МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ЮЖНО-КАЗАХСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. М.АУЭЗОВА

Кафедра «Высшая математика и физика
для технических специальностей»

Пономаренко Е.В.

Методические указания
по организации и выполнению самостоятельной работы студентов по дисциплине «Физика» для студентов специальности 5В073200 - Стандартизация и сертификация

Шымкент – 2017 г.

УДК 53:005.216

Составитель: Пономаренко Е.В. Методические указания по организации и выполнению самостоятельной работы студентов по дисциплине «Физика» для студентов специальности 5В073200 – Стандартизация и сертификация. – Шымкент: ЮКГУ им. М. Ауэзова, 2017. – 120 с.

Методические указания по организации и выполнению самостоятельной работы студентов по дисциплине составлены в соответствии с требованиями учебного плана и программой дисциплины «Физика» и включают все необходимые сведения для организации и выполнения самостоятельной работы студента.

Методические указания соответствуют типовой программе, рабочей учебной программе, силлабусу, и содержат тематику и учебные материалы СРС по модулям, требования к выполнению СРС