Металлический шар массой 1 кг, движущийся со скоростью 8 м/с, сталкивается с покоящимся шаром массой 3 кг. Удар – центральный.

1. Определить, чему равна скорость шаров после неупругого удара (шары свинцовые) и как при этом изменилась кинетическая энергия шаров.

2. Определить скорость шаров после упругого удара (шары стальные).

Д а н о:
 $m_1 = 1$ кг;
 $V_1 = 8$ м/с;
 $m_2 = 3$ кг;
 $V_2 = 0$

 $V = ?$ $\Delta E_k = ?$

Р е ш е н и е. 1. Закон сохранения импульса при неупругом ударе шаров запишется так:

$$m_1 V_1 = (m_1 + m_2) V, \text{ откуда } V = \frac{m_1 V_1}{m_1 + m_2};$$

$$V = \frac{1 \cdot 8}{1 + 3} = 2 \text{ м/с.}$$

Кинетическая энергия шаров до удара

$$E_{k1} = \frac{m_1 V_1^2}{2}, E_{k1} = \frac{1 \cdot 8^2}{2} = 32 \text{ Дж}, E_{k2} = 0, \text{ так как } V_2 = 0.$$

Кинетическая энергия шаров после удара

$$E_{k1} = \frac{(m_1 + m_2) V^2}{2} = \frac{(1 + 3) 2^2}{2} = 8 \text{ Дж.}$$

Кинетическая энергия шаров после удара уменьшилась, так как часть ее превратилась во внутреннюю энергию:

$$\Delta E_k = E_{k1} - E_{k2} = 32 - 8 = 24 \text{ Дж.}$$

Закон сохранения импульса и закон сохранения кинетической энергии при упругом ударе шаров:

$$m_1 V_1 = m_1 U_1 + m_2 U_2 \quad \text{и} \quad \frac{m_1 V_1^2}{2} = \frac{m_1 U_1^2}{2} + \frac{m_2 U_2^2}{2}.$$

Решив эти уравнения относительно U_1 и U_2 , получим

$$U_1 = \frac{m_1 V_1 - m_2 U_2}{m_1}, \quad U_2 = \frac{2m_1 m_2}{m_1 m_2 + m_2^2} V_1;$$

$$U_1 = \frac{1 \cdot 8 - 3 \cdot 4}{1} = -4 \text{ м/с}, \quad U_2 = \frac{2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 8}{1 \cdot 3 + 9} = 4 \text{ м/с.}$$

Ответ: $V = 2$ м/с; $\Delta E_k = 24$ Дж; $U_1 = -4$ м/с; $U_2 = 4$ м/с.

1.4.20. Определить скорость пули массой 10 г, если при выстреле в ящик с песком массой 5 кг, висящий на подвесе длиной 1 м, он отклонится от вертикального положения на 30° .

Д а н о:
 $m_1 = 10$ г = 0,01 кг;
 $m_2 = 5$ кг;
 $l = 1$ м;
 $\alpha = 30^\circ$

 $V_1 = ?$

Р е ш е н и е. Согласно закону сохранения импульса

$$m_1 \mathbf{V}_1 = (m_1 + m_2) \mathbf{V}_2, \quad (1)$$

где m_1 – масса пули; \mathbf{V}_1 – скорость пули; m_2 – масса ящика с песком и пулей после выстрела.

Согласно закону сохранения энергии потенциальная энергия поднятого ящика с песком обусловлена его кинетической энергией, полученной от пули,

$$\frac{m_2 \mathbf{V}_2^2}{2} = m_2 g h, \text{ т.е. } \mathbf{V}_2 = \sqrt{2gh}. \quad (2)$$

Высоту подъема определим по рис. 1.13:

$$\ell - h = \ell \cos \alpha, \text{ т. е. } h = (1 - \cos \alpha) \ell.$$

Из формулы (1) находим

$$\mathbf{V}_1 = \frac{m_1 + m_2}{m_1} \mathbf{V}_2. \quad (3)$$

Подставим (2) в выражение (3)

$$\mathbf{V}_1 = \frac{m_1 + m_2}{m_1} \sqrt{2gh}, \quad \mathbf{V}_1 = \frac{5 + 0,01}{0,01} \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,13} \cong 800 \text{ м/с.}$$

Ответ: $\mathbf{V}_1 = 800 \text{ м/с.}$

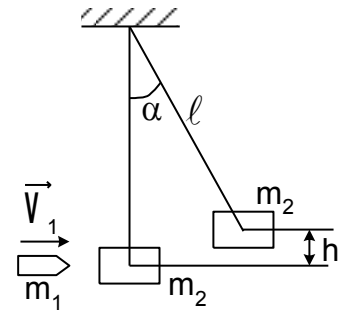


Рис. 1.13

1.5. Задачи для самостоятельного решения

1.5.1. Моторная лодка проходит расстояние между пунктами А и В, расположенными на берегу реки, за 3 часа, а плот – за 12 часов. Сколько времени потребуется моторной лодке на обратный путь? (Ответ: $t = 6$ часов).

1.5.2. Дождевые капли, падающие отвесно, попадают на окно автомобиля, движущегося со скоростью 45 км/ч, и оставляют на нем след под углом 30° к вертикали. Определить скорость падения капель. (Ответ: $\mathbf{V} \cong 21,6 \text{ м/с.}$)

1.5.3. Посадочная скорость самолета 135 км/ч, а длина его пробега 500 м. Определить время пробега по посадочной полосе и ускорение самолёта, считая движение равнозамедленным. (Ответ: $t = 27 \text{ с, } a = -1,4 \text{ м/с}^2$).

1.5.4. Тело падает с некоторой высоты и последние 30 м пути пролетает за 0,5 с. Определить время падения тела и высоту. (Ответ: $h \cong 195 \text{ м, } t \cong 6,24 \text{ с.}$)

1.5.5. Аэростат поднимается с Земли вертикально вверх с ускорением 2 м/с^2 . Через 5 с от начала его движения из него выпал предмет. Через сколько времени этот предмет упадёт на Землю? (Ответ: $t = 3,4 \text{ с}$).

1.5.6. Вес поезда $3 \cdot 10^7 \text{ Н}$. Коэффициент трения 0,02. Какова должна быть сила тяги локомотива, чтобы поезд набрал скорость 60 км/ч через 2 мин после начала движения? (Ответ: $F = 10^6 \text{ Н}$).

1.5.7. К одному концу нити, перекинутой через блок, подвешивают груз массой 500 г, к другому – груз массой 300 г. Найти ускорение системы, перемещение каждого груза и скорость, приобретенную через 1,2 с после начала движения. Трение не учитывать, массами блока и нити пренебречь. (Ответ: $a = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2$, $\ell = 1,59 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $V = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$).

1.5.8. К потолку вагона подвешен на нити шар. Трамвай идёт со скоростью 9 км/ч по закруглению радиусом 36,4 м. На какой угол отклонится при этом нить с шаром? (Ответ: $\alpha = 0,017 \text{ рад}$).

1.5.9. Танк массой 50 т идёт по мосту со скоростью 45 км/ч. Радиус кривизны моста 0,60 км. Найти силу давления танка на середину моста, если мост 1) выпуклый; 2) вогнутый (прогнулся под тяжестью танка). (Ответ: 1) $F_1 = 490 \text{ кН}$, 2) $F_2 = 510 \text{ кН}$).

1.5.10. Стальной шарик массой 20 г, падая с высоты 1 м на стальную плиту, отскакивает от неё на высоту 81 см. Найти: 1) импульс силы, действующий на плиту за время удара; 2) количество тепла, выделившегося при ударе. (Ответ: $F_t = 9 \cdot 10^{-2} \text{ Н}\cdot\text{с}$, $Q = 3,8 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}$).

1.5.11. Какую скорость нужно сообщить искусственному спутнику Земли, чтобы он двигался по круговой орбите на высоте 1000 км над поверхностью Земли. (Ответ: $V = 7,3 \text{ км/с}$).

1.5.12. Под каким углом нужно бросить тело, чтобы высота подъёма равнялась половине дальности полёта? Сопротивление воздуха не учитывать. (Ответ: $\alpha = 63^\circ 30'$).

1.5.13. С палубы корабля высотой 5 м над поверхностью воды под углом 60° к горизонту выпущена ракета, которая не разорвавшись упала в воду. Определить высоту подъёма и дальность полёта ракеты, если скорость вылета ракеты из ствола равна 60 м/с. Сопротивлением воздуха пренебречь. (Ответ: $h = 137 \text{ м}$, $S = 320 \text{ м}$).

1.5.14. С железнодорожной платформы, движущейся со скоростью 9 км/ч, выстрелили из пушки. Общая масса платформы с пушкой 20 т, масса снаряда 25 кг, его начальная скорость 700 м/с. Какова будет скорость платформы в момент выстрела, если направление выстрела совпадает с направлением движения платформы? Противоположно направлению движения платформы? (Ответ: $V_1 = 2 \text{ м/с}$, $V_2 = 3 \text{ м/с}$).

1.5.15. Тело массой 0,2 кг падает с высоты 1 м с ускорением 8 м/с. Найти изменение импульса тела. (Ответ: $\Delta P = 0,8 \text{ кг}\cdot\text{м/с}$)

1.5.16. Вертолёт, масса которого с грузом равна $6 \cdot 10^3$ кг, за 2,5 минуты набрал высоту 2250 м. Определить работу двигателя за это время и его мощность, считая подъем вертолётa равноускоренным. (Ответ: $A = 135 \cdot 10^6$ Дж, $N = 9 \cdot 10^5$ Вт).

1.5.17. Какое расстояние до остановки пройдёт автомобиль, идущий со скоростью 36 км/ч, после включения двигателя, если масса автомобиля с грузом $3 \cdot 10^3$ кг, а коэффициент трения 0,04? (Ответ: $\ell = 125$ м).

1.5.18. Двое рабочих переносят груз, подвешенный к железному лому длиной 1,5 м. Где должен быть подвешен груз, если нагрузка на одного рабочего в два раза больше, чем на другого? Весом лома пренебречь. (Ответ: $\ell = 0,5$ м или 1,0 м).

2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

2.1. Жидкости и газы

Силы давления – это силы упругости сжатых жидкости или газа. Чем сильнее сжаты жидкость или газ, тем больше и силы давления. Силы давления со стороны жидкости или газа всегда направлены перпендикулярно к поверхности, на которую они действуют, и распределены по всей поверхности, а не приложены к какой-либо точке. Для характеристики распределения сил давления вдоль поверхности вводят понятие «давление». Давление $P = F/S$. Давление газа на стенки сосуда обусловлено ударами молекул. Давление столба жидкости (гидростатическое давление) зависит от плотности жидкости ρ и высоты столба h : $P = \rho g h$. Давление в системе СИ измеряют в паскалях $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

$1 \text{ атм.} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт.ст.}, 1 \text{ мм рт.ст.} = 133,3 \text{ Па}.$

Закон Паскаля (XVII в.): "Жидкость или газ, заключённые в замкнутый сосуд, передают производимое на них поверхностное давление по всем направлениям одинаково". На законе Паскаля основано устройство гидравлического пресса. Силы, действующие на малый и большой поршень,

$$F_1 = P \cdot S_1 \quad \text{и} \quad F_2 = P \cdot S_2$$

где P – давление жидкости, тогда

$$F_1 / F_2 = S_2 / S_1.$$

Следовательно, при работе гидравлического пресса создается выигрыш в силе, равный отношению площади большего поршня к площади меньшего. Уровни жидкости в сообщающихся сосудах устанавливаются на одной и той же высоте вследствие того, что согласно закону Паскаля давление на одном уровне в сообщающихся сосудах одинаково.

Давление атмосферы. Слово атмосфера происходит от греческого атмос – воздух, сфера – шар.

Земля окружена атмосферой – воздушной оболочкой, состоящей из смеси различных газов. Воздух удерживается около Земли силой тяготения – собственным весом газа. Так как воздух имеет вес и, являясь газом, способен передавать производимое на него давление во все стороны равномерно, то в воздушном океане, окружающем Землю, должно существовать давление, уменьшающееся с высотой, потому что уменьшается слой воздуха, создающий на данной высоте давление.

Торричели (1643 г.) опытно доказал наличие атмосферного давления и измерил его.

Атмосферное давление, которое оказывает столб ртути высотой 760 мм, называется нормальным атмосферным давлением.

Приборы, служащие для измерения давления в жидкости или газе, называются манометрами. Манометры бывают жидкостные и металлические.

Закон Архимеда: "На тело, погруженное в жидкость (или газ), действует со стороны жидкости (или газа) выталкивающая сила, равная весу жидкости (или газа) в объеме погружённого тела", т. е.

$$F_A = P_{\text{ж}} = m g = \rho V g$$

где ρ – плотность жидкости.

Уменьшение веса тела в жидкости (или газе) происходит за счёт действия на него силы Архимеда F_A , т.е. $P = m g - F_A$.

На тело, погруженное в жидкость, действуют две силы: сила тяжести P и выталкивающая сила F_A . Если $P > F_A$, то тело опускается вниз, если $P = F_A$, тело находится в равновесии, если $P < F_A$, тело всплывает.

Если по трубе течет жидкость неразрывной струёй, то через любое поперечное сечение трубы за равные промежутки времени проходят одинаковые объёмы жидкости. Такое движение жидкости называют стационарным (установившимся) движением.

Выведите формулу

$$S_1 V_1 = S_2 V_2,$$

где V_1 – скорость движения жидкости в сечении трубы с площадью S_1 , а

V_2 – в сечении с площадью S_2 , откуда $\frac{V_1}{V_2} = \frac{S_1}{S_2}$, т.е. при стационарном те-

чении скорости движения частиц жидкости обратно пропорциональны площадям сечения трубы. В текущей жидкости различают статическое и динамическое давления.

Зависимость давления жидкости от скорости ее течения называется **законом Бернулли**: чем больше скорость, тем меньше давление жидкости.

2.2. Основы молекулярно-кинетической теории

Атом – наименьшая частица химического элемента, носитель его свойств. **Молекула** – наименьшая, устойчивая частица вещества, обладающая его химическими свойствами; молекулы образуются из атомов. Принято массы атомов и молекул сравнивать с 1/12 частью массы атома углерода C^{12} .

Относительной молекулярной (или атомной) **массой** вещества M_r называют отношение массы молекулы (или атома) m_0 данного вещества к 1/12 массы атома углерода m_{0C} : $M_r = m_0 / \frac{1}{12} m_{0C}$.

Величина, равная 1/12 массы атома углерода, называется атомной единицей массы (а. е. м.). На основании измерения установлено, что

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Зная M_r , можно рассчитать массу молекулы (атома) в килограммах

$$m_0 = M_r \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

В системе СИ количество вещества измеряют в молях. **Моль** – это количество вещества, содержащее столько же молекул (или атомов), сколько атомов содержится в 0,012 кг углерода. Масса одного моля (или молярная масса) равна $M = m_0 N_A$, где m_0 – масса одной молекулы (атома); N_A – число молекул (атомов) в одном моле вещества, называемое числом Авогадро, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$. Молярная масса M – размерная физическая величина, равная отношению массы вещества m к количеству молей ν вещества, $M = \frac{m}{\nu}$. $[M]$ – кг/моль.

Характер теплового движения молекул в газах и твердых телах различен: в газах молекулы двигаются хаотически, в твердых телах молекулы находятся в узлах кристаллической решетки и колеблются. Жидкости по характеру теплового движения занимают промежуточное положение между газами и твердыми телами: каждая молекула жидкости некоторое время колеблется в окружении соседних молекул, а затем скачком переходит в новое положение.

Броуновское движение – это хаотическое движение мельчайших частиц вещества в жидкости в результате некомпенсированных ударов молекул жидкости, совершающих тепловое движение. **Диффузией** называют процесс взаимного проникновения разных веществ, приведенных в соприкосновение. Диффузия газов протекает значительно быстрее, чем диффузия жидкостей. Диффундируют и твёрдые тела. С повышением температуры процесс диффузии ускоряется, что указывает на возрастание скорости движения молекул. Взаимную диффузию различных веществ, происходящую сквозь пористую перегородку, называют осмосом.

Силы взаимодействия между молекулами определяются одновременно силами притяжения и отталкивания, причем на близких расстояниях преобладают силы отталкивания, на далеких – притяжения, вследствие этого при растяжении и сжатии тел появляются упругие силы. Силы взаимного притяжения молекул в жидкостях значительно слабее, чем в твердых телах.

Законы, которым подчиняются газы, сложны. Поэтому, рассматривая эти законы в первом приближении, вводят понятие идеального газа с достаточно простыми свойствами. **Идеальный газ** – это упрощенная модель реального газа. Полагают следующее:

1) размеры молекул малы по сравнению с расстояниями между ними, т. е. объемом молекул можно пренебречь по сравнению с объемом сосуда, в котором находится газ;

2) между молекулами идеального газа нет сил взаимодействия;

3) молекулы идеального газа ведут себя при столкновениях со стенками сосуда как абсолютно упругие шарики.

Реальный газ, находящийся при высокой температуре и низком давлении, можно считать идеальным.

Физические величины, характеризующие состояние тела (или системы), называют параметрами состояния. Это температура, объем, давление, плотность, внутренняя энергия, электропроводность и др.

Два состояния вещества считаются различными, если значения хотя бы одного параметра для них неодинаковы. Переход вещества из одного состояния в другое называют процессом. Процесс, происходящий при постоянной температуре, называют изотермическим; при постоянном объеме – изохорическим; при постоянном давлении – изобарическим.

Между давлением, объемом, температурой и массой идеального газа существует связь, которая называется **уравнением состояния (уравнением Менделеева – Клапейрона)**

$$PV = \frac{m}{M}RT,$$

где P , V , T – давление, объем и температура газа; M – молярная масса; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/моль·К.

Из уравнения Менделеева–Клапейрона следуют все газовые законы: Бойля-Мариотта, Гей-Люссака, Шарля. Каждый газовый закон описывает процесс изменения состояния системы, если один из параметров состояния P , V или T остается постоянным (изопрцессы).

Согласно **основному уравнению молекулярно-кинетической теории** идеального газа, давление газа пропорционально концентрации (числу молекул в единице объема) и квадрату средней квадратичной скорости молекул газа

$$P = \frac{1}{3} n m_0 \bar{V}^2,$$

где m_0 – масса одной молекулы; $n = N/V$ – концентрация молекул; \bar{V} – средняя квадратичная скорость.

Основное уравнение можно записать в другом виде:

$$P = \frac{2}{3} n \bar{E}_k,$$

где \bar{E}_k – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы идеального газа.

Средняя квадратичная скорость молекулы $\bar{V} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$.

Средняя кинетическая энергия хаотического поступательного движения молекулы газа пропорциональна температуре

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} k T,$$

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

Эта зависимость выражает физический смысл температуры, как меры интенсивности движения молекул. Часто отвечающие делают ошибку, утверждая, что при абсолютном нуле ($-273,13$ °С) прекращается всякое движение. Это неверно. Даже если бы абсолютный нуль был достигим, то при его достижении прекратилось бы лишь поступательное движение атомов и молекул, движение же частиц, образующих атомы и молекулы, т. е. внутреннее движение материи, не прекращается и при абсолютном нуле.

2.3. Тепловые явления

Все вещества состоят из атомов и молекул, участвующих в непрерывном хаотическом движении, называемом тепловым. Молекулы обладают кинетической энергией теплового движения и потенциальной энергией, зависящей от их взаимного расположения. **Сумма кинетической и потенциальной энергий всех молекул называется внутренней энергией тела** и обозначается буквой U .

Внутреннюю энергию тела можно изменить за счет передачи тепла Q или совершения работы A .

Количество внутренней энергии, которое тело получает или теряет при теплопередаче, называют **количеством теплоты** Q . Количество теплоты, переданное телу при нагревании, зависит от рода вещества, из которого изготовлено тело, от массы этого тела и изменения его температуры:

$$Q = c m \Delta T = c m (T_2 - T_1),$$

где c – удельная теплоемкость тела, Дж/(кг·К); m – масса тела.

Для газа совершение работы всегда связано с изменением объема. При изобарическом ($P = \text{const}$) расширении (сжатии) газа от объема V_1 до V_2 работа определяется как $A = P (V_2 - V_1) = P \Delta V$.

Геометрически эта работа равна площади под графиком процесса в координатах $P - V$.

Закон сохранения и превращения энергии, распространенный на тепловые явления, носит название **первого закона термодинамики**. Он формулируется так: количество теплоты, переданное системе, идет на изменение (увеличение) ее внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами. **Математически первый закон термодинамики** выражается как $Q = \Delta U + A$.

Первый закон термодинамики в применении к различным процессам:

- 1) для изохорного процесса $V = \text{const}$, $A=0$, $Q = \Delta U$;
- 2) для изотермического процесса $T = \text{const}$, $\Delta U = 0$, $Q = A$;
- 3) для изобарного процесса $P = \text{const}$, $Q = \Delta U + A$;
- 4) для адиабатного процесса $Q = 0$, $A = -\Delta U$.

С точки зрения производства работы, наиболее выгодным является изотермический процесс.

Общим свойством всех необратимых процессов является то, что самопроизвольно они протекают только в одном направлении. Все процессы в природе необратимы. **Второй закон термодинамики** не запрещает протекание процесса в обратном направлении, но для этого нужна какая-либо компенсация, приводящая к каким-то изменениям в окружающих телах «невозможно перевести тепло от более холодной системы к более горячей при отсутствии других одновременных изменений в обеих системах или в окружающих телах».

Тепловой двигатель – это устройство для превращения тепла в работу. Например, паровая турбина на тепловой или атомной станции, двигатель внутреннего сгорания, турбореактивный или реактивный двигатель. Любой тепловой двигатель состоит из трех элементов: рабочее тело, нагреватель и холодильник.

На все тепло Q_1 , полученное от нагревателя, превращается в работу A , часть его Q_2 , отдается холодильнику, чтобы вернуть рабочее тело в исходное состояние. Совершенство тепловой машины определяется ее **коэффициентом полезного действия (КПД)**

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

Максимально возможное значение КПД имеет идеальная тепловая машина Карно

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

где T_1 и T_2 – соответственно температуры теплоотдатчика и теплоприемника.

Процесс испарения жидкости есть двусторонний процесс: наряду с уходом части молекул из жидкости (испарение), имеет место также частичное возвращение молекул обратно в жидкость (конденсация). Если количество молекул, вылетающих из жидкости и возвращающихся, одинаково, то наступает состояние динамического равновесия. Пар над поверхностью жидкости становится насыщенным. Пар, плотность которого меньше плотности насыщенного пара при той же температуре, называется ненасыщенным. Количество теплоты, необходимое для превращения данной массы жидкости в пар, называют теплотой испарения этой массы жидкости

$$Q = r m,$$

где r – удельная теплота испарения; m – масса жидкости, превращающаяся в пар.

При испарении температура жидкости понижается.

Кипение жидкости существенно отличается от испарения. Испарение происходит при любой температуре. Процесс кипения при наличии центров парообразования (пузырьки воздуха, шероховатости стенки и т. п.) начинается лишь при определенной температуре, когда давление насыщенного пара жидкости становится равным внешнему (атмосферному) давлению. Эта температура называется температурой кипения. С понижением внешнего давления температура кипения понижается.

Влажностью называется величина, характеризующая наличие водяных паров в атмосфере Земли. Различают абсолютную и относительную влажности. **Абсолютная влажность** определяется количеством водяного пара (в килограммах) в 1 м^3 воздуха, т. е. абсолютная влажность равна плотности водяного пара при данной температуре T и давлении P и обозначается ρ .

Относительная влажность f при тех же T и P определяется отношением плотности водяного пара ρ к плотности насыщенного пара ρ_n и выражается в процентах $f = \frac{\rho}{\rho_n} 100\%$.

Температуру, при которой пары, находящиеся в воздухе, становятся насыщенными, называют **точкой росы**.

Твердые тела сохраняют не только свой объем как жидкости, но и форму. Большинство твердых тел находится в кристаллическом состоянии. Твердое тело, состоящее из большого числа маленьких кристалликов, называется поликристаллическим. Одиночные кристаллы называют монокристаллами. Кристалл имеет правильную внешнюю форму, как следствие упорядоченного расположения в пространстве атомов и молекул. Главная особенность кристалла – зависимость физических

свойств от выбранного в кристалле направления, которая называется анизотропией.

У аморфных твердых тел в отличие от кристаллических нет строгого порядка в расположении атомов. Все аморфные тела изотропны, т.е. их физические свойства одинаковы по всем направлениям. Часто одно и то же вещество может находиться в кристаллическом и аморфном состояниях, например, кварц.

Закон Гука справедлив только для упругих деформаций, т.е. таких, которые исчезают при снятии нагрузок $\sigma = E \varepsilon$, где $\sigma = \frac{F}{S}$ – напряжение,

оно равно отношению модуля силы к площади поперечного сечения тела; E – модуль Юнга, характеризующий упругие свойства вещества;

$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell}$ – относительное изменение размеров тела.

2.4. Примеры решения задач

2.4.1. В сосуд, имеющий форму прямоугольной призмы, налита жидкость. Какова высота уровня жидкости в сосуде, если сила ее давления на дно равна силе давления на боковую поверхность сосуда? Длины сторон призмы $a = 0,5$ м, $b = 0,3$ м.

Д а н о:
 $a = 0,5$ м;
 $b = 0,3$ м
 $h = ?$

Р е ш е н и е. Давление жидкости на дно сосуда

$$P_1 = \rho g h,$$

где ρ – плотность жидкости; h – высота ее уровня.

Площадь дна $S_1 = a \cdot b$. Сила давления жидкости на дно сосуда $F_1 = P_1 S_1 = P_1 (a \cdot b)$. Давление жидкости на боковую стенку сосуда убывает равномерно с высотой от $\rho \cdot g \cdot h$ у дна до нуля у поверхности жидкости, поэтому

$$P_2 = \frac{0 + \rho g h}{2} = \frac{\rho g h}{2}.$$

Площадь боковой поверхности сосуда $S_2 = 2(ah + bh) = 2h(a+b)$, и сила давления на S_2 :

$$F_2 = P_2 S_2 = \frac{\rho g h}{2} 2h (a+b) = \rho g (a + b) h^2.$$

По условию

$$F_1 = F_2, \text{ т.е. } \rho g h a b = \rho g h^2 (a + b),$$

$$\text{откуда } h = \frac{ab}{a+b}, \quad h = \frac{0,5 \cdot 0,3}{0,5+0,3} = 0,19 \text{ м.}$$

Ответ: $h = 0,19$ м.

2.4.2. Кусок стекла в воздухе весит 1,4 Н, в воде 0,84 Н. Найти плотность стекла.

Д а н о:
 $P = 1,4 \text{ Н};$
 $P_1 = 0,84 \text{ Н}$
 $\rho = ?$

Р е ш е н и е. Находим величину выталкивающей силы: $F_A = P - P_1,$

$$F_A = P_{\text{ж}} = m_0 g = \rho_0 g V,$$

где ρ_0 – плотность воды.

Зная вес вытесненной жидкости, находим ее объем

$$V = \frac{F_A}{\rho_0 g} = \frac{P - P_1}{\rho_0 g}.$$

Такой же объем имеет и взвешенное тело.

Зная вес тела в воздухе и его объем, находим его плотность

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P}{gV} = \frac{P g}{g(P - P_1)} \rho_0 = \frac{P}{P - P_1} \rho_0,$$

$$\rho_0 = 10^3 \text{ кг/м}^3, \quad \rho = \frac{1,4}{1,4 - 0,8} 10^3 = 2,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$$

Этим методом на практике пользуются для определения плотности твердых тел.

Ответ: $\rho = 2,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$

2.4.3. В море плавает льдина, часть которой объемом 195 м^3 находится над водой. Определить объем всей льдины.

Д а н о:
 $V_1 = 195 \text{ м}^3$
 $V = ?$

Р е ш е н и е. На льдину, плавающую в море, действуют две силы: выталкивающая сила \vec{F}_A и

сила тяжести $m\vec{g}$ (рис. 2.1).

По закону Архимеда выталкивающая сила равна весу вытесненной жидкости (в объеме погруженного в жидкость тела $V_2 = V - V_1$)

$$F_A = m_{\text{ж}} g = \rho_{\text{ж}} g V_2,$$

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости.

Так как льдина плавает, то $F_A = m_{\text{ж}} g$ – (условие плавания тела). Сила тяжести равна $m g = \rho_{\text{т}} g V$; $\rho_{\text{т}}$ – плотность тела. Следовательно,

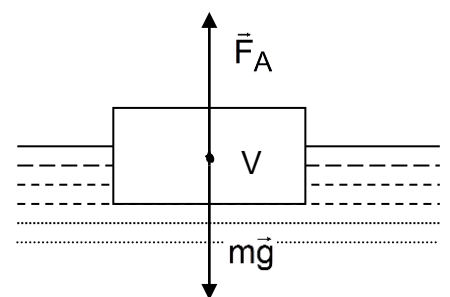


Рис. 2.1

$$\rho_{\text{ж}} g V_2 = \rho_{\text{т}} g V \quad \text{или} \quad \rho_{\text{ж}} (V - V_1) = \rho_{\text{т}} V,$$

откуда $V = \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{т}}} V_1.$

Плотность морской воды $\rho_{\text{ж}} = 1,03 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; плотность льда $\rho_{\text{т}} = 0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$

Найдем объем льдины:

$$V = \frac{1,03 \cdot 10^3}{1,03 \cdot 10^3 - 0,9 \cdot 10^3} 195 \text{ м}^3 = 1545 \text{ м}^3.$$

Ответ: $V = 1545 \text{ м}^3.$

Д а н о:

$$t = 20 \text{ }^\circ\text{C}; T = 273 + 20 = 293 \text{ К};$$

$$P = 10^{-6} \text{ мм рт.ст.} = \\ = 10^{-6} \cdot 133 \text{ Па} = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$$

$$n = ?$$

газов давление газа

2.4.4. Сколько молекул газа содержится в 1 см^3 при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$?

Р е ш е н и е. Согласно основному уравнению кинетической теории

$$P = \frac{2}{3} n \bar{E}_k, \quad (1)$$

где n – концентрация молекул, т. е. число молекул в единице объема; \bar{E}_k – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы,

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT, \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана.

Подставив формулу (2) в уравнение (1), получим

$$P = 2/3n \cdot 3/2kT = nkT, \quad k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К},$$

$$P = nkT, \quad (3)$$

откуда $n = P/kT.$

Проверим размерность

$$[n] = \frac{\text{Па} \cdot \text{К}}{\text{Дж} \cdot \text{К}} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2 \cdot \text{Н} \cdot \text{м}} = \frac{1}{\text{м}^3} = \text{м}^{-3}.$$

Подставим числовые значения

$$n = \frac{1,33 \cdot 10^{-4}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293} = 3,3 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3} = 3,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}.$$

Ответ: $n = 3,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

Д а н о:

$$T = 273 \text{ К};$$

$$P = 760 \text{ мм рт.ст.} = 760 \cdot 133 \text{ Па} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$\rho = 0,9 \text{ г/л} = 0,9(10^{-3}/10^{-3}) \text{ кг/м}^3 = 0,9 \text{ кг/м}^3$$

$$\bar{V} = ?$$

2.4.5. Плотность некоторого газа при нормальных условиях 0,9 г/л. Определить среднюю квадратичную скорость молекул газа.

Р е ш е н и е. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов

$$P = \frac{1}{3} m_0 n \bar{V}^2, \quad (1)$$

где P – давление газа; n – концентрация молекул; m_0 – масса одной молекулы; \bar{V} – средняя квадратичная скорость.

$$n = \frac{N}{V}, \text{ где } N \text{ – число молекул; } V \text{ – объем газа.}$$

$$P = \frac{1}{3} m_0 \frac{N}{V} \bar{V}^2, \text{ но } m_0 N = m \text{ – масса газа.}$$

Плотность газа равна $\rho = \frac{mN}{V}$, тогда получим $P = \frac{1}{3} \rho \bar{V}^2$, откуда

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{3P}{\rho}}.$$

Проверим размерность

$$[\bar{V}] = \sqrt{\frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^3}{\text{с}^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}}} = \text{м/с}.$$

Подставим числовые значения

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,013 \cdot 10^5}{0,9}} = 581 \text{ м/с}.$$

Ответ: $\bar{V} = 581 \text{ м/с}$.

2.4.6. Некоторая масса воздуха, занимавшая при температуре 27 °С и давлении 2 атм. объем 120 л, подвергалась нагреванию. Найти температуру газа, если нагревание было: 1) изохорным, причем давление возросло на 0,56 атм.; 2) изобарным, причем объем газа увеличился до 150 л. Определить массу газа.

Д а н о:

$$T_1 = 300 \text{ К}; P_1 = 2 \text{ атм.} = 2 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$P_2 = 2,56 \text{ атм.} = 2,56 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$V_1 = 120 \text{ л} = 120 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3;$$

$$V_2 = 150 \text{ л} = 150 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3;$$

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

$$T_2 = ? \quad T'_2 = ? \quad m = ?$$

Р е ш е н и е. Конечную температуру T_2 и T'_2 находим из законов Шарля и Гей-Люссака:

$$P_1/P_2 = T_1/T_2,$$

следовательно, $T_2 = (P_2/P_1) T_1,$

$$V_1/V_2 = T_1/T'_2; \quad T'_2 = (V_2/V_1)T_1.$$

Подставим числовые значения:

$$T_2 = \frac{2,56 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \cdot 300}{2 \cdot 1,013 \cdot 10^5} = 384 \text{ К}; \quad T'_2 = \frac{150 \cdot 10^{-5} \cdot 300}{120 \cdot 10^5} = 375 \text{ К}.$$

Массу газа определим из уравнения Менделеева–Клапейрона:

$$P_1 V_1 = \frac{m}{M} R T_1, \quad \text{откуда} \quad m = \frac{M P_1 V_1}{R T_1},$$

где m – масса газа; M – молярная масса, для воздуха $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; R – универсальная газовая постоянная.

$$m = \frac{29 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \cdot 120 \cdot 10^{-3}}{8,31 \cdot 300} = 0,283 \text{ кг}.$$

Ответ: $T_2 = 383 \text{ К}; T'_2 = 375 \text{ К}; m = 0,283 \text{ кг}.$

2.4.7. Из баллона со сжатым водородом емкостью 10 л вследствие неисправности крана утекает газ. При температуре 7 °С манометр показывал давление 51 атм. Через некоторое время при температуре 17 °С манометр показывал такое же давление. Определить массу газа, вышедшего из баллона.

Д а н о:

$$V = 10 \text{ л} = 10^{-2} \text{ м}^3;$$

$$t_1 = 7 \text{ °С}; \quad T_1 = 280 \text{ К};$$

$$t_2 = 17 \text{ °С}; \quad T_2 = 290 \text{ К};$$

$$P = 51 \text{ атм.} = 51 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2;$$

$$P = \text{const}$$

$$\Delta m = ?$$

Р е ш е н и е. По уравнению Менделеева – Клапейрона найдем первоначальную массу газа m_1 и массу газа после утечки m_2 :

$$PV = \frac{m_1}{M} R T_1; \quad m_1 = \frac{M P V}{R T_1};$$

$$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)};$$

$$PV = \frac{m_2}{M} R T_2; \quad m_2 = \frac{M P V}{R T_2};$$

$$M = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}.$$

Масса вышедшего газа

$$\Delta m = m_1 - m_2 = \frac{M P V}{R T_1} - \frac{M P V}{R T_2} = \frac{M P V}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right).$$

Проверим размерность

$$[\Delta m] = \frac{\text{кг} \cdot \text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{моль} \cdot \text{К}}{\text{моль} \cdot \text{Дж}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}^3}{\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м}} = \text{кг},$$
$$\Delta m = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 51 \cdot 10^5 \cdot 10^{-2}}{8,31} \left(\frac{1}{280} - \frac{1}{290} \right) = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг} = 1,5 \text{ г}.$$

Ответ: $\Delta m = 1,5 \text{ г}$.

2.4.8. Паровой молот массой 4 т падает на железную болванку массой 6 кг, причем скорость молота в момент удара 3 м/с. На сколько градусов нагреется болванка от удара молота, если на ее нагревание идет 80% полученной при ударе теплоты? Удельная теплоемкость железа $c = 460 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$.

Д а н о:
 $m = 4 \text{ т} = 4 \cdot 10^3 \text{ кг};$
 $m_1 = 6 \text{ кг};$
 $V = 3 \text{ м/с};$
 $\eta = 0,8;$
 $c = 460 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$
 $\Delta t = ?$

Р е ш е н и е. Совершенная при ударе молота механическая работа равна кинетической энергии молота в момент удара

$$A = \frac{m V^2}{2},$$

m – масса молота.

Количество теплоты, затраченное на нагревание болванки: $Q = c m_1 \Delta t$.

$$\text{По условию задачи } \eta A = Q \text{ или } \frac{\eta m V^2}{2} = c m_1 \Delta t,$$

откуда

$$\Delta t = \frac{\eta m V^2}{2 c m_1}.$$

$$\text{Проверим размерность: } [\Delta t] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{К}}{\text{с}^2 \cdot \text{Дж} \cdot \text{кг}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{Дж}} = \text{К},$$

$$\Delta t = \frac{0,8 \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 3^2}{2 \cdot 460 \cdot 6} = 5,2 \text{ }^\circ\text{C} = 5,2 \text{ К}.$$

Ответ: $\Delta t = 5,2 \text{ К}$.

2.4.9. В железный котел массой 1,5 кг налито 5 кг воды. Какое количество теплоты нужно подвести к котлу, чтобы нагреть воду от $15 \text{ }^\circ\text{C}$ до $100 \text{ }^\circ\text{C}$ (кипения)?

Д а н о:
 $m_1 = 1,5 \text{ кг};$
 $m_2 = 5 \text{ кг};$
 $t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C};$
 $t_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C};$
 $Q = ?$

Р е ш е н и е. Количество теплоты, подводимое для нагрева воды, расходуется на нагревание котла и повышение температуры воды. Поэтому общее количество

теплоты

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

где $Q_1 = c_1 m_1 (t_2 - t_1)$; $Q_2 = c_2 m_2 (t_2 - t_1)$, c_1 и c_2 – соответственно удельные теплоемкости железа и воды,

$$c_1 = 460 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}, \quad c_2 = 4190 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}.$$

Окончательно получим $Q_2 = (c_1 m_1 + c_2 m_2)(t_2 - t_1)$,

$$Q = (460 \cdot 1,5 + 4190 \cdot 5) \cdot (100 - 15) = 1,84 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Ответ: $Q = 1,84 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

2.4.10. В латунный калориметр массой 128 г, содержащий 240 г воды при $8,4^\circ\text{C}$, опущено металлическое тело массой 192 г, нагретое до 100°C . Окончательная температура, установившаяся в калориметре, $21,5^\circ\text{C}$. Определить удельную теплоемкость испытуемого тела.

Д а н о:

$$m_1 = 128 \text{ г} = 0,128 \text{ кг};$$

$$m_2 = 240 \text{ г} = 0,24 \text{ кг};$$

$$T_1 = T_2 = 8,4^\circ\text{C} = 281,4 \text{ К};$$

$$m_3 = 192 \text{ г} = 0,192 \text{ кг};$$

$$T_3 = 100^\circ\text{C} = 373 \text{ К};$$

$$T_4 = 21,5^\circ\text{C} = 294,5 \text{ К}$$

$$c_3 = ?$$

Р е ш е н и е. В теплообмене участвуют три тела: калориметр, вода и металл, причем металл отдает количество теплоты Q_3 , а вода и калориметр получают Q_2 и Q_1 .

Составим уравнение теплового баланса:

$$Q_3 = Q_1 + Q_2,$$

$$c_3 m_3 (T_3 - T) = c_1 m_1 (T - T_1) + c_2 m_2 (T - T_1),$$

$$T_2 = T_1, \text{ откуда } c_3 = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2)(T - T_1)}{m_3 (T_3 - T)},$$

c_1 и c_2 – удельные теплоемкости латуни и воды,

$$c_1 = 0,38 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}; \quad c_2 = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

Проверим размерность:

$$[c] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг} \cdot \text{К}}{\text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{кг} \cdot \text{К}} = \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$$c_3 = \frac{(0,38 \cdot 10^3 \cdot 0,128 + 4,19 \cdot 10^3 \cdot 0,24)(294,5 - 281,4)}{0,192 \cdot (373 - 294,5)} = 9,2 \cdot 10^2 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Этим методом на практике пользуются для определения удельной теплоемкости твердых тел.

Ответ: $c_3 = 9,2 \cdot 10^2 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

2.4.11. Найти массу воды, превратившейся в пар, если в сосуд, содержащий 1 кг воды при 20 °С, влить 10 кг расплавленного свинца при температуре плавления. Сосуд латунный, его масса 0,5 кг. Потерями теплоты пренебречь.

Д а н о:

$$m_1 = 1 \text{ кг};$$

$$m_2 = 0,5 \text{ кг};$$

$$T_1 = T_2 = 20 \text{ °С} = 293 \text{ К};$$

$$m_3 = 10 \text{ кг}$$

$$m = ?$$

Р е ш е н и е. В теплообмене участвуют три тела: свинец, вода и калориметр.

Свинец, отдавая тепло, отвердевает и охлаждается, а калориметр с водой нагреваются, причем часть воды превращается в пар. Поэтому после теплообмена в калориметре устанавливается температура кипения $T = 373 \text{ К} =$

$= 100 \text{ °С}$ (точка парообразования воды).

Обозначим количество теплоты, полученное водой,

$$Q_1 = m_1 c_1 (T - T_1) + m r .$$

Количество теплоты, полученное калориметром,

$$Q_2 = m_2 c_2 (T - T_2) = m_2 c_2 (T - T_1).$$

Количество теплоты, отданное свинцом,

$$Q_3 = m_3 \lambda + m_3 c_3 (T_{\text{пл}} - T),$$

где c_1, c_2, c_3 – соответственно удельные теплоемкости воды, латуни и свинца; r и λ – удельные теплота парообразования и теплота плавления свинца; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления свинца. Из справочных таблиц находим:

$$c_1 = 4190 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}; \quad c_2 = 390 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}; \quad c_3 = 130 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К};$$

$$r = 220 \cdot 10^4 \text{ Дж/кг}; \quad \lambda = 230 \cdot 10^2 \text{ Дж/кг}; \quad T_{\text{пл}} = 600 \text{ К}.$$

Составим уравнение теплового баланса: $Q_1 + Q_2 = Q_3$;

$$m_1 c_1 (T - T_1) + m r + m_2 c_2 (T - T_1) = m_3 \lambda + m_3 c_3 (T_{\text{пл}} - T);$$

$$m = \frac{m_3 \lambda + m_3 c_3 (T_{\text{пл}} - T) - (m_1 c_1 + m_2 c_2) (T - T_1)}{r},$$

$$m = \frac{10 \cdot 230 \cdot 10^2 + 10 \cdot 130 (600 - 373) - (1 \cdot 4190 + 0,5 \cdot 390) (373 - 293)}{220 \cdot 10^4} = 0,1 \text{ кг}.$$

Ответ: $m = 0,1 \text{ кг}$.

2.4.12. Мощность двигателя автомобиля 50 кВт. Определить расход бензина за 1 час, если КПД двигателя 25 %.

Д а н о:
 $N = 50 \text{ кВт} = 50 \cdot 10^3 \text{ Вт};$
 $t = 1 \text{ ч} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ с};$
 $\eta = 25 \% = 0,25$
 $V = ?$

Р е ш е н и е. Расход бензина:

$$V = m / \rho, \quad (1)$$

где m – масса бензина; ρ – плотность бензина.

Работа, совершаемая двигателем,

$$A = N t. \quad (2)$$

Количество теплоты, выделенное при сгорании бензина,

$$Q = q m,$$

где q – удельная теплота сгорания бензина. По условию задачи

$$A = \eta Q = \eta q m. \quad (3)$$

Приравняв формулы (2) и (3), получим $N t = \eta q m$,

откуда
$$m = \frac{Nt}{\eta q}. \quad (4)$$

Подставим выражение (4) в формулу (1): $V = \frac{Nt}{\rho \eta q}$.

Из таблиц $\rho = 0,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $q = 4,6 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$.

Проверим размерность:

$$V = \frac{\text{Вт} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{Дж}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}^3}{\text{Дж}} = \text{м}^3.$$

Подставим числовые значения:

$$V = \frac{50 \cdot 10^3 \cdot 3,6 \cdot 10^3}{0,7 \cdot 10^3 \cdot 0,25 \cdot 4,6 \cdot 10^7} = 22 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 22 \text{ л(дм}^3\text{)}.$$

Ответ: $V = 22 \text{ л (дм}^3\text{)}$.

2.4.13. Абсолютная влажность при температуре $t_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет $\rho_1 = 0,05 \text{ кг/м}^3$. Найти абсолютную ρ_2 и относительную влажность f_2 при понижении температуры до $t_2 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Давление насыщенных паров при температуре t_2 равно $P_2 = 1226 \text{ Па}$. Для воды молярная масса $M = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

Д а н о:
 $t_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C};$
 $t_2 = 10 \text{ }^\circ\text{C};$
 $\rho_1 = 0,05 \text{ кг/м}^3;$
 $P_2 = 1226 \text{ Па}$
 $\rho_2 = ? f_2 = ?$

Р е ш е н и е. По уравнению Менделеева–Клапейрона определим плотность насыщенных паров воды при температуре t_2 .

$$T_2 = t_2 + 273 = 283 \text{ К}.$$

$$P_2 V = \frac{m}{M} R T_2; \quad R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}, \text{ отсюда}$$

$$\rho_{2H} = \frac{m}{V} = \frac{MP_2}{RT_2}; \quad \rho_{2H} = \frac{18 \cdot 10^{-3} \cdot 1226}{8,31 \cdot 283} = 9,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3.$$

Проверим размерность:

$$[\rho_{2H}] = \frac{\text{кг} \cdot \text{Па} \cdot \text{моль} \cdot \text{К}}{\text{моль} \cdot \text{Дж} \cdot \text{К}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{Н}}{\text{м}^2 \cdot \text{Н} \cdot \text{м}} = \text{кг/м}^3.$$

Полученная величина ρ_{2H} меньше, чем ρ_1 , поэтому при охлаждении до t_2 , часть паров сконденсируется и абсолютная влажность будет определяться плотностью насыщенных паров

$$\rho_2 = \rho_{2H} = 9,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3,$$

а относительная влажность составит: $f_2 = (\rho_2 / \rho_{2H}) 100\% = 100\%$.

Ответ: $\rho_2 = 9,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$; $f_2 = 100\%$.

2.4.14. Температура воздуха в комнате объемом 100 м^3 равна $11 \text{ }^\circ\text{C}$, относительная влажность 70% . Определить сколько влаги содержится в комнате?

Д а н о:
 $t_1 = 11 \text{ }^\circ\text{C}$;
 $V = 100 \text{ м}^3$;
 $f = 70\% = 0,7$
 $m = ?$

Р е ш е н и е. Найдем абсолютную влажность воздуха ρ в комнате при температуре $11 \text{ }^\circ\text{C}$

$$f = \rho / \rho_H, \text{ откуда } \rho = f \rho_H,$$

где ρ_H – плотность насыщенных паров при заданной температуре, при $t_1 = 11 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho_H = 10 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$; $\rho = 0,7 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$, т.е. в каждом кубическом метре воздуха содержится $7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ влаги.

Следовательно, массу воды (пара) в воздухе комнаты можно вычислить по формуле $m = \rho V = 7 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 0,7 \text{ кг} = 700 \text{ г}$.

Ответ: $m = 700 \text{ г}$.

2.5. Задачи для самостоятельного решения

2.5.1. В сообщающиеся сосуды налита ртуть, поверх нее в один из сосудов налит столб масла высотой 48 см , а в другой – столб керосина высотой 20 см . Определить разность уровней ртути в обоих сосудах, если плотность масла 900 кг/м^3 , керосина 800 кг/м^3 , ртути 13600 кг/м^3 . (Ответ: $\Delta h = 2 \text{ см}$).

2.5.2. Малый поршень гидравлического пресса за один ход опускается на расстояние $0,2 \text{ м}$, а большой поршень поднимается на $0,01 \text{ м}$. С какой силой действует пресс на зажатое в нем тело, если на малый

поршень действует сила 500 Н? (Ответ: $P = 10^4$ Н).

2.5.3. Железная деталь, погруженная в воду, весит меньше, чем в воздухе на 9,81 Н. Определить ее вес в воздухе. (Ответ: $P = 76,5$ Н).

2.5.4. Спасательный круг объемом $21,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ погружен в морскую воду и поддерживает человека весом 712 Н так, что над водой находится 0,1 объема его тела. Средняя плотность тела человека $1,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Определить среднюю плотность материала, из которого сделан спасательный круг. Плотность морской воды $1,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. (Ответ: $\rho = 0,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$).

2.5.5. Определить число молекул, содержащихся в объеме 1 мм³ воды, и массу молекулы воды. (Ответ: $n = 3,34 \cdot 10^{19}$ молекул; $m = 2,99 \cdot 10^{-26}$ кг).

2.5.6. Во сколько раз средняя квадратичная скорость молекул кислорода меньше средней квадратичной скорости молекул водорода при одной и той же температуре? (Ответ: в 4 раза).

2.5.7. Газовая горелка потребляет 10 г водорода за 1 час. На сколько времени хватит водорода, находящегося в баллоне емкостью 10 л, если давление водорода 200 атм., а температура равна нулю? (Ответ: $t = 18$ ч).

2.5.8. В сосуде емкостью 4 л находится 1 г водорода. Какое число молекул содержится в 1 см³ этого сосуда? (Ответ: $n = 7,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$).

2.5.9. Какое число молекул находится в комнате объемом 80 м³ при температуре 17 °С и давлении 750 мм рт.ст.? (Ответ: $N = 2 \cdot 10^{27}$).

2.5.10. Объем воздуха в комнате 100 м³. Какова масса вышедшего из нее воздуха при повышении температуры от 10 до 25 °С, если атмосферное давление равно 770 мм рт.ст.? Молярная масса воздуха $29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$. (Ответ: $m = 6,44$ кг).

2.5.11. До какой температуры нужно нагреть запаянный шар, содержащий 9 г воды, чтобы шар разорвался, если известно, что стенки шара выдерживают давление не более 40 атм., а объем шара 1,2 л? (Ответ: $T = 963$ К).

2.5.12. Баллон содержит сжатый газ при температуре 27 °С и давлении 40 атм. Какое будет давление, если из баллона выпустить половину массы газа, а температуру понизить до 12 °С? (Ответ: $P = 1,92 \cdot 10^6$ Па).

2.5.13. Смесь, состоящую из 5 кг льда и 15 кг воды, при общей температуре, равна нулю, нужно нагреть до температуры 80 °С с пропусканием водяного пара при 100 °С. Определить необходимое количество пара. (Ответ: $m = 3,52$ кг).

2.5.14. Чтобы нагреть 1,8 кг воды от 18 °С до кипения на горелке с КПД 25 %, потребовалось 92 г горючего. Какова удельная теплота сгорания горючего? (Ответ: $q = 27 \cdot 10^6$ Дж/кг).

2.5.15. Самолет пролетает с постоянной скоростью 900 км/ч путь 1800 км, затрачивая при этом 4 т горючего. Мощность двигателя самолета 5,9 МВт, а КПД 23%. Какова удельная теплота сгорания топлива? (Ответ: $q = 4,62 \cdot 10^7$ Дж/кг).

2.5.16. В подвале при температуре 8 °С относительная влажность воздуха равна 100 %. На сколько градусов надо повысить температуру воздуха в подвале, чтобы влажность уменьшилась до 60%? (Ответ: $T = 8$ К).

2.5.17. В комнате объемом 150 м³ температура 20 °С, относительная влажность составляет 60%. Определить массу водяных паров в воздухе комнаты. Упругость насыщенного водяного пара при 20 °С – 2,33 кПа. (Ответ: $m = 1,55$ кг).

2.5.18. В горизонтально расположенной трубке сечением 10 см² движется воздух со скоростью 1 м/с. Какова скорость воздуха в узкой части трубки, если ее сечение составляет 0,5 см²? (Ответ: $V = 20$ м/с).

3. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

3.1. Электростатика

В отличие от гравитационных сил силы электрического взаимодействия могут быть не только силами притяжения, но и отталкивания. Силы взаимодействия точечных зарядов определяются **законом Кулона**:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2} \quad \text{или в системе СИ} \quad F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 r^2},$$

где q_1 и q_2 – взаимодействующие точечные заряды; ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды, для вакуума $\varepsilon = 1$; ε_0 – электрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; r – расстояние между зарядами.

Относительная диэлектрическая проницаемость ε показывает, во сколько раз сила взаимодействия между зарядами в вакууме больше силы взаимодействия между теми же зарядами в данной среде. Взаимодействие более двух зарядов, согласно принципу независимости действия сил, определяется как векторная сумма парных взаимодействий.

Электрический заряд любой системы тел состоит из целого числа элементарных зарядов, равных $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Наименьшей по массе покая устойчивой частицей, имеющей отрицательный элементарный заряд, является электрон. Масса покая электрона равна $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Существует устойчивая частица с положительным элементарным зарядом – протон. Масса покая протона равна $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг. Электроны и протоны входят в состав атомов всех химических элементов.

Закон сохранения электрического заряда: электрические заряды не создаются и не исчезают (они могут только передаваться от одного тела к другому или перемещаться внутри данного тела) или алгебраическая сумма зарядов в природе остается постоянной. Этот закон

является одним из фундаментальных законов сохранения, подобно законам сохранения импульса и энергии.

Взаимодействие электрических зарядов осуществляется посредством электрического поля. **Напряжённость электрического поля** –

векторная величина, равная $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$, где q_0 – заряд, помещённый в данную точку поля. Напряженность поля точечного заряда

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2},$$

где q – заряд, создающий электрическое поле; r – расстояние от точечного заряда q до рассматриваемой точки. Если поле создается системой зарядов, то напряженность результирующего поля определится **по принципу суперпозиции** и будет равна геометрической сумме напряженности полей, создаваемых в данной точке каждым зарядом в отдельности, т.е. $\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$.

Силовые линии характеризуют не только направление вектора напряженности в каждой точке, их густота количественно определяет среднее значение напряженности. Необходимо запомнить, что силовые линии электрического поля – это линии, касательные к которым совпадают с направлением вектора напряженности электрического поля, и поэтому не могут быть траекториями движения пробного заряда в электрическом поле. Силовые линии совпадают с направлением движения пробного заряда только в однородном электрическом поле плоского конденсатора. Однородным называют поле, вектор напряженности которого во всех точках остается постоянным. Такое поле изображается семейством параллельных силовых линий.

В проводниках (металлических) существуют носители тока – электроны проводимости (свободные электроны), которые под действием внешнего электрического поля могут перемещаться по объему проводника. Электрические свойства проводников определяются поведением электронов проводимости во внешнем электрическом поле. В отсутствие внешнего электрического поля электрические поля электронов проводимости и положительных ионов металла ("атомных остатков") взаимно компенсируют друг друга. Если металлический проводник внести во внешнее электрическое поле, то под действием этого поля электроны проводимости перераспределяются в проводнике таким образом, чтобы в любой точке внутри проводника электрическое поле электронов проводимости и положительных ионов скомпенсировало внешнее электрическое поле.

В любой точке внутри проводника, находящегося в электрическом поле, напряженность электрического поля равна нулю. На поверхности

проводника вектор напряжённости направлен по нормали к поверхности. В заряженном проводнике uncompensated заряды располагаются только на поверхности. В любой точке внутри проводника потенциал остаётся постоянным.

Вещества, которые не проводят электрический ток, называются диэлектриками, в них отсутствуют свободные носители электрического тока. Молекулы диэлектрика электрически нейтральны и содержат равное число положительных и отрицательных зарядов. Тем не менее, молекулы обладают электрическими свойствами. Молекулу диэлектрика можно рассматривать как диполь, имеющий дипольный электрический момент. Как диполь молекула вещества создает в окружающем пространстве электрическое поле. Следует разобраться в механизме поляризации полярных и неполярных диэлектриков под воздействием внешнего электрического поля: поляризация полярных молекул, представляющих электрический диполь, обусловлена поворотом молекул, неполярных – смещением положительных и отрицательных зарядов. При внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле происходит поляризация диэлектрика, состоящая в том, что возникает суммарный дипольный момент молекул, отличный от нуля. Диэлектрик, который находится в таком состоянии, называется поляризованным.

Энергетической характеристикой электрического поля является **потенциал** – скалярная величина, равная $\varphi = \frac{W_p}{q_0}$ или $\varphi = \frac{A}{q_0}$, а его силовой характеристикой является напряженность. Потенциал поля точечного заряда

$$\varphi = \frac{q}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 r},$$

где r – расстояние от заряда, создающего электрическое поле, до рассматриваемой точки.

Поскольку электрическое поле потенциально, **работа при перемещении зарядов** в однородном поле не зависит от формы пути, по которому движется заряд, а зависит только от положения начальной и конечной точек пути, то есть работа затрачивается на изменение потенциальной энергии:

$$A = -(W_{p2} - W_{p1}) = -q_0(\varphi_2 - \varphi_1);$$

$$A = -q_0 \left(\frac{q}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 r_2} - \frac{q}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 r_1} \right).$$

Емкость уединённого проводника численно равна электрическому заряду, изменяющему его потенциал на единицу: $C = \frac{q}{\varphi}$.

Електроёмкость не зависит от рода вещества и заряда проводника, а зависит от его формы, размеров и свойств окружающей среды. На практике обычно имеют дело с двумя или несколькими проводниками. Взаимной електроёмкостью двух проводников называют физическую величину, численно равную заряду, который нужно перевести с одного проводника на другой для того, чтобы изменить разность потенциалов между ними на единицу: $C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$.

Конденсатор состоит из двух или нескольких близко расположенных проводников, разделенных диэлектриком. Электроёмкостью конденсатора называют физическую величину, численно равную отношению величины заряда q одной из обкладок конденсатора к разности потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ между его обкладками: $C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$.

Электроёмкость плоского конденсатора в системе СИ определяют формулой

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d},$$

где S – площадь каждой пластины; d – расстояние между пластинами. При параллельном соединении конденсаторов электроёмкость равна $C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$, при последовательном соединении конденсаторов $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$.

Согласно теории близкодействия вся энергия взаимодействия заряженных тел сконцентрирована в электрическом поле этих тел и, следовательно, может быть выражена через напряженность поля:

$$W_3 = \frac{CU^2}{2} \quad \text{или} \quad W_3 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} \cdot Sd.$$

Выражение $w = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$ называют плотностью энергии электрического поля.

3.2. Законы постоянного тока

Есть различие в физическом смысле понятий «электрический ток», «сила», «единица силы тока».

Электрический ток – это физическое явление направленного (упорядоченного) движения электрических зарядов, которое может возникнуть в цепи при наличии носителей зарядов (электронов, ионов) и источника сторонних сил (источника тока), под воздействием которых осу-

ществляется движение электрических зарядов.

В источнике тока какой-либо вид энергии непрерывно преобразуется в энергию электрического поля, под действием сил которого происходит упорядоченное движение свободных зарядов.

Сила тока – физическая величина для количественной оценки электрического тока, характеризующая количество электричества, проходящего через поперечное сечение проводника в единицу времени,

$$I = \frac{q}{t}.$$

Единица силы тока ампер – это основная единица системы СИ и она устанавливается по магнитному взаимодействию двух проводников с током.

Необходимо помнить, что хотя разность потенциалов, напряжение и электродвижущая сила (ЭДС) измеряются в вольтах, физический смысл их различен. **Разность потенциалов** между двумя точками определяется работой электростатических (кулоновских) сил по перемещению единичного заряда, ЭДС – работой сторонних сил, а **напряжение** – работой тех и других:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{\text{поля}}}{q}; \quad \varepsilon = \frac{A_{\text{стор}}}{q}; \quad U = \frac{A_{\text{поля}}}{q} + \frac{A_{\text{стор}}}{q};$$

$$\text{т.е. } U = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon, \text{ если } \varepsilon = 0, \text{ то } U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Если на участке цепи нет сторонних сил, то напряжение на нем равно разности потенциалов на его концах.

При замкнутой внешней цепи можно измерить только напряжение на клеммах источника.

При разомкнутой внешней цепи ЭДС источника численно равна разности потенциалов на его зажимах, поскольку ток в цепи в этом случае равен нулю.

Закон Ома для участка цепи: сила тока в участке цепи пропорциональна разности потенциалов на концах участка и обратно пропорциональна его сопротивлению,

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}, \text{ если } \varepsilon = 0, \text{ то } U = \varphi_1 - \varphi_2 \text{ и } I = \frac{U}{R}.$$

Закон Ома для замкнутой цепи, представленный в виде равенства $\varepsilon = IR + Ir$, является непосредственным следствием закона сохранения энергии в применении к замкнутой электрической цепи.

Сопротивлением проводника называют физическую величину, характеризующую свойство проводника затруднять прохождение электрического тока.

Величина **сопротивления** R зависит от физических свойств проводника, его геометрических размеров и температуры и не зависит от силы тока I и разности потенциалов U , через которые может быть численно определена по закону Ома для участка цепи:

$$R = \frac{U}{I}, \quad R = \rho \frac{\ell}{S},$$

где ρ – удельное сопротивление проводника; ℓ – его длина; S – площадь поперечного сечения проводника. Величину γ , обратную удельному сопротивлению ρ , называют удельной проводимостью,

$$\gamma = \frac{1}{\rho}.$$

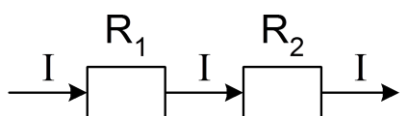


Рис. 3.1. Последовательное соединение проводников

При последовательном соединении сопротивлений (рис. 3.1) общее сопротивление цепи равно сумме сопротивлений отдельных участков, т.е. $R = R_1 + R_2$.

Разности потенциалов между концами последовательно соединённых проводников, составляющих электрическую цепь, пропорциональны сопротивлениям этих проводников

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Силы токов на сопротивлениях одинаковы: $I_1 = I_2 = I$.

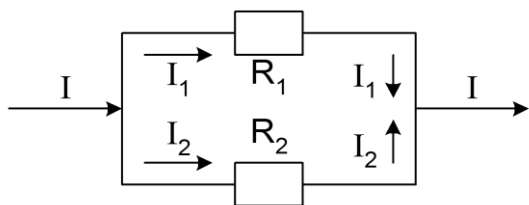


Рис. 3.2. Параллельное соединение проводников

При параллельном соединении сопротивлений (рис. 3.2) общая проводимость $1/R$ соединения равна сумме проводимостей $1/R_1$, $1/R_2$ ветвей $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$.

Общее сопротивление разветвлённого участка:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Разности потенциалов между концами параллельно соединённых проводников одинаковы $U_1 = U_2 = U$.

Силы токов в параллельных ветвях обратно пропорциональны сопротивлениям этих ветвей

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Электрическая энергия легко преобразуется в другие виды энергии (механическую, химическую, световую, внутреннюю энергию вещества),

что широко используется в промышленности и быту.

Мерой энергии электрического тока служит **работа источника ЭДС**, создающего и поддерживающего электрическое поле в цепи

$$A = I U t = I^2 R t = Q.$$

Согласно закону сохранения энергии это выражение для работы электрического тока справедливо только в частном случае, когда вся работа, выполняемая за счет энергии источника сторонних сил, будет затрачиваться только на нагревание проводника, который не будет при этом перемещаться за счёт тока, протекающего в цепи. Количество теплоты, выделяемое в окружающую среду проводником с током, может быть определено по **закону Джоуля-Ленца** ($I^2 R t = Q$) только для интервала времени t , в течение которого сила тока I , протекающего через проводник, и его сопротивление R остаются неизменными. Внесистемной единицей работы и энергии тока является $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

Мощность тока, затрачиваемая на нагревание участка цепи с сопротивлением R ,

$$N = Q/t = I^2 R = I U.$$

Тепловые действия электрического тока были впервые применены для устройства электрического освещения А.Н. Ладыгиным в 1872 г.

Всякое замыкание источника на очень малое внешнее сопротивление называют коротким замыканием. В этом случае сила тока равна $I_{\text{макс}} = \varepsilon/r$, где r – внутреннее сопротивление источника тока. Большие токи короткого замыкания опасны, так как очень сильно нагревают провода и могут вызвать пожар.

Электролизом называют выделение вещества на электродах при прохождении электрического тока через электролит. Необходимо разобраться в механизме переноса вещества при электролизе.

В жидкостях носителями зарядов являются ионы: положительные ионы (катионы) движутся к отрицательному электроду (катоду), отрицательные (анионы) движутся к положительному электроду (аноду). Протекание тока в электролитах сопровождается переносом вещества. С повышением температуры электролитов их сопротивление уменьшается: во-первых, с увеличением температуры возрастает кинетическая энергия молекул электролита, и при соударениях большее их число распадается на ионы; во-вторых, при нагревании жидкости уменьшается её внутреннее трение (вязкость), а следовательно, скорость движения ионов увеличивается. По **закону Фарадея** масса вещества, выделившегося при электролизе на электроде, пропорциональна величине заряда q , прошедшего через электролит: $m = K q$, где K – электрохимический эквивалент, зависящий от природы вещества.

Так как $q = I t$, то $m = K I t$, где I – сила тока; t – время прохождения

тока через электролит. Электрохимический эквивалент определяется как

$$K = \frac{1}{e N_A} \frac{M}{n} = \frac{1}{F} \frac{M}{n},$$

где $F = e N_A$ – постоянная Фарадея; e – заряд электрона, N_A – число Авогадро; M – атомная (молярная) масса; n – валентность. Отсюда следует, что при одинаковом количестве электричества масса вещества, выделяющегося в результате электролиза различных электролитов, пропорциональна отношению атомной (молярной) массы к валентности

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} q = \frac{1}{F} \frac{M}{n} I t.$$

Техническое **применение электролиза**: 1) очистка или рафинирование металлов; 2) электрометаллургия; 3) гальваностегия – электролитический способ покрытия металлических изделий слоем благородного металла (золота, платины), неподдающегося окислению; 4) гальванопластика или электролитическое осаждение металла на поверхности предмета для воспроизведения его формы.

Газы в нормальном состоянии являются изоляторами и становятся проводниками, когда ионизированы. Проводимость газа, созданную внешними ионизаторами (ультрафиолетовые и рентгеновские лучи, радиоактивное излучение, пламя и т.д.), но не связанную с электрическим полем, называют несамостоятельной. Электрический ток в газах называют газовым разрядом. Газовый разряд, который продолжается после того, как прекращается действие внешнего ионизатора называют самостоятельным. **Плазма** – это четвёртое состояние вещества – частично или полностью ионизированный газ, в котором ионы и электроны обладают очень большой кинетической энергией и общим электрическим зарядом, равным нулю.

Особенностью плазмы являются: 1) сильное взаимодействие с внешними электрическими и магнитными полями, обусловленное высокой электропроводностью плазмы; 2) особое коллективное взаимодействие частиц плазмы; 3) наличие упругих свойств, позволяющих возбуждать и передавать в плазме различные колебания.

В вакууме молекул газа настолько мало, что образовавшиеся при их ионизации ионы не могут обеспечить возникновение тока. Поэтому носители заряда должны поступать извне. Одним из источников носителей заряда для обеспечения тока в вакууме является электронная эмиссия. Для того чтобы электрон покинул металлическую поверхность, необходимо затратить определённую, зависящую от рода вещества энергию, которая должна превышать так называемую работу выхода электрона $A = e U$. Число вылетевших электронов зависит, в основном, от темпе-

ратуры и свойств вещества.

Испускание электронов твёрдыми и жидкими телами при их нагревании называется **термоэлектронной эмиссией**. Термоэлектронная эмиссия широко применяется в различных электронных лампах и электронно-лучевых трубках.

Полупроводники отличаются от металлов тем, что при обычных температурах в них содержится значительно меньшее количество свободных электронов. Малая концентрация свободных электронов обуславливает большое удельное сопротивление проводников. С повышением температуры сопротивление полупроводников уменьшается, это объясняется тем, что при нагревании полупроводника происходит резкое увеличение числа свободных электронов. Собственная проводимость полупроводников обусловлена наличием электронов и дырок, возникающих при их нагревании; примесная проводимость определяется наличием донорных или акцепторных примесей. Выпрямление переменного тока в диодах объясняется односторонней проводимостью p – n перехода. Транзистор состоит из монокристалла германия Ge, в котором созданы два p–n перехода.

3.3. Магнитное поле. Электромагнитная индукция

Взаимодействие между токами и движущимися зарядами осуществляется посредством магнитного поля, которое представляет собой особый вид материи, порождаемой движущимися зарядами (током).

Магнитное поле, так же как и электрическое, может быть представлено графически. Но в отличие от электрического поля силовые линии магнитного поля, окружающего проводник или движущиеся заряды, всегда замкнутые, поэтому электрическое поле – потенциальное, а магнитное – вихревое.

Магнитное поле обнаруживается по его силовому действию на проводник с током, а сила, действующая со стороны магнитного поля на отдельные участки проводника (элемент тока $I \cdot \Delta \ell$), определяется по **закону Ампера**

$$F = B I \Delta \ell \sin \alpha,$$

где B – силовая характеристика магнитного поля, называемая индукцией магнитного поля; α – угол между направлением магнитного поля и элементом тока. Направление силы определяют по правилу левой руки.

Индукция магнитного поля равна силе, действующей на ток единичной длины, расположенной нормально к направлению поля, при силе тока, равной единице, т.е. $B = F$, при $\Delta \ell = 1$, $\alpha = \pi / 2$.

Направление вектора \vec{B} определяют при помощи магнитной силовой

линии. По закону Ампера определяется и сила взаимодействия двух параллельных проводников

$$F = \frac{\mu \mu_0 I_1 I_2 \ell}{2\pi d},$$

где μ – магнитная проницаемость среды, для вакуума $\mu = 1$; μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; ℓ – длина проводников; d – расстояние между ними. Эта формула используется при определении единицы силы тока – ампер.

Поскольку электрический ток – совокупность упорядоченно движущихся заряженных частиц, то с помощью закона Ампера определяется сила, действующая со стороны магнитного поля на отдельный движущийся заряд, – сила Лоренца $F = |q| V B \sin\alpha$, где q – заряд частицы; α – угол между направлениями скорости и магнитного поля. Эта сила изменяет только направление вектора скорости и является центростремительной силой.

Магнитные свойства вещества проявляются в его способности намагничиваться. Опытные исследования показали, что все вещества обладают магнитными свойствами. Причем у большинства из них эти свойства выражены слабо. Эти вещества получили название слабомагнитных в отличие от небольшой группы веществ (Fe, Ni, Co и сплавы), называемых сильномагнитными. Сильномагнитные вещества называют ферромагнитными; слабомагнитные бывают двух групп: парамагнитные ($\mu > 1$) – намагничиваются в направлении индукции внешнего поля и диамагнитные ($\mu < 1$) – намагничиваются в противоположном направлении. Отличительной особенностью ферромагнетиков является не только то, что у них магнитная проницаемость μ достигает очень большой величины, но и то, что она не остается постоянной, как у слабомагнитных веществ.

Электрические и магнитные взаимодействия являются частным случаем электромагнитного взаимодействия, осуществляемого посредством электромагнитного поля. Изменение магнитного поля вызывает появление электрического, и наоборот. В проводниках, расположенных в изменяющемся магнитном поле, возникает ЭДС, величина которой определяется **законом**

электромагнитной индукции Фарадея: $\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Следовательно,

ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока. **Магнитный поток**, пронизывающий контур, определяется по формуле

$$\Phi = B S \cos\alpha,$$

где S – площадь контура; α – угол между нормалью и направлением

магнитного поля.

Явление самоиндукции – частный случай явления электромагнитной индукции, когда ЭДС при изменении магнитного поля индуцируется в том же проводнике, по которому течёт ток, создающий это магнитное поле:

$$\varepsilon_s = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

где L – индуктивность контура.

Следовательно, ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения силы тока в контуре. Индуктивность контура L зависит только от размеров, формы проводника и магнитных свойств среды, в которой находится проводник, и не зависит от скорости изменения тока в контуре. **Энергия магнитного поля** контура с током $W_M = \frac{LI^2}{2}$, где L – индуктивность; I – сила тока.

Необходимо уяснить различие понятий «магнитная индукция», «электромагнитная индукция» и «индуктивность».

Магнитная индукция B – силовая характеристика магнитного поля.
Электромагнитная индукция – физическое явление, заключающееся в том, что при изменении магнитного потока, пронизывающего контур, в нем возникает индукционный ток.

Индуктивность (коэффициент самоиндукции) – физическая величина, характеризующая размеры контура и свойства среды, окружающей этот контур.

Индуктивность (коэффициент самоиндукции) – физическая величина, характеризующая размеры контура и свойства среды, окружающей этот контур.

3.4. Примеры решения задач

3.4.1. Два шарика, каждый массой 0,01 г, подвешены на нитях длиной по 50 см. После того, как шарика были одинаково наэлектризованы, они отошли друг от друга на расстояние 7 см (рис. 3.3).

Найти величину заряда каждого шарика.

Д а н о:

$$m_1 = m_2 = m = 10^{-2} \text{ г} = 10^{-5} \text{ кг};$$

$$\ell = 50 \text{ см} = 0,5 \text{ м};$$

$$r = 7 \text{ см} = 7 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$q = ?$$

Р е ш е н и е. На каждый из отклонённых шариков действуют три силы: mg – сила тяжести; F – кулоновская сила взаимодействия шариков; F_H – сила натяжения нити.

Условие равновесия шариков в векторной форме $m\vec{g} + \vec{F} + \vec{F}_H = 0$.

Запишем это уравнение в проекциях на оси X и Y :

$$-F_H \sin\alpha + F = 0, \quad F_H \cos\alpha - mg = 0.$$

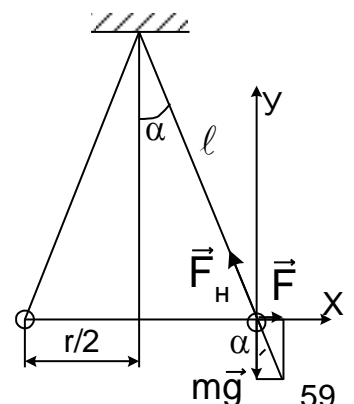


Рис. 3.3

По закону Кулона

$$F = \frac{q^2}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 r^2},$$

тогда

$$F_H \sin \alpha = \frac{q^2}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 r^2}; \quad (1)$$

$$\varepsilon = 1, \quad \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}; \quad F_H \cos \alpha = mg. \quad (2)$$

Разделив почленно уравнения (1) и (2), получим

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{q^2}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 r^2 mg};$$

из рис. 3.3

$$\operatorname{tg} \alpha = \sin \alpha = \frac{r/2}{l} = \frac{r}{2l},$$

тогда

$$\frac{r}{2l} = \frac{q^2}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 r^2 mg},$$

откуда

$$q = r \sqrt{\frac{2\pi \varepsilon \varepsilon_0 r mg}{l}}.$$

Проверим размерность:

$$[q] = \text{м} \sqrt{\frac{\text{Ф} \cdot \text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}} = \text{м} \sqrt{\frac{\text{Ф} \cdot \text{кг}}{\text{с}^2}} = \text{м} \sqrt{\frac{\text{Кл}^2 \cdot \text{кг}}{\text{Дж} \cdot \text{с}^2}} = \text{м} \sqrt{\frac{\text{Кл}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^2}} = \text{м} \frac{\text{Кл}}{\text{м}} = \text{Кл},$$

$$q = 7 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 7 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-5} \cdot 9,81}{0,5}} = 1,9 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} = 1,9 \text{ нКл}.$$

Ответ: $q = 1,9 \text{ нКл}$.

3.4.2. В двух вершинах равностороннего треугольника со стороной 0,5 м расположены два одинаковых положительных заряда по 1 мкКл каждый (рис. 3.4). Найти потенциал и напряженность электрического поля в третьей вершине треугольника, а также посередине между зарядами.

Дано:

$$a = 0,5 \text{ м};$$

$$q_1 = q_2 = q = 1 \text{ мкКл} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$E_A = ? \quad E_B = ? \quad \varphi_A = ? \quad \varphi_B = ?$$

поля в точках А и В равны

Решение.
По принципу суперпозиции напряженности

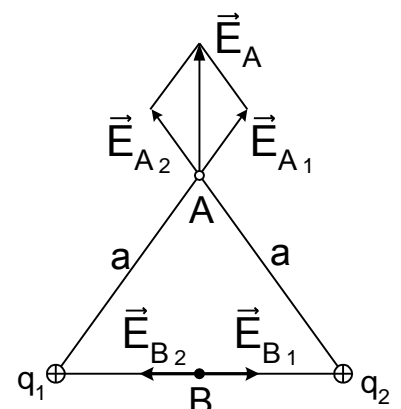


Рис. 3.4

$$\vec{E}_A = \vec{E}_{A1} + \vec{E}_{A2} \quad \text{и} \quad \vec{E}_B = \vec{E}_{B1} + \vec{E}_{B2},$$

где E_{A1} , E_{A2} , E_{B1} , E_{B2} – напряженности полей, создаваемых зарядами q_1 и q_2 в точках А и В.

Поскольку заряды q_1 и q_2 точечные, то

$$E_{A1} = E_{A2} = \frac{q}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 a^2}; \quad \varepsilon = 1; \quad \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м},$$

$$E_{A1} = E_{A2} = \frac{10^{-6}}{4 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} (0,5)^2} =$$

$$= 36 \cdot 10^3 \text{ В/м} = 36 \text{ кВ/м}.$$

Сложив по правилу параллелограмма векторы E_{A1} и E_{A2} , найдём напряженность суммарного поля в точке А. По теореме косинусов имеем

$$E_A^2 = E_{A1}^2 + E_{A2}^2 + 2E_{A1} \cdot E_{A2} \cdot \cos \alpha, \quad \alpha = 60^\circ;$$

$$E_A^2 = 2E_{A1}^2 + 2E_{A1}^2 \cdot \cos 60^\circ = 2E_{A1}^2 + 2E_{A1}^2 \cdot 0,5 = 3E_{A1}^2;$$

$$E_A = E_{A1} \sqrt{3}; \quad E_A = 36 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3} = 62,4 \cdot 10^3 \text{ В/м} = 62,4 \text{ кВ/м}.$$

Потенциал поля в точке А, создаваемого зарядами q_1 и q_2

$$\varphi_A = \varphi_{A1} + \varphi_{A2}, \quad \varphi_{A1} = \varphi_{A2} = \frac{q}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 a};$$

$$\varphi_{A1} = \varphi_{A2} = \frac{10^{-6}}{4 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,5} = 18 \cdot 10^3 \text{ В} = 18 \text{ кВ}.$$

$$\varphi_A = 2\varphi_{A1} = 2 \cdot 18 \cdot 10^3 = 36 \cdot 10^3 = 36 \text{ кВ}.$$

Напряженности полей E_{B1} и E_{B2} в точке В направлены в противоположные стороны и равны по модулю, $E_{B1} = E_{B2}$. Поэтому напряженность суммарного поля $E_B = E_{B1} - E_{B2} = 0$.

Потенциал поля зарядов q_1 и q_2 в точке В $\varphi_{B1} = \varphi_{B2} = \frac{q}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 a/2}$

$$\varphi_{B1} = \varphi_{B2} = \frac{10^{-6}}{4 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,25} = 36 \cdot 10^3 \text{ В} = 36 \text{ кВ}.$$

$$\varphi_B = \varphi_{B1} + \varphi_{B2} = 2\varphi_{B1} = 2 \cdot 36 \cdot 10^3 = 72 \cdot 10^3 \text{ В} = 72 \text{ кВ}.$$

Ответ: $E_A = 62,4 \text{ кВ/м}$; $E_B = 0$; $\varphi_A = 36 \text{ кВ}$; $\varphi_B = 72 \text{ кВ}$.

3.4.3. В точке 1, находящейся на расстоянии 1,4 м от поверхности шара радиуса 20 см, имеющего поверхностную плотность заряда

30 мкКл/м², находится точечный заряд 2 мкКл. Найти работу, совершаемую при перемещении этого заряда в точку 2, находящуюся на расстоянии 40 см от центра шара (рис. 3.5).

Д а н о:

$$l_1 = 1,4 \text{ м};$$

$$l_2 = 40 \text{ см} = 0,4 \text{ м};$$

$$r = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м};$$

$$\sigma = 30 \text{ мкКл/м}^2 = 30 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2;$$

$$q = 2 \text{ мкКл} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$A = ?$$

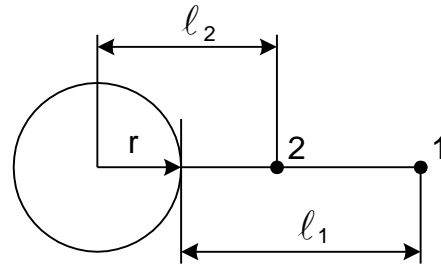


Рис. 3.5

Р е ш е н и е. Заряд перемещается из точки с меньшим потенциалом в точку с большим потенциалом. Для такого перемещения требуется совершить против сил поля работу $A = q(\varphi_2 - \varphi_1)$. Потенциалы поля в точках 1 и 2:

$$\varphi_1 = \frac{q_{\text{ш}}}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 (l_1 + r)}, \quad \varphi_2 = \frac{q_{\text{ш}}}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 l_2};$$

$$\varepsilon = 1; \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}.$$

где $q_{\text{ш}}$ – заряд шара, $q_{\text{ш}} = \sigma S = \sigma 4\pi r^2$.

Следовательно,

$$\begin{aligned} A = q(\varphi_2 - \varphi_1) &= \frac{q q_{\text{ш}}}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0} \left(\frac{1}{l_2} - \frac{1}{l_1 + r} \right) = \frac{q \sigma 4\pi r^2}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0} \left(\frac{1}{l_2} - \frac{1}{l_1 + r} \right) = \\ &= \frac{q \sigma r^2}{\varepsilon \varepsilon_0} \left(\frac{1}{l_2} - \frac{1}{l_1 + r} \right). \end{aligned}$$

Проверим размерность:

$$[A] = \frac{\text{Кл} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{Ф} \cdot \text{м}} = \text{Кл} \cdot \text{В} = \text{Дж}.$$

$$A = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 10^{-6} \cdot (0,2)^2}{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \left(\frac{1}{0,4} - \frac{1}{1,4 + 0,2} \right) = 0,31 \text{ Дж}.$$

Ответ: $A = 0,31 \text{ Дж}$.

3.4.4. В плоском конденсаторе, помещенном в вакууме, взвешена заряженная капелька ртути. Расстояние между пластинами конденсатора 1 см (рис. 3.6). Приложенное напряжение – 1 кВ. Внезапно напряжение

падает до 995 В. Через какое время капелька достигнет нижней пластины, если она первоначально находилась посередине конденсатора?

Д а н о:
 $U_1 = 1 \text{ кВ} = 10^3 \text{ В};$
 $U_2 = 995 \text{ В};$
 $d = 1 \text{ см} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$
 $t = ?$

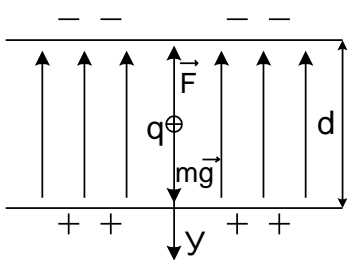


Рис. 3.6

Р е ш е н и е. На капельку ртути действуют $m\vec{g}$ – сила тяжести и электрическая сила со стороны поля $\vec{F} = q\vec{E}$, где E – напряженность электрического поля.

Капелька ртути будет падать с ускорением, которое можно найти исходя из второго закона Ньютона. Запишем для заряда уравнение второго закона Ньютона в векторной форме $m\vec{g} + \vec{F}_2 = m\vec{a}$.

Перейдем от векторной формы уравнения движения к скалярной. Для этого возьмём проекции векторов сил на направление движения заряда, с которым связываем ось Y . Учитывая, что $F_2 = qE_2$ и $E_2 = U_2/d$, получим $mg - F_2 = ma$ или

$$g - \frac{qE_2}{m} = a, \quad g - \frac{q}{m} \frac{U_2}{d} = a.$$

Удельный заряд капельки ртути q/m – определим из условия ее равновесия в исходном случае ($U_1 = 1 \text{ кВ}$) $m\vec{g} + \vec{F}_1 = 0$. В проекциях на ось Y $mg - F_1 = 0$, но $F_1 = qE_1 = q \frac{U_1}{d}$, тогда $mg = q \frac{U_1}{d}$, откуда $\frac{q}{m} = \frac{g \cdot d}{U_1}$.

Окончательно $a = g - \frac{gdU_2}{dU_1} = g \left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right)$, а время падения t найдем из формулы пути для капельки, $S = \frac{at^2}{2}$, но $S = d/2$, тогда $\frac{d}{2} = \frac{at^2}{2}$, откуда

$$t = \sqrt{\frac{d}{a}}; \quad t = \sqrt{\frac{d}{g(1 - U_2/U_1)}}; \quad t = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-2}}{9,8(1 - 995/1000)}} = 0,45 \text{ с.}$$

Ответ: $t = 0,45 \text{ с.}$

3.4.5. Заряд первого шара равен $2 \cdot 10^{-7}$ Кл, второго $1 \cdot 10^{-7}$ Кл. Электроёмкость шаров 2 пФ и 3 пФ. Найти окончательное распределение зарядов на шарах после того, как они будут соединены проволокой. На сколько изменится заряд каждого шара? Каков будет потенциал шаров?

Д а н о:
 $q_1 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл};$
 $q_2 = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Кл};$
 $C_1 = 2 \text{ пФ} = 2 \cdot 10^{-12} \text{ Ф};$
 $C_2 = 3 \text{ пФ} = 3 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$
 $q'_1 = ? \quad q'_2 = ? \quad q'_1 - q_1 = ?$
 $q'_2 - q_2 = ? \quad \varphi_1 = ? \quad \varphi_2 = ?$

Р е ш е н и е. Когда заряженные шары соединили проволокой, они образовали один проводник с общим потенциалом

$\varphi = \varphi_1 = \varphi_2$ и общим зарядом $q = q_1 + q_2$.

Согласно закону сохранения электрического заряда: $q = q'_1 + q'_2$, откуда $q'_2 = q - q'_1$.

Потенциалы каждого шара можно представить как

$$\varphi_1 = \frac{q'_1}{C_1}; \quad \varphi_2 = \frac{q'_2}{C_2} = \frac{q - q'_1}{C_2}.$$

Так как $\varphi_1 = \varphi_2$, то $\frac{q'_1}{C_1} = \frac{q - q'_1}{C_2}$, откуда $q'_1(C_1 + C_2) = qC_2$, тогда

$$q'_1 = \frac{qC_2}{C_1 + C_2} \quad \text{и} \quad q'_2 = q - q'_1, \quad q = 3 \cdot 10^{-7} \text{ Кл},$$

$$q'_1 = \frac{3 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^{-12}}{(2 + 3) \cdot 10^{-12}} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл};$$

$$q'_2 = 3 \cdot 10^{-7} - 1,2 \cdot 10^{-7} = 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}.$$

Заряд первого шара уменьшился на $q'_1 - q_1 = -0,8 \cdot 10^{-7}$ Кл, т.е. первый шар отдал часть своего заряда второму шару. Заряд второго шара увеличился на $q'_2 - q_2 = 0,8 \cdot 10^{-7}$ Кл.

Потенциал первого шара равен

$$\varphi_1 = \frac{q'_1}{C_1}; \quad \varphi_1 = \frac{1,2 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-12}} = 6 \cdot 10^4 \text{ В} = 60 \text{ кВ}.$$

Так как потенциал шаров одинаков, то и $\varphi_2 = 6 \cdot 10^4 \text{ В} = 60 \text{ кВ}$. Проверим это

$$\varphi_2 = \frac{q'_2}{C_2}; \quad \varphi_2 = \frac{1,8 \cdot 10^{-7}}{3 \cdot 10^{-12}} = 6 \cdot 10^4 \text{ В} = 60 \text{ кВ}.$$

Ответ: $q'_1 = 1,2 \cdot 10^{-7}$ Кл; $q'_2 = 1,8 \cdot 10^{-7}$ Кл; $q'_1 - q_1 = -0,8 \cdot 10^{-7}$ Кл;
 $q'_2 - q_2 = 0,8 \cdot 10^{-7}$ Кл; $\varphi_1 = 60$ кВ; $\varphi_2 = 60$ кВ.

3.4.6. Электрон движется из точки электрического поля, в которой потенциал равен 600 В. Найти потенциал той точки поля, в которой электрон остановится, если начальная скорость электрона равна 10^7 м/с и направлена вдоль силовой линии.

Д а н о:

$$\varphi_1 = 600 \text{ В};$$

$$V_1 = 10^7 \text{ м/с};$$

$$V_2 = 0$$

Р е ш е н и е. Согласно закону сохранения энергии работа сил электрического поля, уменьшающая скорость электрона, равна изменению (уменьшению) кинетической энергии электрона

$$A = -\Delta W^K = -(W_2^K - W_1^K) = W_1^K - W_2^K,$$

так как $A = e(\varphi_1 - \varphi_2)$, $W_1^K = \frac{mV_1^2}{2}$, $W_2^K = 0$, то данное уравнение принимает вид:

$$e(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{mV_1^2}{2},$$

где e – заряд электрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; m – масса электрона, $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Решив это уравнение относительно φ_2 , получим $\varphi_2 = \varphi_1 - \frac{mV^2}{2e}$;

$$\varphi_2 = 600 - \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{14}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 330 \text{ В.}$$

Проверим размерность

$$[\varphi] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В.}$$

Ответ: $\varphi_2 = 330 \text{ В.}$

3.4.7. Найти внутреннее сопротивление и напряжение на зажимах элемента с ЭДС 2,1 В, находящегося на расстоянии 20 м от потребителя электрической энергии, если при сопротивлении потребителя 2 Ом ток в цепи равен 0,7 А. Провода – медные диаметром 1,2 мм; удельное сопротивление меди 0,017 мк Ом·м.

Д а н о:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 2,1 \text{ В}; \ell = 20 \text{ м}; \\ R &= 2 \text{ Ом}; I = 0,7 \text{ А}; \\ d &= 1,2 \text{ мм} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\ \rho &= 0,017 \text{ мк Ом} \cdot \text{м} = \\ &= 0,017 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м} = \\ &= 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

$$r = ? \quad U = ?$$

Р е ш е н и е. Сопротивление подводящих проводов длины 2ℓ равно

$$R_0 = \rho \frac{2\ell}{S} = \rho \frac{2\ell}{\pi d^2 / 4} = \rho \frac{8\ell}{\pi d^2},$$

где ρ – удельное сопротивление проводника; d – диаметр проводника.

$$R_0 = \frac{8 \cdot 20 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8}}{3,14 \cdot (1,2 \cdot 10^{-3})^2} = 0,6 \text{ Ом.}$$

$$[R] = \frac{\text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = \text{Ом}$$

Сила тока в цепи согласно закону Ома для полной цепи равна

$$I = \frac{\varepsilon}{R + R_0 + r}.$$

Откуда находим внутреннее сопротивление элемента

$$r = \frac{\varepsilon - IR - IR_0}{I} = \frac{\varepsilon}{I} - (R + R_0),$$

$$r = 2,1/0,7 - (2+0,6) = 0,4 \text{ Ом}.$$

Согласно закону Ома для участка цепи напряжение на зажимах элемента будет равно $U = I (R + R_0)$;

$$U = 0,7 (2 + 0,6) = 1,82 \text{ В}.$$

Ответ: $r = 0,4 \text{ Ом}$; $U = 1,82 \text{ В}$.

3.4.8. Элемент замкнут сначала на внешнее сопротивление 2 Ом, а затем на внешнее сопротивление 0,5 Ом. Найти ЭДС элемента и его внутреннее сопротивление, если известно, что в каждом из этих случаев мощность, развиваемая во внешней цепи, одинакова и равна 2,54 Вт.

Д а н о:

$$R_1 = 2 \text{ Ом}; R_2 = 0,5 \text{ Ом};$$

$$N_1 = N_2 = N = 2,54 \text{ Вт}$$

$$\varepsilon = ? r = ?$$

Р е ш е н и е. Закон Ома для полной цепи в первом и втором случаях имеет вид

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1 + r}; \quad I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2 + r}. \quad (1)$$

Мощность, развиваемая током во внешней цепи, равна $N_1 = I_1^2 R$; $N_2 = I_2^2 R$, откуда

$$I_1 = \sqrt{\frac{N}{R_1}} = \sqrt{\frac{2,54}{2}} = 1,127 \text{ А}; \quad I_2 = \sqrt{\frac{N}{R_2}} = \sqrt{\frac{2,54}{0,5}} = 2,254 \text{ А}.$$

Подставим полученные значения токов в формулы (1), получим:

$$1,127 = \frac{\varepsilon}{R_1 + r}; \quad 2,254 = \frac{\varepsilon}{R_2 + r}.$$

Из полученных уравнений легко найти неизвестные ε и r , разделив первое уравнение на второе:

$$0,5 = \frac{R_2 + r}{R_1 + r}.$$

Вычислим внутреннее сопротивление r : $0,5R_1 + 0,5r = R_2 + r$,

$$0,5r = 0,5R_1 - R_2; r = \frac{0,5R_1 - R_2}{0,5} = \frac{0,5 \cdot 2 - 0,5}{0,5} = 1 \text{ Ом.}$$

Подставив полученное значение r в формулу (1), получим:

$$\varepsilon = I_1(R_1 + r), \quad \varepsilon = 1,127(2 + 1) = 3,38 \text{ В.}$$

Ответ: $\varepsilon = 3,38 \text{ В}$; $r = 1 \text{ Ом}$.

3.4.9. Напряжение городской сети 220 В. Длина проводки к дому 50 м. Определить сечение подводящих проводов, если известно, что при включении полной нагрузки, состоящей из 100 штук 75-ваттных и 50 штук 25-ваттных лампочек, напряжение на лампочках 210 В. Проводка изготовлена из медного провода.

Д а н о:
 $U_1 = 220 \text{ В}$; $U_2 = 210 \text{ В}$;
 $l_1 = 50 \text{ м}$;
 $n_1 = 100$; $n_2 = 50$;
 $N_1 = 75 \text{ Вт}$; $N_2 = 25 \text{ Вт}$;
 $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

 $S = ?$

Р е ш е н и е. Сопротивление проводов определим по формуле $R = \rho \frac{\ell}{S}$, откуда площадь поперечного сечения проводов равна

$$S = \frac{\rho \ell}{R}, \quad (1)$$

где ρ – удельное сопротивление проводов; ℓ – длина проводки, состоящая из двух проводов, $\ell = 2l_1$. Сопротивление R найдём из условия

$$I = \frac{U_1 - U_2}{R},$$

где I – сила тока в подводящих проводах; $U_1 - U_2$ – падение напряжения на подводящих проводах. Мощность, потребляемая всеми лампами, $N = I U_2$, где I – суммарный ток всех ламп; U_2 – напряжение на лампах.

Эта мощность равна сумме мощностей всех ламп $N = n_1 N_1 + n_2 N_2$. Приравняв полученные выше равенства, получим для силы тока в подводящих проводах

$$I = \frac{n_1 N_1 + n_2 N_2}{U_2},$$

где $n_1 N_1 + n_2 N_2$ – полная мощность, потребляемая всеми лампами; U_2 – подводимое к ним напряжение.

$$R = \frac{U_1 - U_2}{I} = \frac{(U_1 - U_2) U_2}{n_1 N_1 + n_2 N_2}. \quad (2)$$

Подставим выражение (2) в формулу (1), получим

$$S = \frac{\rho \ell (n_1 N_1 + n_2 N_2)}{(U_1 - U_2) U_2}, \text{ так как } \ell = 2\ell_1, \text{ то } S = \frac{2\rho \ell_1 (n_1 N_1 + n_2 N_2)}{(U_1 - U_2) U_2}.$$

Проверим размерность:

$$[S] = \frac{\text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{Вт}}{\text{В} \cdot \text{В}} = \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{В}^2}{\text{В}^2 \cdot \text{Ом}} = \text{м}^2;$$

$$S = \frac{2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 50(100 \cdot 75 + 50 \cdot 25)}{(220 - 210) \cdot 210} = 7,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 7,1 \text{ мм}^2.$$

Ответ: $S = 7,1 \text{ мм}^2$.

3.4.10. Сколько цинка получено при электролизе ZnSO_4 , если была затрачена энергия 2 кВт·ч и разность потенциалов между зажимами ванны составила 2 В?

Д а н о:

$$W = 2 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 2 \cdot 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 7,2 \cdot 10^6 \text{ Дж};$$

$$U = 2 \text{ В}$$

$$m = ?$$

Р е ш е н и е. Согласно закону Фарадея для электролиза масса выделившегося вещества

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} I t,$$

где M – молярная масса; I – сила тока; t – время; F – постоянная Фарадея; n – валентность цинка.

Энергия электрического тока $W = I U t$, откуда $I = \frac{W}{U t}$, поэтому

$$m = \frac{M}{nF} \frac{W}{U t} t = \frac{M}{nF} \frac{W}{U},$$

где $M = 65,38 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$; $n = 2$; $F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$.

Проверим размерность:

$$[m] = \frac{\text{кг} \cdot \text{моль} \cdot \text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{Кл} \cdot \text{В}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{Кл} \cdot \text{В}}{\text{Кл} \cdot \text{В}} = \text{кг};$$

$$m = \frac{65,38 \cdot 10^{-3} \cdot 7,2 \cdot 10^6}{2 \cdot 9,65 \cdot 10^4 \cdot 2} = 1,21 \text{ кг}.$$

Ответ: $m = 1,21 \text{ кг}$.

3.4.11. На проводник с током 50 А, расположенный в однородном

магнитном поле под углом 30° к направлению линий магнитного поля, действует сила 5 Н. Найти индукцию магнитного поля, если длина проводника равна 2 м.

Д а н о:
 $I = 50 \text{ А};$
 $F = 5 \text{ Н};$
 $l = 2 \text{ м};$
 $\alpha = 30^\circ$

 $B = ?$

Р е ш е н и е. На проводник с током, помещённый в магнитное поле, действует сила

$$F = I l B \sin \alpha,$$

отсюда индукция

$$B = \frac{F}{I l \sin \alpha}; \quad B = \frac{5}{50 \cdot 2 \cdot 0,5} = 0,1 \text{ Тл.}$$

Ответ: $B = 0,1 \text{ Тл.}$

3.4.12. Два провода, расположенные параллельно, подвешены на расстоянии 40 см один от другого. В каждом проводе в одном направлении протекает постоянный ток 200 А. Найти силу взаимодействия проводов на участке между соседними опорами, расположенными на расстоянии 100 м.

Д а н о:
 $I_1 = I_2 = I = 200 \text{ А};$
 $d = 40 \text{ см} = 0,4 \text{ м};$
 $l = 100 \text{ м}$

 $F = ?$

Р е ш е н и е. По формуле Ампера

$$F = \frac{\mu \mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d},$$

так как проводники находятся в воздухе, то $\mu = 1$, а $I_1 = I_2 = I$, тогда

$$F = \frac{\mu_0 I^2 l}{2\pi d},$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$

$$F = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot (200)^2 \cdot 100}{2\pi \cdot 0,4} = 2 \text{ Н.}$$

Ответ: $F = 2 \text{ Н.}$

3.4.13. Какую работу совершает однородное магнитное поле с индукцией 1,5 Тл при перемещении проводника длиной 0,2 м, по которому течет ток в 10 А, на расстояние 0,25 м, если направление перемещения перпендикулярно к направлению тока? Проводник расположен под углом 30° к направлению поля.

Дано:
 $B = 1,5 \text{ Тл};$
 $l = 0,2 \text{ м};$
 $I = 10 \text{ А};$
 $S = 0,25 \text{ м};$
 $\alpha = 30^\circ$
 $A = ?$

Решение. Работа перемещения равна

$$A = F S,$$

где F – сила, действующая на проводник с током в магнитном поле.

$$F = I l B \sin\alpha, \text{ тогда } A = I l B S \sin\alpha,$$

$$A = 1,5 \cdot 0,2 \cdot 10 \cdot 0,25 \cdot 0,5 = 0,38 \text{ Дж.}$$

Ответ: $A = 0,38 \text{ Дж.}$

3.4.14. Электрон, ускоренный разностью потенциалов 1000 В , влетает в однородное магнитное поле, перпендикулярное направлению его движения. Индукция магнитного поля равна $1,19 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$. Найти радиус кривизны траектории электрона.

Дано:
 $U = 10^3 \text{ В};$
 $\vec{V} \perp \vec{B};$
 $B = 1,19 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$
 $R = ?$

Решение. Работа, которую совершает электрическое поле, равна изменению кинетической энергии электрона

$$eU = \frac{mV^2}{2},$$

где e – заряд электрона; m – масса электрона; V – его скорость.

Отсюда

$$U = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (1)$$

На движущуюся заряженную частицу в магнитном поле действует сила Лоренца, которая является центростремительной силой

$$eVB = \frac{mV^2}{R}, \text{ откуда } eB = \frac{mV}{R}, \text{ тогда } R = \frac{mV}{eB}. \quad (2)$$

Подставим в выражение (2) формулу (1), получим

$$R = \frac{m}{eB} \sqrt{\frac{2eU}{m}} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{e}};$$

где $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}; e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$

Проверим размерность:

$$[R] = \frac{\sqrt{\text{кг} \cdot \text{В} / \text{Кл}}}{\text{Тл}} = \frac{1}{\text{Тл}} \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{Дж}}{\text{Кл} \cdot \text{Кл}}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{Тл} \cdot \text{Кл} \cdot \text{с}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{м}}{\text{Н} \cdot \text{Кл} \cdot \text{с}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}}{\text{Н} \cdot \text{Кл} \cdot \text{с}^2} = \text{м};$$

$$R = \frac{1}{1,19 \cdot 10^{-3}} \sqrt{\frac{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^3}{1,6 \cdot 10^{-19}}} = 9 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Ответ: $R = 9 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$

3.4.15. Замкнутая накоротко катушка диаметром 10 см, имеющая 200 витков, находится в магнитном поле, индукция которого изменяется от 2 до 6 Тл в течение 0,1 с. Определить среднее значение ЭДС индукции в катушке, если плоскость витков перпендикулярна к силовым линиям поля.

Д а н о:
 $d = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м};$
 $N = 200;$
 $B_1 = 2 \text{ Тл};$
 $B_2 = 6 \text{ Тл};$
 $\Delta t = 0,1 \text{ с}$

 $\varepsilon_i = ?$

Р е ш е н и е. ЭДС индукции определим из формулы

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} N,$$

где $\Delta \Phi / \Delta t$ – скорость изменения магнитного потока;
 N – число витков катушки,

$$\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = B_2 S - B_1 S = (B_2 - B_1) \cdot S,$$

где S – площадь витка, $S = \pi d^2 / 4$, тогда

$$\varepsilon_i = \frac{(B_2 - B_1) N \pi d^2}{4 \Delta t}.$$

Проверим размерность:

$$[\varepsilon_i] = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{с}} = \frac{\text{Вб}}{\text{с}} = \text{В};$$

$$\varepsilon_i = \frac{(6 - 2) \cdot 200 \cdot 3,14 \cdot (0,1)^2}{4 \cdot 0,1} = 62,8 \text{ В.}$$

Ответ: $\varepsilon_i = 62,8 \text{ В.}$

3.5. Задачи для самостоятельного решения

3.5.1. В модели атома водорода согласно теории Бора электрон вращается вокруг ядра атома, состоящего из одного протона. Найти:

1) силу взаимодействия между электроном и ядром, если электрон

находится на орбите радиусом $5 \cdot 10^{-9}$ см; 2) скорость обращения электрона.
(Ответ: $F = 9,2 \cdot 10^{-8}$ Н; $V = 2,26 \cdot 10^6$ м/с).

3.5.2. Два шарика одинакового радиуса и массы подвешены в воздухе так, что их поверхности соприкасаются. После того, как им сообщили заряд $8 \cdot 10^7$ Кл, шарики разошлись на угол 60° . Найти массу шарика, если длина подвеса 0,2 м. (Ответ: $m = 6,36 \cdot 10^{-3}$ кг).

3.5.3. Два заряда $9,0 \cdot 10^{-8}$ Кл и $1,6 \cdot 10^{-7}$ Кл помещены на расстоянии 5 см друг от друга. Определить напряжённость поля в точке, удалённой от первого заряда на 3,0 см и от второго на 4,0 см. (Ответ: $E = 1,27 \cdot 10^6$ В/м).

3.5.4. Какую работу требуется совершить для того, чтобы два заряда по $3 \cdot 10^{-6}$ Кл, находящиеся в воздухе на расстоянии 0,6 м друг от друга, сблизилась до 0,2 м? (Ответ: $A = 0,27$ Дж).

3.5.5. Какова скорость электрона, прошедшего в электрическом поле разность потенциалов 100 В? (Ответ: $V = 6 \cdot 10^6$ м/с).

3.5.6. Конденсатор заряжен до разности потенциалов 600 В и отключён от источника тока. Определить разность потенциалов между пластинами конденсатора, если расстояние между ними уменьшено вдвое. (Ответ: $\varphi_1 - \varphi_2 = 300$ В).

3.5.7. Определить ток короткого замыкания батареи ЭДС 12 В, если при подключении к ней сопротивления 2 Ом ток в цепи равен 5 А. (Ответ: $I = 30$ А).

3.5.8. При одном положении ручки реостата ток в цепи равен 2 А и напряжение на концах цепи 8 В, а при другом положении – соответственно 4 А и 6 В. Вычислить внутреннее сопротивление и ЭДС источника напряжения. (Ответ: $r = 1$ Ом; $\varepsilon = 10$ В).

3.5.9. Определить силу тока в обмотке трамвайного двигателя, развивающего силу тяги 5 кН, если напряжение в сети 550 В и трамвай движется со скоростью 30 км/ч. Коэффициент полезного действия двигателя 80 %. (Ответ: $I = 93$ А).

3.5.10. Спираль электроплитки изготовлена из нихромовой проволоки сечением 0,15 мм длиной 10 м. Сколько времени потребуется для нагревания 2 кг воды от 15°C до кипения, если плитка включена в сеть напряжением 220 В, КПД плитки 80 %? (Ответ: $t = 1350$ с = 22,5 мин).

3.5.11. Определить КПД электрочайника, если он за 20 мин нагревает 2 л воды от 8°C до кипения, потребляя мощность 710 Вт. (Ответ: $\eta = 90$ %).

3.5.12. В электрочайнике две секции. При включении в сеть одной из них вода закипает за 20 мин, при включении другой – за 30 мин. Сколько потребуется времени для кипячения воды при включении в сеть обеих секций: а) последовательно и б) параллельно? (Ответ: $t_1 = 3000$ с = 50 мин; $t_2 = 720$ с = 12 мин).

3.5.13. Между катодом и анодом двухэлектродной электронной лампы приложена разность потенциалов 300 В. Определить конечную скорость электронов у анода (если у катода она равна нулю), ускорение электрона и время его движения. Расстояние между катодом и анодом 10 мм. (Ответ: $V = 1,03 \cdot 10^7$ м/с; $a = 0,53 \cdot 10^{16}$ м/с²; $t = 1,95 \cdot 10^{-9}$ с).

3.5.14. В однородном магнитном поле индукцией 0,2 Тл находится прямой проводник длиной 0,2 м. Определить силу тока в проводнике, если известно, что при расположении его перпендикулярно к линиям индукции поля сила тяжести проводника, равная 0,4 Н, уравнивается силой, действующей на проводник со стороны поля. (Ответ: $I = 10$ А).

3.5.15. В однородное магнитное поле, индукция которого равна 10^{-2} Тл, влетает электрон перпендикулярно к силовым линиям со скоростью 10^6 м/с. Определить силу, действующую на электрон. (Ответ: $F = 1,6 \cdot 10^{-15}$ Н).

3.5.16. При никелировании пластины ее поверхность покрывают слоем никеля толщиной 0,05 мм. Определить среднюю плотность тока, если никелирование длится 2,5 ч. (Ответ: $i = 165$ А/м²).

3.5.17. В однородное магнитное поле, индукция которого равна 28,6 мкТл, помещён виток радиусом 20 см. Определить угол между плоскостью витка и силовой линией поля, если поток, проходящий через рамку, равен $1,6 \cdot 10^{-6}$ Вб. (Ответ: $\alpha = 64^\circ$).

3.5.18. Определить индуктивность катушки, если при изменении в ней тока от 5 до 10 А за 0,1 с в катушке возникает ЭДС самоиндукции, равная 10 В. (Ответ: $L = 0,2$ Гн).

3.5.19. Прямой проводник длиной 40 см движется в однородном магнитном поле со скоростью 5 м/с перпендикулярно к линиям индукции. ЭДС индукции между концами проводника 0,6 В. Определить индукцию магнитного поля. (Ответ: $B = 0,3$ Тл).

3.5.20. Сила тока в первичной обмотке понижающего трансформатора 0,6 А при напряжении на ее концах 120 В, сила тока во вторичной обмотке 4,8 А, а напряжение – 12 В. Определить КПД и коэффициент трансформации. (Ответ: $\eta = 80$ %; $K = 10$).

4. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

4.1. Механические колебания и волны

Колебаниями называют движения, многократно повторяющиеся через определённые промежутки времени.

Свободными называют **колебания**, возникающие вследствие какого-либо начального отклонения из состояния равновесия. Они совершаются телом под действием силы, пропорциональной смещению и направленной к положению равновесия: $F = -KX$.

Гармоническими называют **колебания**, при которых изменяющаяся со временем величина подчиняется закону синуса (или косинуса)

$$X = A \sin(\omega t + \varphi) \quad \text{или} \quad X = A \cos(\omega t + \varphi),$$

где A – амплитуда колебания; ω – циклическая частота, $\omega = 2\pi/T$; T – период колебания; $\omega t + \varphi$ – фаза колебания; φ – начальная фаза.

При колебаниях происходит превращение кинетической энергии в потенциальную и, наоборот, в полном соответствии с законом сохранения механической энергии. Полная энергия колебательной системы пропорциональна квадрату амплитуды

$$E = E_k + E_p = K \cdot A^2 / 2.$$

При наличии сил трения свободные колебания становятся затухающими – их амплитуда с течением времени уменьшается. Вынужденные колебания вызываются внешней периодически изменяющейся силой. Работа этой силы восполняет потери энергии на трение. **Резонанс** – это явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты вынуждающей силы и собственной частоты системы.

Механическая волна – это процесс распространения колебаний в упругой среде, сопровождающийся переносом энергии. Связь длины волны со скоростью её распространения и периодом имеет вид: $\lambda = V T$.

4.2. Электромагнитные колебания и волны

Электромагнитные колебания возникают в колебательном контуре, состоящем из конденсатора и катушки индуктивности, присоединённой к обкладкам конденсатора. Процесс возбуждения электромагнитных колебаний в контуре сопровождается периодическим изменением заряда и напряжения на обкладках конденсатора и силы тока, протекающего через индуктивность.

При колебательном процессе энергия электрического поля заряженного конденсатора $W_{\text{Э}} = C U^2 / 2$ преобразуется в энергию магнитного поля в катушке индуктивности $W_{\text{М}} = L I^2 / 2$ и обратно.

Период и частота собственных колебаний в контуре определяются формулами:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}; \quad \omega = \frac{2\pi}{T}; \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Любая автоколебательная система должна содержать: источник энергии; устройство, регулирующее поступление энергии от источника; колебательную систему; обратную связь, регулирующую поступление энергии от источника. Все эти элементы реализованы в ламповом гене-

раторе, представляющем собой автоколебательную систему для создания незатухающих колебаний.

Процесс распространения электромагнитных колебаний (электромагнитного поля) в пространстве с течением времени называют **электромагнитной волной**.

Существование электромагнитных волн следует из теории электромагнитного поля, созданной Максвеллом. Он показал, что скорость распространения электромагнитной волны является величиной конечной и в вакууме равна скорости света (т.е. $c = 3 \cdot 10^8$ м/с). Электромагнитные волны являются поперечными волнами, так как в каждой точке пространства электрическая напряжённость E , магнитная индукция B и скорость V распространения электромагнитной волны взаимно перпендикулярны.

Скорость распространения электромагнитной волны в среде зависит от электрических и магнитных свойств этой среды

$$V = c / \sqrt{\epsilon\mu},$$

где c – скорость электромагнитных волн в вакууме; ϵ , μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.

Свойства электромагнитных волн: распространяются прямолинейно, отражаются, преломляются, поглощаются, интерферируют, дифрагируют, поляризуются подобно световым волнам (свету).

А.С. Попов высказал идею о возможности практического использования электромагнитных волн для радиосвязи. Эту идею он сам же осуществил.

Датой изобретения радио считают 7 мая 1895 г.

Передача информации с помощью электромагнитных волн осуществляется путём их модуляции в передатчике и излучения в эфир открытым колебательным контуром (антенной).

В радио- или телевизионном приёмнике производится выделение принятой информации с помощью детектирования.

Электрический ток, величина и направление которого изменяются, называется **переменным**. Переменный ток в электрической цепи представляет собой вынужденные колебания, создаваемые генератором переменного тока на электростанции. В генераторе переменного тока используется явление электромагнитной индукции.

ЭДС индукции:

$$\epsilon = -\Phi' = -BS (\cos \omega t)' = BS \omega \sin \omega t = \epsilon_0 \sin \omega t,$$

где $\Phi = BS \cos \omega t$ – магнитный поток, пронизывающий равномерно вращающуюся в магнитном поле проволочную рамку; $\epsilon_0 = B S \omega$ – амплитуда ЭДС индукции, т.е. максимальное значение ЭДС.

Аналогично для напряжения и силы тока, гармонично изменяющихся с частотой ω , имеем:

$$U = U_0 \cos \omega t; \quad I = I_0 \cos \omega t.$$

Генератором переменного тока называют машину, превращающую механическую энергию в энергию переменного электрического тока.

Один из типов генераторов – генератор с неподвижной магнитной системой (индуктором) и вращающейся приёмной обмоткой (якорем), в которой индуцируется ЭДС. Однако данный тип генератора маломощен.

Под **эффективным** (действующим) **значением переменного тока** понимается значение такого постоянного тока, при котором на активном сопротивлении выделяется такая же мощность, как и при переменном, и численно равная $I = I_0 / \sqrt{2}$, для переменного напряжения $U = U_0 / \sqrt{2}$.

При резонансе в электрическом колебательном контуре с малым активным сопротивлением при совпадении частоты внешнего переменного напряжения с собственной частотой колебательного контура происходит резкое возрастание колебаний тока и напряжений на конденсаторе и катушке индуктивности. При резонансе индуктивное сопротивление равно ёмкостному $\omega L = 1/(\omega C)$, а сдвиг фаз между силой тока и напряжением становится равным нулю.

Трансформатором называют прибор, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты. Принцип действия трансформатора основан на использовании явления электромагнитной индукции.

Трансформатор состоит из замкнутого ферромагнитного сердечника (магнитопровода), на который надеты две катушки с обмотками из медной изолированной проволоки, содержащие различное число витков. Ту обмотку, которую подключают к источнику переменного тока, называют первичной, а ту, к которой подключаются потребители электроэнергии называют вторичной. Формула для определения коэффициента трансформации выводится при разомкнутой вторичной обмотке:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2} = K,$$

где N_1 и N_2 – соответственно число витков первичной и вторичной обмоток.

При замыкании вторичной обмотки трансформатора на потребителя энергии увеличение силы тока в цепи первичной обмотки происходит в соответствии с законом сохранения энергии: отдача электроэнергии в цепь, присоединяемую ко вторичной обмотке трансформатора, сопровождается потреблением от сети такой же энергии первичной обмоткой. Мощность в первичной цепи при этом должна приблизительно (за счёт потерь) равняться мощности во вторичной цепи:

$$I_1 U_1 \approx I_2 U_2, \quad \text{откуда } U_1 / U_2 \approx I_2 / I_1$$

В современных мощных трансформаторах суммарные потери не превышают 2–3 %.

4.3. Примеры решения задач

4.3.1. Написать уравнение гармонического колебательного движения с амплитудой 0,1 м, периодом 4 с и начальной фазой, равной нулю.

Д а н о:
 $A = 0,1 \text{ м};$
 $T = 4 \text{ с};$
 $\varphi = 0$
 $X = f(t)$

Р е ш е н и е. Запишем уравнение гармонического колебания:

$$X = A \sin(\omega t + \varphi) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi\right).$$

Подставляя в это уравнение данные задачи, получим:

$$X = 0,1 \sin \frac{2\pi}{4} t = 0,1 \sin 0,5\pi t.$$

Ответ: $X = 0,1 \sin 0,5 \pi t$.

4.3.2. Материальная точка массой 50 г совершает гармонические колебания по закону $X = 0,1 \sin 5t$, м. Найти силу, действующую на точку в положении максимального отклонения точки.

Д а н о:
 $m = 50 \text{ г} = 0,05 \text{ кг};$
 $X = 0,1 \sin 5 t, \text{ м}$
 $F_{\max} = ?$

Р е ш е н и е. По второму закону Ньютона

$$F = m a, \quad (1)$$

где a – ускорение точки,

$$a = -\omega^2 A \sin \omega t = -\omega^2 X. \quad (2)$$

Подставим выражение (2) в формулу (1):

$$F = -m \omega^2 X; \quad A = X_{\max}.$$

Уравнение гармонического колебания $X = A \sin \omega t$, а по условию

$$X = 0,1 \sin 5 t, \text{ значит } A = 0,1 \text{ м}; \quad \omega = 5 \text{ с}^{-1}, \text{ тогда}$$

$$F_{\max} = -m \omega^2 X_{\max} = -m \omega^2 A,$$

$$[F] = \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{м} = \text{Н}; \quad F_{\max} = -0,05 \cdot 5^2 \cdot 0,1 = 0,125 \text{ Н}.$$

Ответ: $F_{\max} = 0,125 \text{ Н}$.

4.3.3. Математический маятник длиной ℓ совершает колебания вблизи

Д а н о:
 $\ell_1 = \ell;$
 $\ell_2 = a = \ell / 2$
 $T = ?$

вертикальной стенки. Под точкой подвеса маятника, на расстоянии $a = \ell / 2$ от нее, в стенку вбит гвоздь (рис. 4.1). Найти период колебаний маятника.

Решение. Период колебаний такого маятника определяется суммой двух полупериодов колебаний маятников с длиной $\ell_1 = \ell$ и $\ell_2 = a = \ell / 2$

$$T = \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2} = \frac{T_1 + T_2}{2}.$$

Для маятника длиной ℓ_1 период T_1 равен $T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$.

Соответственно для маятника длиной L_2 период T_2 определяется соотношением

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{\ell_2}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{\ell/2}{g}}.$$

В результате получим

$$T = T_1 + T_2 = \pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right).$$

Ответ: $T = \pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right)$.

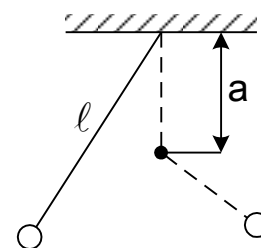


Рис. 4.1

4.3.4. Изменится ли частота колебаний пружинного маятника, если не меняя пружины, заменить в нём медный шарик свинцовым того же радиуса?

Решение. Масса свинцового шарика больше массы медного шарика того же радиуса, так как плотность свинца больше плотности меди. Собственная циклическая частота колебаний пружинного маятника $\omega = \sqrt{K/m}$. Значит при замене медного шарика свинцовым частота колебаний такого маятника уменьшится.

4.3.5. Колебательный контур состоит из катушки с индуктивностью 0,2 мГн и переменного конденсатора, ёмкость которого может меняться от 50 до 450 пФ. На какие длины волн рассчитан контур?

Дано:

$$L = 0,2 \text{ мГн} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Гн};$$

$$C_{\min} = 50 \text{ пФ} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ Ф};$$

$$C_{\max} = 450 \text{ пФ} = 4,5 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$$

$$\lambda_{\min} = ? \quad \lambda_{\max} = ?$$

Решение. Длина волны

$$\lambda = \nu T,$$

где T – период колебаний,

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

При изменении емкости от значения C_{\min} до C_{\max} период колебаний изменяется соответственно от

$$T_{\min} = 2\pi\sqrt{L C_{\min}} \quad \text{до} \quad T_{\max} = 2\pi\sqrt{L C_{\max}} .$$

Скорость электромагнитных волн $V = C = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Поэтому

$$\lambda_{\min} = 2\pi V \sqrt{L C_{\min}} ; \quad \lambda_{\max} = 2\pi V \sqrt{L C_{\max}}$$

$$\lambda_{\min} = 2 \cdot 3,14 \cdot 10^8 \sqrt{2 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-11}} = 188 \text{ м};$$

$$\lambda_{\max} = 2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^8 \sqrt{2 \cdot 10^{-4} \cdot 4,5 \cdot 10^{-10}} = 565 \text{ м},$$

т.е. колебательный контур рассчитан на длины волн от 188 до 565 м.

Ответ: $\lambda_{\min} = 188$ м; $\lambda_{\max} = 565$ м.

4.4. Задачи для самостоятельного решения

4.4.1. Материальная точка массой 0,01 кг совершает гармонические колебания, уравнение которых имеет вид: $X = 0,2 \sin 8\pi t$ (длина, см; время, с). Найти возвращающую силу в момент времени $t = 0,1$ с, а также полную энергию точки. (Ответ: $F = 7,42 \cdot 10^3$ Н; $E = 1,26 \cdot 10^{-5}$ Дж).

4.4.2. Материальная точка совершает колебания по закону косинуса. Начальная фаза колебаний равна нулю, амплитуда колебаний равна 10 м, период колебаний равен T . Определить смещение точки от положения равновесия в момент времени $t = T/4$; $t = T/2$. (Ответ: $X_1 = 0$; $X_2 = 10$ см).

4.4.3. Маятник – стальной шарик на нити массой 5 г имеет период колебаний 1,0 с. Когда под шариком поместили магнит, то период уменьшился до 0,8 с. Определить силу притяжения шарика к магниту. (Ответ: $F = 12,2$ мН).

4.4.4. На какую частоту настроен радиоприемник, если его приемный контур обладает индуктивностью 1,5 мГн и ёмкостью 450 пФ. (Ответ: $\nu = 1,94 \cdot 10^5$ Гц).

4.4.5. Катушка с индуктивностью 30 мкГн присоединена к плоскому конденсатору с площадью пластин $0,01 \text{ м}^2$ и расстоянием между ними 0,1 мм. Найти диэлектрическую проницаемость среды, заполняющей пространство между пластинами, если контур настроен на длину волны 750 м. (Ответ: $\epsilon = 6$).

4.4.6. Уравнение колебаний материальной точки массой $m = 10 \text{ г}$ имеет вид $x = 5 \sin\left(\frac{\pi}{5}t + \frac{\pi}{4}\right) \text{ см}$. Найти максимальную силу F_{\max} , действующую на точку, и полную энергию W колеблющейся точки. (Ответ: $F_{\max} = 1,97 \cdot 10^{-4}$ Н, $W = 4,93 \cdot 10^{-6}$ Дж.)

4.4.7. Найти отношение кинетической энергии W_k точки, совершаю-

щей гармоническое колебание, к ее потенциальной энергии W_n для моментов времени: а) $t = T/12$; б) $t = T/8$; в) $t = T/6$. Начальная фаза колебаний $\varphi = 0$. (Ответ: $W_k/W_n = 3, =1, =1/3$)

4.4.8. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью $C = 2,22 \text{ нФ}$ и катушки, намотанной из медной проволоки диаметром $d = 0,5 \text{ мм}$. Длина катушки $l = 20 \text{ см}$. Найти логарифмический коэффициент затухающих колебаний. (Ответ: $\chi = 0,018$)

4.4.9. Амплитуда гармонических колебаний материальной точки $A = 2 \text{ см}$, полная энергия колебаний $W = 0,3 \text{ мкДж}$. При каком смещении x от положения равновесия на колеблющуюся точку действует сила $F = 22,5 \text{ мкН}$? (Ответ: $x = 15 \text{ м}$)

4.4.10. К пружине подвешен груз массой $m = 10 \text{ кг}$. Зная, что пружина под влиянием силы $F = 9,8 \text{ Н}$ растягивается на $l = 1,5 \text{ см}$, найти период T вертикальных колебаний груза. (Ответ: $T = 0,77 \text{ с}$)

4.4.11. К пружине подвешен груз. Максимальная кинетическая энергия колебаний груза $W_{k_{\text{max}}} = 1 \text{ Дж}$. Амплитуда колебаний $A = 5 \text{ см}$. Найти жесткость пружины. (Ответ: $k = 800 \text{ Н/м}$)

4.4.12. Если увеличивать массу груза, подвешенного к спиральной пружине, на 600 г , то период колебаний возрастает в 2 раза. Определить массу первоначально подвешенного груза. (Ответ: $m_1 = 0,2 \text{ кг}$)

4.4.13. К пружине подвешена чаша весов с гирями, при этом период вертикальных колебаний $T_1 = 0,5 \text{ с}$. После того, как на чашу весов положили добавочные гири, период колебаний стал равным $T_2 = 0,6 \text{ с}$. На сколько удлинилась пружина от прибавления этого добавочного груза. (Ответ: $\Delta l = 0,027 \text{ м}$)

5. ОПТИКА. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

5.1. Оптика

Оптикой называется раздел физики, в котором изучаются явления и закономерности, связанные с возникновением, распространением и взаимодействием с веществом световых электромагнитных волн. По современным представлениям свет имеет двойственную природу: он является и волнами, и корпускулами (частицами), т.е. **свету присущ корпускулярно-волновой дуализм**.

Наблюдения показывают, что в однородной среде свет распространяется прямолинейно. Прямая, указывающая направление света, назы-

вается **световым лучом**. Оптически однородной называют среду с постоянным показателем преломления. Прямолинейное распространение света подтверждается явлением образования тени. Пучки световых лучей, пересекаясь, не интерферируют и распространяются после пересечения независимо друг от друга. При падении световых лучей на границу раздела двух сред, происходят явления отражения и преломления света.

Законы отражения света:

а) луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости;

б) угол падения равен углу отражения: $i=i'$ (рис. 5.1).

Законы отражения справедливы при обратном направлении хода световых лучей. Отражение света, удовлетворяющее этим законам, называется зеркальным. Если условие зеркальности отражения не выполняется, то законы отражения не справедливы, и отражение света называется диффузным.

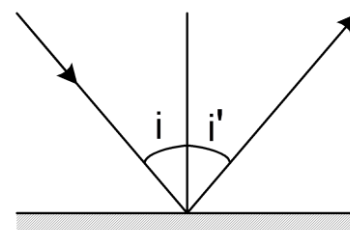


Рис. 5.1. Отражение света

Законы преломления света:

а) луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости;

б) отношение синуса угла падения i к синусу угла преломления r есть постоянная величина, зависящая только от оптических свойств граничащих сред и называемая показателем преломления n_{21} второй среды относительно первой (рис. 5.2):

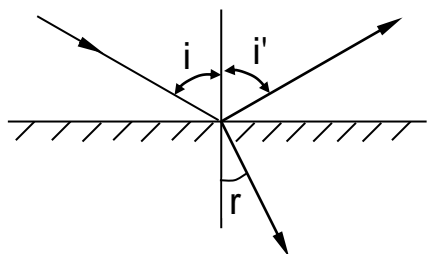


Рис. 5.2. Преломление света

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$$

Падающий и преломленный лучи взаимно обратимы: если падающий луч будет пущен по направлению преломленного луча, то луч преломленный пойдет по направлению падающего.

Если световые лучи из оптически более плотной среды переходят в оптически менее плотную среду, например из стекла в воду, то при углах падения больших, чем предельный угол, наблюдается явление полного отражения.

Предельный угол полного отражения определяется из закона преломления света

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1},$$

где n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления сред.

При $i = i_{\text{пред}}$ $r = 90^\circ$, тогда $\sin i_{\text{пред}} = n_2 / n_1$.

Если вторая среда воздух (или вакуум), где $n_2 = 1$, то

$$\sin i_{\text{пред}} = 1 / n.$$

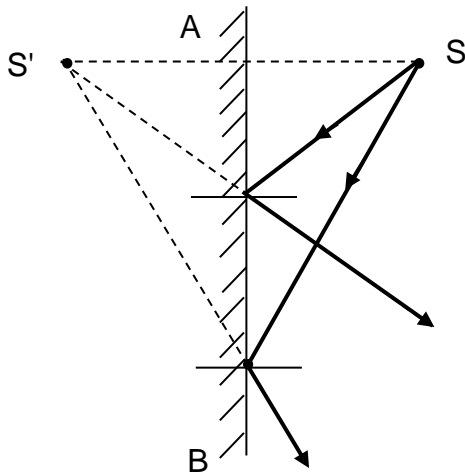


Рис. 5.3. Построение изображения точки S в плоском зеркале

Плоское зеркало – это зеркальная поверхность, отражающая свет. На рис. 5.3 представлено плоское зеркало AB, S – светящаяся точка перед зеркалом. Из точки S лучи выходят по разным направлениям и отражаются от зеркала расходящимся пучком; S' – мнимое изображение точки, находится на пересечении лучей (S' симметрично S). Зная как строится изображение точки, можно построить изображение предмета. Изображение в плоском зеркале получается мнимое, прямое, симметричное относительно плоскости зеркала, т.е. правая сторона предмета соответствует левой стороне изображения.

Линзой называют прозрачное тело, ограниченное с двух сторон кривыми поверхностями.

В частном случае одна из поверхностей может быть плоской. В большинстве практически важных случаев обе поверхности, ограничивающие линзу, являются сферическими. Прямая C_1C_2 , проведенная через центры кривизны, называется главной оптической осью линзы (рис. 5.4).

Лучи, идущие вдоль главной оптической оси, проходят через линзу, не преломляясь. Точка O называется оптическим центром линзы. Прямая A_1A_2 , проведенная через точку O, называется побочной оптической осью. Пучок лучей, падающих на линзу параллельно главной оптической оси, после преломления собирается в её фокусе F, лежащем на той же оси (рис. 5.5). Фокус рассеивающей линзы мнимый. Расстояние FO от фокуса до оптического центра линзы называют фокусным расстоянием F. Чем короче фокусное расстояние линзы, тем сильнее она преломляет свет.

Для характеристики преломляющей способности линзы вводится физическая величина, обратная фокусному расстоянию и называемая **оптической силой** D линзы $D = 1/F$. Оптическая сила связана с радиусами кривизны R_1 и R_2 поверхностей, ограничивающих линзу, и зависит от показателя преломления n вещества линзы:

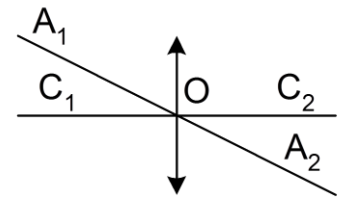


Рис. 5.4. Главная оптическая ось C_1C_2 и побочная оптическая ось линзы A_1A_2

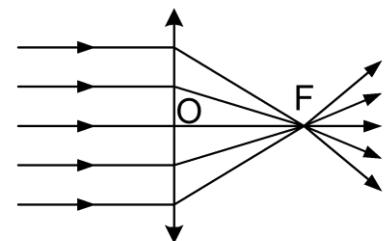


Рис. 5.5. Фокус собирающей линзы

$$D = \frac{1}{F} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Правила построения изображения в линзах подробно изложены в школьных учебниках.

Формула линзы $1/F = 1/d + 1/f$, где d – расстояние от предмета до линзы; f – расстояние от линзы до изображения.

Линейное увеличение линзы (отношение линейных размеров изображения и предмета) равно отношению расстояния от линзы до изображения к расстоянию от линзы до предмета:

$$\beta = H/h = f/d.$$

Интерференция и дифракция света являются убедительными доказательствами волновых свойств света. **Интерференция света** состоит в том, что при наложении двух пучков света может произойти не только усиление, но и ослабление света. Причём результат интерференции, т.е. усиление или ослабление интенсивности света зависит от соотношения фаз складываемых когерентных волн. В свою очередь, соотношение фаз в точке наблюдения определяется оптической разностью хода лучей

$$\Delta = n_2 S_2 - n_1 S_1,$$

где n_1 и n_2 – показатели преломления первой и второй сред; S_1 и S_2 – геометрические пути света.

Условие усиления света

$$\Delta_{\max} = K \lambda,$$

где $K = 1, 2, 3, \dots$; λ – длина волны света.

Условие ослабления света $\Delta_{\min} = (2K + 1) \frac{\lambda}{2}$, $K = 0, 1, 2, 3, \dots$.

Когерентные волны излучаются когерентными источниками. Когерентными называют источники волн, частоты колебаний которых одинаковы, а разность фаз постоянна. Два независимых источника света всегда некогерентны и не могут дать интерференционную картину чередующихся светлых и темных полос. Когерентные источники получают, разделяя естественный источник света на мнимые. Например, с помощью зеркал Френеля, бипризмы Френеля или щелей Юнга. Примером искусственного когерентного источника света может служить лазер. Явление интерференции света объясняет окраску тонких слоев прозрачных веществ (мыльная плёнка, тонкий слой нефти на воде). В этих случаях интерферируют лучи, отражённые от верхней и нижней поверхностей слоя.

Применение интерференции: определение толщины пластинок, проверка качества шлифовки поверхностей, измерений малых углов, малых изменений длины, просветлённая оптика и т.д.

Дифракцией называют огибание волнами препятствий, соизмеримых с длиной волны.

Дифракция света наблюдается только в тех случаях, когда среда, в которой распространяется свет, имеет резко выраженные оптические неоднородности, и размер неоднородности соизмерим с размерами световой волны (или волнового фронта). Дифракция света объясняется принципом Гюйгенса. Френель предложил способ расчёта интенсивности света при дифракции, дополнив принцип Гюйгенса понятием о когерентности вторичных волн.

На явлении дифракции основано устройство дифракционной решетки, которая представляет совокупность большого числа очень узких щелей, разделенных непрозрачными промежутками.

Максимумы света наблюдаются под углом φ , определяемым условием

$$d \sin \varphi = K \lambda,$$

где d – постоянная дифракционной решетки, равная сумме прозрачного и непрозрачного промежутков; $K = 1, 2, 3, 4, \dots$; λ – длина волны монохроматического света.

Так как положение максимумов зависит от длины волны, то решетка разлагает белый свет в спектр. Каждому значению K соответствует свой спектр. Дифракционная решетка является простейшим, достаточно точным устройством для измерения длины волн.

Дисперсия света – это зависимость показателя преломления от длины волны (частоты) света.

Ньютон установил, что в прозрачных средах показатель преломления световых лучей растёт с уменьшением длины волн, т.е. короткие фиолетовые лучи света преломляются веществом сильнее, чем длинноволновые – красные. В вакууме нет взаимодействия световых волн с электронами вещества и поэтому в вакууме дисперсии света не наблюдается.

В естественном свете в равной мере представлены электромагнитные волны со всевозможными направлениями векторов \vec{E} и \vec{B} . Поэтому естественный свет не поляризован.

Поляризованный свет – это свет с одним единственным направлением колебаний векторов \vec{E} и \vec{B} .

5.2. Элементы теории относительности

Принцип относительности в классической механике (принцип относительности Галилея) заключается в том, что во всех инерциальных системах отсчета законы механики одинаковы. Попытки распространять этот принцип на электромагнитные явления обнаружили противоречие между электродинамикой и механикой Ньютона. Противоречие устранено специальной теорией относительности Эйнштейна. Она основана на двух по-

стулатах. Смысл первого (главного) постулата в том, что все процессы природы (не только механические) протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчёта. Постоянство скорости света в вакууме во всех инерциальных системах отсчёта (второй постулат) является опытным фактом. Эта скорость есть предельная скорость передачи сигнала.

Зависимость массы тела от скорости выражается формулой

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \mathbf{V}^2 / c^2}}$$

и проявляется при движении тел со скоростями, близкими к скорости света в вакууме. Закон взаимосвязи массы и энергии $E = mc^2$ (формула Эйнштейна) – это один из универсальных законов природы.

Изменение энергии системы связано с изменением её массы соотношением

$$\Delta E = \Delta m c^2.$$

Любое тело обладает энергией покоя $E_0 = m_0 c^2$, что подтверждено в опытах по превращению элементарных частиц.

5.3. Квантовая физика

Фотоэффект – это прямое экспериментальное подтверждение квантовых свойств света, фотон как частица, взаимодействует с другой частицей – электроном. А.В. Столетов исследовал фотоэффект и результаты опытов обобщил в следующем законе: 1) число электронов, освобождённых светом за единицу времени, пропорционально световому потоку. Дальнейшее исследование позволило установить второй закон; 2) максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов пропорциональна частоте поглощаемого света и не зависит от его интенсивности.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта представляет собой закон сохранения энергии при взаимодействии фотона с электроном вещества:

$$h\nu = A + \frac{m\mathbf{V}^2}{2}.$$

Энергия фотона расходуется на работу выхода электрона из металла и сообщение электрону кинетической энергии.

Для того чтобы происходил фотоэффект, необходимо на металл направить свет минимальной частоты ν_0 , которая определяется из условия

$$h \nu_0 = A,$$

где ν_0 – минимальная частота света, называемая **красной границей** фотоэффекта; A – работа выхода электрона из металла.

Этой частоте соответствует длина волны $\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$.

5.4. Атом и атомное ядро

Ионизация газов и фотоэффект позволяют заключить, что в состав атома входят электроны. В обычном состоянии атом нейтрален, поэтому в нём должны содержаться и положительные заряды. Этот вывод был проверен опытами Резерфорда с α -частицами. α -частицы, испускаемые радиоактивными элементами, представляют собой ионизированные атомы гелия, потерявшие два электрона и имеющие поэтому положительный заряд, равный двум элементарным зарядам, $q = 2|e|$.

Ядерная модель атома предполагает, что весь положительный заряд атома сосредоточен в ядре – области, занимающей весьма малый объём всего атома. Остальную часть атома занимает облако отрицательно заряженных электронов. Количество протонов в ядре определяет количество электронов в отрицательно заряженном облаке и порядковый номер атома данного химического элемента в таблице Менделеева. Поскольку масса протона в 1836 раз больше массы электрона, то практически вся масса атома сосредоточена в ядре. Движущийся в таком атоме электрон с постоянным центростремительным ускорением должен, согласно законам электродинамики (как любой движущийся с ускорением заряд), излучать энергию. Опыты Резерфорда позволили создать ядерную модель атома, но не объяснили линейчатый спектр излучения атомов и их устойчивость. Бор расширил эту модель, дополнив её постулатами. Квантовые постулаты позволили устранить недостатки теории Резерфорда.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний): в атоме существуют стационарные квантовые состояния, не изменяющиеся с течением времени без внешних воздействий на атом. В этих состояниях атом не излучает электромагнитные волны. Каждому стационарному состоянию соответствует определённая энергия атома E_n . Стационарным состояниям атома соответствуют стационарные орбиты, по которым движутся электроны.

Второй постулат Бора (правило частот): излучение кванта энергии происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией E_m , в стационарное состояние с меньшей энергией E_n . Энергия фотона, излучённого атомом, равна разности энергий стационарных состояний:

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

Если $E_m > E_n$, то происходит излучение фотонов; если $E_m < E_n$ – поглощение фотонов.

Частота ν , которая испускается (поглощается) атомом,

$$\nu = \frac{E_m}{h} - \frac{E_n}{h}.$$

Второй постулат явился дальнейшим развитием идеи о квантовом характере излучения и поглощения света.

С помощью постулатов Бора можно определить орбитальную скорость электрона, радиус орбиты электрона, а также энергию и частоту квантов излучения, которая определяет положение данной линии в спектре, характерное для данного вида атома.

Лазер (оптический квантовый генератор) – это источник света, работающий на принципе вынужденного (стимулированного, индуцированного) излучения в оптическом диапазоне.

Лазеры являются самыми мощными источниками света. Лучи лазеров пробивают отверстия в твердых веществах (алмаз), используются при сварке микродеталей, в хирургии. Свет лазера монохроматичный, когерентный имеет острую направленность, что используется для связи, локации и др.

Свет, испускаемый различными светящимися телами, имеет определенный спектр, т.е. состоит из некоторого набора световых волн с различными их длинами. Раскаленные твердые тела испускают непрерывный спектр, в котором имеется излучение со всевозможными длинами волн. По такому спектру определить вещество светящегося тела невозможно. Разряженные светящиеся газы дают линейчатый спектр, состоящий из некоторого набора узких областей, называемых спектральными линиями. Каждая спектральная линия имеет определенную длину волны. Различные газы имеют различный спектр излучения. Каждое вещество в газообразном состоянии излучает характерный для него спектр определенного состава: по этому спектру можно отличить одно вещество от другого. Спектры, полученные при пропускании белого (с непрерывным спектром) света через светящиеся газы и содержащие темные полосы, характеризующие вещество газа, называются спектрами поглощения. Изучая спектры поглощения можно определить, из какого вещества состоит газ, через который был пропущен белый свет.

Определение состава вещества по спектру излучения или спектру поглощения называется **спектральным анализом**. Для этой цели вещество должно быть переведено в газообразное состояние (в пламени горелки, в электрической дуге или искре); затем должны быть измерены испускаемые им длины волн, а по таблицам установлено, каким веществам принадлежат эти волны.

При изучении радиоактивных превращений, а также новых частиц пользуются приборами, позволяющими регистрировать действие отдельных частиц. В зависимости от цели эксперимента применяются различные приборы, обнаруживающие ядерное излучение по произво-

димой ими ионизации и возбуждению атомов вещества. Разберите в школьном учебнике работу газоразрядного счетчика, камеры Вильсона, пузырьковой камеры и метода фотоэмульсий.

Элементы, расположенные в конце периодической системы Менделеева (уран, торий, радий и др.), радиоактивны, т.е. их ядра выбрасывают частицы и превращаются в ядра других элементов. Например, ядро атома ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ выбрасывает α – частицу (это есть ядро атома гелия, т.е. ${}_{2}\text{He}^4$) и превращается в радон ${}_{86}\text{Rn}^{222}$ – реакция запишется так:



Атомы, имеющие в ядре одинаковое число протонов, но различные числа нейтронов, называются **изотопами**. Например, имеются три изотопа водорода ${}_{1}\text{H}^1$, ${}_{1}\text{H}^2$, ${}_{1}\text{H}^3$: ${}_{1}\text{H}^1$ – легкий и два тяжелых – ${}_{1}\text{H}^2$ (дейтерий) и ${}_{1}\text{H}^3$ (тритий). **Радиоактивное излучение** состоит из положительно заряженных α -частиц, отрицательно заряженных β -частиц и электромагнитного излучения γ -лучей. Исследования показали, что α -частицы – дважды ионизированные атомы гелия; β -частицы – электроны, а длина волны γ -лучей меньше длины волны рентгеновских лучей, поэтому γ -излучения обладают огромной проникающей способностью. Радиоактивность веществ, найденных в природе, называется естественной. Радиоактивность может быть получена искусственно. Каждое радиоактивное вещество характеризуется периодом полураспада, т.е. временем, в течение которого число не распавшихся атомов уменьшается вдвое.

Исследования, проведенные Д. Иваненко и В. Гейзенбергом (1932 г.), привели к выводу, что **ядра** атомов всех элементов **состоят из протонов и нейтронов, получивших общее название нуклонов**. Обе эти частицы имеют практически одинаковую массу, но вторая не имеет заряда – она нейтральна. Число протонов в ядре равно порядковому номеру Z элемента в таблице Менделеева, число нейтронов равно $M - Z$, где M – атомная масса элемента.

Нуклоны в ядре удерживаются особой категорией сил, называемых ядерными, которые велики на расстояниях порядка 10^{-13} см между нуклонами и быстро убывают до нуля на расстояниях в два-три раза больших.

Энергия связи атомного ядра $\Delta E_{\text{св}}$ – это работа, которую надо совершить для расщепления ядра на составляющие его нуклоны без сообщения им кинетической энергии, а дефект массы – мера энергии связи атомного ядра, равная разности между суммарной массой всех нуклонов ядра в свободном состоянии и массой ядра $m_{\text{я}}$:

$$\Delta m = Z m_p + (M - Z) m_n - m_{\text{я}},$$

где Z – порядковый номер изотопа; m_p – масса протона; M – массовое

число; m_n – масса нейтрона; $m_{\text{я}}$ – масса ядра изотопа.

Взаимосвязь энергии связи ядра и дефекта массы вытекает из соотношения между энергией и массой $\Delta E_{\text{св}} = \Delta m c^2$.

Ядерной реакцией называется взаимодействие частицы с атомным ядром, приводящее к превращению этого ядра в новое ядро с выделением вторичных частиц или гама квантов. Ядерные реакции могут протекать с выделением или поглощением энергии. **Энергетический выход** ядерной реакции определяется соотношением:

$$\Delta E = \Delta m c^2 = (\sum m_1 - \sum m_2) c^2,$$

где Δm – разность масс частиц, вступающих в реакцию, и продуктов реакции; $\sum m_1$ – сумма масс частиц до реакции; $\sum m_2$ – сумма масс частиц после реакции.

Если $\sum m_1 > \sum m_2$, то реакция идет с выделением энергии, если же $\sum m_1 < \sum m_2$, то реакция идет с поглощением энергии.

Среди различных ядерных реакций особо важное значение в жизни современного человеческого общества имеют цепные реакции деления некоторых тяжелых ядер. Реакция деления ядер урана при бомбардировке их нейтронами была открыта в 1939 г., было установлено, что при попадании в ядро урана одного нейтрона, ядро делится на две-три части. Цепная реакция деления тяжелых ядер может развиваться при наличии критической массы тогда, когда на каждый нейтрон, вызвавший деление ядра, вновь образуются два или три нейтрона.

Синтез или соединение легких ядер в более тяжелые ядра (термоядерная реакция) может осуществляться при очень больших температурах и больших давлениях. Лишь только при таких условиях можно преодолеть кулоновские силы отталкивания положительно заряженных ядер.

Управляемые цепные реакции деления урана осуществляется в ядерных реакторах.

5.5. Примеры решения задач

5.5.1. Водолаз, находясь под водой, видит Солнце на высоте 60° над горизонтом (рис. 5.6). Определить действительную высоту Солнца над горизонтом.

Д а н о:

$$\varphi_1 = 60^\circ;$$

$$n = 1,33$$

$$\varphi_2 = ?$$

Р е ш е н и е. Согласно закону преломления света

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n, \text{ откуда } \sin i = n \sin r,$$

где n – показатель преломления воды.

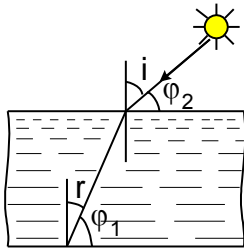


Рис. 5.6

Из рис. 5.6 видно, что

$$r = 90 - \varphi_1 = 90^\circ - 60^\circ = 30^\circ.$$

Следовательно,

$$\sin i = 1,33 \cdot 0,50 = 0,67; \quad i = 42^\circ.$$

Действительная высота Солнца над горизонтом

$$\varphi_2 = 90 - i = 48^\circ.$$

Ответ: $\varphi_2 = 48^\circ$

5.5.2. Луч, отражённый от поверхности воды, образует с преломленным лучом угол 90° . Определить угол падения и угол преломления (рис. 5.7).

Д а н о:

$$\beta = 90^\circ;$$

$$i = ?; \quad r = ?$$

Р е ш е н и е. Угол падения равен углу отражения:

$$i = i', \text{ а по закону преломления } \frac{\sin i}{\sin r} = n.$$

Из рис. 5.7 видно, что $r = 90^\circ - i'$, тогда

$$\sin r = \sin (90^\circ - i') = \cos i' = \cos i.$$

Отсюда

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin i}{\cos i} = \operatorname{tgi} = n; \quad n = 1,33; \quad \operatorname{tgi} = 1,33,$$

$$i = 53^\circ; \quad r = 90^\circ - 53^\circ = 37^\circ.$$

Ответ: $i = 53^\circ; \quad r = 37^\circ$.

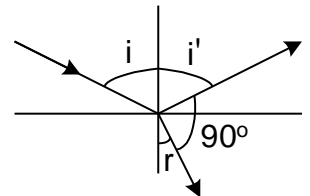


Рис. 5.7

5.5.3. Вычислить боковое смещение луча, вызываемое его прохождением через стеклянную плоскопараллельную пластинку толщиной 6 см, если угол падения равен 60° (рис. 5.8).

Д а н о:

$$d = 6 \text{ см} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$i = 60^\circ$$

$$l = ?$$

Р е ш е н и е. Из рис. 5.8 находим

$$l = AC \sin (i - r) = AC (\sin i \cos r - \cos i \sin r).$$

$$\text{Так как } AC = \frac{d}{\sin r},$$

$$\cos r = \sqrt{1 - \sin^2 r}, \text{ и } \sin r = \frac{\sin i}{n},$$

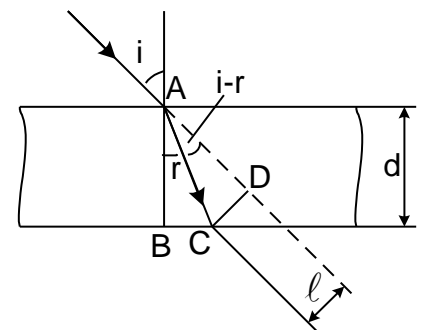


Рис. 5.8

где n – показатель преломления, для стекла

$n = 1,5$. Следовательно, подставив вместо AC и $\sin r$ их выражения в первую формулу, получим:

$$\begin{aligned} \ell &= \frac{dn}{\sin i} \left(\frac{\sin i \sqrt{n^2 - \sin^2 i}}{n} - \frac{\cos i \sin i}{n} \right) = \\ &= d \left(\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \cos i \right); \\ \ell &= 6 \cdot 10^{-2} \left(\sqrt{(1,5)^2 - (0,867)^2} - 0,5 \right) \approx 4 \cdot 10^{-2} \text{ м.} \end{aligned}$$

Ответ: $\ell = 4 \cdot 10^{-2}$ м.

5.5.4. Из центра плота в воду на глубину 10 м опущена электрическая лампочка. Какие минимальные размеры (длину и ширину) должен иметь плот, чтобы ни один луч от лампочки не мог пройти через поверхность воды?

<p>Дано: $h = 10$ м $a = ?$</p>	<p>Решение. Лучи света от лампочки не будут, преломляться в воздухе, если они падают на поверхность воды под углом, равным или большим предельного угла полного отражения i_0, который определяется по формуле</p>
---	---

$$\sin i_0 = \frac{1}{n},$$

где n – показатель преломления воды, $n = 1,33$. Из рис. 5.9

$$\operatorname{tg} i_0 = \frac{a/2}{h} = \frac{a}{2h},$$

откуда $a = 2h \operatorname{tg} i_0$. Найдём угол i_0 :

$$\sin i_0 = \frac{1}{1,33} = 0,75; \quad i_0 = 49^\circ,$$

тогда $a = 2 \cdot 10 \operatorname{tg} 49^\circ = 2 \cdot 10 \cdot 1,15 = 23$ м. Наименьшая ширина и длина плота должны быть равны 23 м.

Ответ: $a = 23$ м.

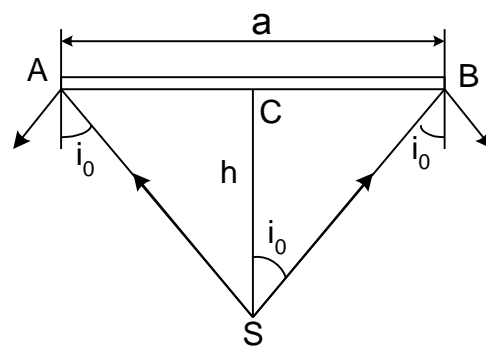


Рис. 5.9

5.5.5. На каком расстоянии от двояковыпуклой линзы следует поместить предмет, чтобы получить изображение, увеличенное в 2 раза? Фокусное расстояние линзы 60 см.

Д а н о:
 $\beta = 2$;
 $F = 60 \text{ см} = 0,6 \text{ м}$
 $d = ?$

Р е ш е н и е. Увеличение, даваемое линзой, $\beta = f/d$.
 Так как $\beta = 2$, то $f = 2d$.
 Если изображение действительное, то

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}; \quad \frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{2d}; \quad \frac{1}{F} = \frac{3}{2d},$$

откуда $d = \frac{3}{2}F$; $d = \frac{3}{2} \cdot 0,6 = 0,9 \text{ м}$.

Если изображение мнимое, то

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}; \quad \frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{2d}; \quad \frac{1}{F} = \frac{1}{2d},$$

откуда $d = \frac{F}{2} = 0,3 \text{ м}$.

Ответ: $d = 0,3 \text{ м}$.

5.5.6. Расстояние между электрической лампочкой и экраном 100 см. Помещая между лампочкой и экраном собирательную линзу, можно получить резкое изображение лампочки при двух положениях линзы, отстоящих друг от друга на 80 см. Определить фокусное расстояние линзы.

Д а н о:
 $l = 100 \text{ см} = 1 \text{ м}$;
 $a = 80 \text{ см} = 0,8 \text{ м}$
 $F = ?$

Р е ш е н и е. Из рис. 5.10 находим

$$f_1 = l - d_1, \quad f_2 = l - d_1 - a,$$

$$d_2 = d_1 + a.$$

Так как фокусное расстояние линзы

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}; \quad F = \frac{fd}{f+d}, \quad \text{то} \quad \frac{f_1 d_1}{f_1 + d_1} = \frac{f_2 d_2}{f_2 + d_2},$$

но $f_1 + d_1 = f_2 + d_2 = l$.

Значит

$$f_1 d_1 = f_2 d_2,$$

$$(l - d_1) d_1 = (l - d_1 - a)(d_1 + a),$$

$$la - a^2 - 2d_1 a = 0, \quad d_1 = \frac{l - a}{2},$$

$$f_1 = l - \frac{l - a}{2} = \frac{l + a}{2}.$$

Найдем F:

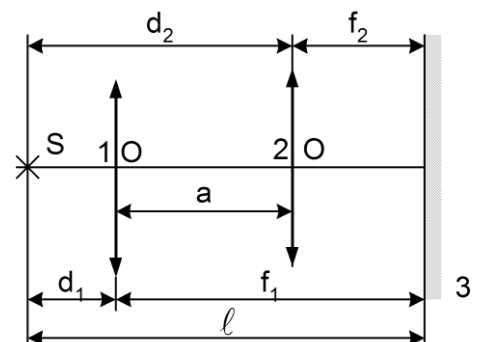


Рис. 5.10

$$F = \frac{\frac{l-a}{2} \cdot \frac{l+a}{2}}{\frac{l-a}{2} + \frac{l+a}{2}} = \frac{l^2 - a^2}{4l};$$

$$F = \frac{1 - (0,8)^2}{4 \cdot 1} = 9 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 9 \text{ см.}$$

Ответ: $F = 9 \text{ см.}$

5.5.7. На мыльную плёнку падает белый свет под углом 45° (рис. 5.11). При какой наименьшей толщине плёнки отражённые лучи будут окрашены в жёлтый цвет ($\lambda = 600 \text{ нм}$) ?

Дано:

$$i = 45^\circ;$$

$$\lambda = 600 \text{ нм} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$h_{\min} = ?$$

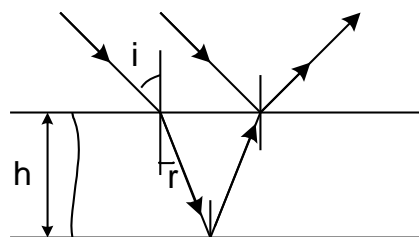


Рис. 5.11

Решение. Результат интерференции света в тонкой плёнке (в отражённом свете) при усилении света определяется по формуле

$$2h n \cos r = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

где h – толщина плёнки; n – показатель преломления, для мыльной воды $n = 1,33$; r – угол преломления; $k = 0, 1, 2, 3, \dots$; λ – длина волны света;

$$\cos r = \sqrt{1 - \sin^2 r}, \text{ но } \frac{\sin i}{\sin r} = n, \text{ откуда } \sin r = \frac{\sin i}{n},$$

тогда $\cos r = \sqrt{\frac{n^2 - \sin^2 i}{n^2}}$, подставим в первую формулу

$$2h \sqrt{n^2 - \sin^2 i} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

где i – угол падения;

$$h = h_{\min} \text{ при } k = 0, \text{ тогда } 2h_{\min} \sqrt{n^2 - \sin^2 i} = \frac{\lambda}{2},$$

$$h_{\min} = \frac{\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}; \quad h_{\min} = \frac{6 \cdot 10^{-7}}{4\sqrt{(1,33)^2 - (0,707)^2}} = 1,33 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Ответ: $h_{\min} = 1,3 \cdot 10^{-7}$ м.

5.5.8. В установке для наблюдения колец Ньютона пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено жидкостью (рис. 5.12).

Определить показатель преломления жидкости, если радиус третьего светлого кольца равен 3,65 мм. Наблюдение ведётся в проходящем свете. Радиус кривизны линзы 10 м. Длина волны света $5,69 \cdot 10^{-7}$ м.

Д а н о:

$$r = 3,65 \text{ мм} = 3,65 \cdot 10^{-3};$$

$$k = 3;$$

$$R = 10 \text{ м};$$

$$\lambda = 5,89 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$n = ?$$

Р е ш е н и е. Места равной толщины жидкой прослойки представляют собой окружности (кольца) с центром в точке О, где линза касается пластинки.

При наблюдении в проходящем свете разность хода Δ

$= 2hn$, где h – толщина слоя жидкости между линзой и пластинкой; n – показатель преломления жидкости.

Светлые интерференционные кольца образуются в том случае, если в оптическую разность хода укладывается чётное число полуволн или целое число длин волн, т.е. $\Delta = 2hn = k\lambda$, где $k = 1, 2, 3$ – целое число.

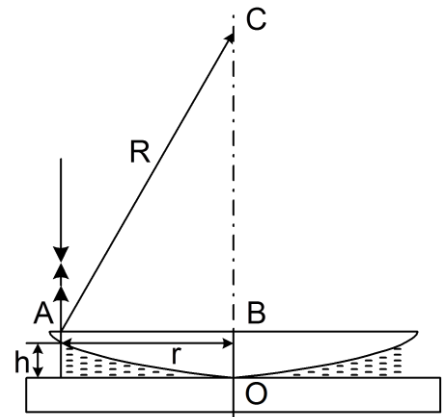


Рис. 5.12

Из треугольника ABC (рис. 5.12) имеем $r^2 = R^2 - (R-h)^2 = 2Rh - h^2$, откуда, пренебрегая h^2 , так как $R \gg h$, получаем

$$h \approx \frac{r^2}{2R}.$$

Подставив это выражение в формулу для разности хода, получим

$$\frac{nr^2}{R} = k\lambda, \quad \text{откуда} \quad n = \frac{k\lambda R}{r^2}.$$

Подставим числовые значения

$$n = \frac{3 \cdot 5,89 \cdot 10^{-7} \cdot 10}{(3,65 \cdot 10^{-3})^2} = 1,33.$$

Ответ: $n = 1,33$.

5.5.9. Для измерения длины световой волны применена дифракционная решетка, имеющая 100 штрихов на 1 мм. Первый дифракционный максимум получен на экране на расстоянии 12 см от центрального. Расстояние от дифракционной решетки до экрана 2 м (рис. 5.13). Определить длину световой волны.

Д а н о:
 $N = 100 \text{ мм}^{-1} = 10^5 \text{ м}^{-1}$;
 $x = 12 \text{ см} = 0,12 \text{ м}$;
 $K = 1$;
 $\ell = 2 \text{ м}$
 $\lambda = ?$

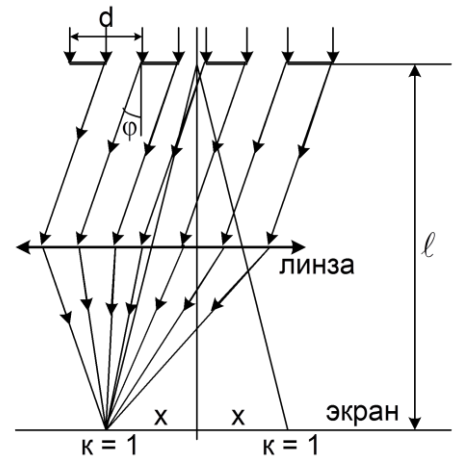


Рис. 5.13

Р е ш е н и е. Формула дифракционной решетки

$$d \sin \varphi = k \lambda,$$

где d – постоянная дифракционной решетки

$$d = \frac{1}{N} = \frac{1}{10^5} = 10^{-5} \text{ м}.$$

Так как угол отклонения мал, то

$$\sin \varphi = \operatorname{tg} \varphi = x / \ell, \quad k = 1,$$

поэтому

$$d \frac{x}{\ell} = \lambda;$$

$$\lambda = \frac{10^{-5} \cdot 0,12}{2} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 0,6 \text{ мкм}.$$

Ответ: $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$.

5.5.10. Сколько штрихов на 1 мм должна иметь дифракционная решетка, если зелёная линия ртути ($\lambda = 5461 \text{ \AA}$) в спектре первого порядка наблюдается под углом $19^{\circ}08'$? $1 \text{ \AA} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

Дано:

$$\lambda = 5461 \text{ \AA} = 5,461 \cdot 10^{-7} \text{ м};$$

$$k = 1;$$

$$\varphi = 19^{\circ}08'$$

$$N = ?$$

Решение. Из формулы дифракционной решетки определим постоянную решетки

$$d \sin \varphi = k \lambda,$$

откуда

$$d = \frac{k \lambda}{\sin \varphi}.$$

$$\text{Число штрихов на 1 мм } N = \frac{1}{d} = \frac{\sin \varphi}{k \lambda},$$

$$N = \frac{\sin 19^{\circ}08'}{1 \cdot 5,461 \cdot 10^{-7}} = \frac{0,328}{5,461 \cdot 10^{-7}} = 6 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1} = 600 \text{ мм}^{-1}.$$

Ответ: $N = 600 \text{ мм}^{-1}$.

5.5.11. Во сколько раз энергия фотона рентгеновского излучения с длиной волны 1 \AA больше энергии фотона видимого света с длиной волны $0,4 \text{ мкм}$?

Дано:

$$\lambda_1 = 1 \text{ \AA} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ м};$$

$$\lambda_2 = 0,4 \text{ мкм} = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$\varepsilon_1 / \varepsilon_2 = ?$$

Решение. Энергия фотона рентгеновского излучения

$$\varepsilon_1 = h \frac{c}{\lambda_1}.$$

Энергия фотона видимого света

$$\varepsilon_2 = h \frac{c}{\lambda_2},$$

где h – постоянная Планка; c – скорость света.

Отсюда

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{hc \lambda_2}{hc \lambda_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}; \quad \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{0,4 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-10}} = 4 \cdot 10^3.$$

Ответ: $\varepsilon_1 / \varepsilon_2 = 4 \cdot 10^3$.

5.5.12. Красная граница фотоэффекта для вольфрама равна 2750 \AA . Найти: 1) работу выхода электрона; 2) максимальную скорость электронов, вырываемых из вольфрама светом с длиной волны 1800 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$).

Д а н о:

$$\lambda_0 = 2750 \text{ \AA} = 2,75 \cdot 10^{-7} \text{ м};$$

$$\lambda = 1800 \text{ \AA} = 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$A = ? \quad V_{\max} = ?$$

Р е ш е н и е. В случае красной границы фотоэффекта

$$hc / \lambda_0 = A,$$

где h – постоянная Планка; c – скорость света; λ_0 – наибольшая длина волны света, при которой еще возможен фотоэффект с поверхности данного металла; A – работа выхода электрона;

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}, \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}, \quad m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}.$$

Работа выхода электрона

$$A = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2,75 \cdot 10^{-7}} = 7,22 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = \frac{7,22 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} = 4,5 \text{ эВ},$$

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda} = A + \frac{m V_{\max}^2}{2},$$

где ν – частота; m – масса электрона.

Максимальная скорость электрона равна

$$\frac{m V_{\max}^2}{2} = \frac{hc}{\lambda} - A,$$

откуда

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2hc - 2A\lambda}{m\lambda}};$$

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 - 2 \cdot 7,22 \cdot 10^{-19} \cdot 1,8 \cdot 10^{-7}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,8 \cdot 10^{-7}}} = 9,1 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

Ответ: $A = 4,5 \text{ эВ}$; $V_{\max} = 9,1 \cdot 10^5 \text{ м/с}$.

5.5.13. При переходе электрона в атоме водорода с одного энергетического уровня на другой энергия атома уменьшилась на $1,892 \text{ эВ}$. При этом атом излучил квант света. Определить длину волны излучения

(1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж).

Д а н о:

$$\Delta E = 1,892 \text{ эВ} = 1,892 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = \\ = 3,03 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$$

$\lambda = ?$

Р е ш е н и е. Из постулатов Бора известно, что при переходе из одного стационарного состояния в другое атом испускает квант света

$$h\nu = E_2 - E_1, \text{ но } \nu = \frac{c}{\lambda},$$

$$E_2 - E_1 = \Delta E, \text{ тогда } \Delta E = \frac{hc}{\lambda},$$

$$\text{откуда } \lambda = \frac{hc}{\Delta E}; \lambda = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3,03 \cdot 10^{-19}} = 6,56 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Ответ: $\lambda = 6,56 \cdot 10^{-7}$ м.

5.5.14. При радиоактивном распаде из ядра ${}_{92}\text{U}^{238}$ испускается α -частица. Написать ядерную реакцию. В ядро какого элемента превращается при этом ядро атома урана?

Р е ш е н и е.



Ответ: образуется ядро изотопа тория.

5.5.15. Найти число протонов и нейтронов, входящих в состав ядер изотопов магния ${}_{12}\text{Mg}^{24}$, ${}_{12}\text{Mg}^{25}$, ${}_{12}\text{Mg}^{26}$.

Р е ш е н и е. В состав ядра изотопа ${}_{12}\text{Mg}^{24}$ входит 12 протонов и 12 нейтронов, а в состав ядер изотопа магния ${}_{12}\text{Mg}^{25}$ – 12 протонов и 13 нейтронов, а ${}_{12}\text{Mg}^{26}$ – 12 протонов и 14 нейтронов.

5.6. Задачи для самостоятельного решения

5.6.1. Луч света падает на плоскопараллельную стеклянную пластинку под углом 60° . Какова толщина пластинки, если на выходе из нее луч сместился на 20 мм, показатель преломления стекла 1,5? (Ответ: $d = 39$ мм).

5.6.2. Определить на сколько изменится длина волны зеленых лучей при переходе из воды в стекло, если показатель преломления воды 1,3; стекла 1,5, а длина волны зелёных лучей в вакууме $5,5 \cdot 10^{-7}$ м. (Ответ: $\Delta\lambda = 5,64 \cdot 10^{-8}$ м).

5.6.3. Определить предельный угол полного отражения для алмаза в

воздухе и воде. (Ответ: $i_{01} = 23^\circ 11'$; $i_{02} = 31^\circ 34'$).

5.6.4. На какой угол повернется луч, отраженный от плоского зеркала, при повороте последнего на угол α ? (Ответ: $\varphi = 2\alpha$).

5.6.5. На каком расстоянии от двояковыпуклой линзы, перпендикулярно к оптической оси, нужно поместить предмет высотой 3 см, чтобы получить изображение размером 12 см? Фокусное расстояние линзы $F = 20$ см. (Ответ: $d_1 = 25$ см, $d_2 = 15$ см).

5.6.6. Изображение предмета, удаленного от тонкой собирающей линзы на расстояние 0,4 м, больше предмета в 5 раз. Определить возможные значения оптической силы линзы. (Ответ: $F = 0,125$ м, $D = 8$ диоптрий).

5.6.7. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим нормально, с длиной волны $6 \cdot 10^{-7}$ м. Найти толщину воздушного слоя между линзой и стеклянной пластинкой в том месте, где наблюдается четвертое темное кольцо в отраженном свете. (Ответ: $h = 1,2 \cdot 10^{-6}$ м).

5.6.8. На дифракционную решетку нормально падает свет от натриевого пламени ($\lambda = 5,89 \cdot 10^{-7}$ м). При этом для спектра третьего порядка получается угол отклонения $10^\circ 11'$. Какова длина волны, для которой угол отклонения во втором порядке равен $6^\circ 16'$? (Ответ: $\lambda_1 = 5,46 \cdot 10^{-7}$ м).

5.6.9. На поверхность металла падают монохроматические лучи с длиной волны 0,1 мкм. Красная граница фотоэффекта 0,3 мкм. Какая доля энергии фотона расходуется на сообщение электрону кинетической энергии? (Ответ: $\Delta E_k / \varepsilon = 0,67$).

5.6.10. Какой должна быть длина волны ультрафиолетовых лучей, падающих на поверхность цинка, чтобы скорость вылетающих фотоэлектронов составляла 1000 км/с. Работа выхода электронов из цинка $6,4 \cdot 10^{-19}$ Дж. (Ответ: $\lambda = 1,8 \cdot 10^{-7}$ м).

5.6.11. Красная граница фотоэффекта у лития 520 нм. Какую обратную разность потенциалов (задерживающее напряжение) нужно приложить к фотоэлементу, чтобы задержать электроны, испускаемые литием под действием ультрафиолетовых лучей длиной волны 200 нм. (Ответ: $U = 3,8$ В).

5.6.12. Как изменилась кинетическая энергия электрона в атоме водорода при излучении с длиной волны $4,86 \cdot 10^{-7}$ м (Ответ: $\Delta E_k = 2,56$ эВ).

5.6.13. Вычислить частоту обращения электрона в атоме водорода на второй орбите. (Ответ: $n = 8,3 \cdot 10^{14}$ с $^{-1}$).

5.6.14. Определить энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьей орбиты на первую. (Ответ: $\varepsilon = 12,1$ эВ).

5.6.15. Найти наименьшую энергию, которую нужно затратить, чтобы оторвать один нейтрон от ядра ${}^7_3\text{N}^{14}$. (Ответ: $E = 7,45$ МэВ).

5.6.16. Вычислить энергию связи ядра дейтерия ${}^2_1\text{H}$ и трития ${}^3_1\text{H}$. (Ответ: $E_1 = 1,72$ МэВ, $E_2 = 7,57$ МэВ).

5.6.17. Определить порядковый номер и массовое число изотопа, который получится из тория ${}_{90}\text{Th}^{232}$ после трех альфа-распадов и двух бета-распадов. (Ответ: $Z = 80$).

5.6.18. Вычислить энергию реакции ${}_{4}\text{Be}^9 (\alpha, n) {}_{6}\text{C}^{12}$. (Ответ: $E = 5,7$ МэВ).

5.6.19. Какая энергия соответствует 1 а.е.м. (Ответ: $E = 931$ МэВ).

5.6.20. При обстреле ядер бора ${}_{5}\text{B}^{11}$ протонами получается ${}_{4}\text{Be}^8$. Какие еще ядра получаются при этой реакции? (Ответ: ${}_{2}\text{He}^4$).

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
----------------	---

ПРОГРАММА ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ ПОСТУПАЮЩИХ В ВЫСШИЕ УЧЕБНЫЕ ЗАВЕДЕНИЯ	4
1. МЕХАНИКА	8
1.1. Кинематика.....	8
1.2. Основы динамики	11
1.3. Законы сохранения в механике	12
1.4. Примеры решения задач.....	13
1.5. Задачи для самостоятельного решения.....	29
2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ.....	31
2.1. Жидкости и газы.....	31
2.2. Основы молекулярно-кинетической теории	33
2.3. Тепловые явления	35
2.4. Примеры решения задач.....	38
2.5. Задачи для самостоятельного решения.....	47
3. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ	49
3.1. Электростатика	49
3.2. Законы постоянного тока.....	52
3.3. Магнитное поле. Электромагнитная индукция.....	57
3.4. Примеры решения задач.....	59
3.5. Задачи для самостоятельного решения.....	71
4. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ	73
4.1. Механические колебания и волны.....	73
4.2. Электромагнитные колебания и волны	74
4.3. Примеры решения задач.....	77
4.4. Задачи для самостоятельного решения.....	79
5. ОПТИКА. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА	80
5.1. Оптика	80
5.2. Элементы теории относительности.....	84
5.3. Квантовая физика	85
5.4. Атом и атомное ядро	86
5.5. Примеры решения задач.....	89
5.6. Задачи для самостоятельного решения.....	98

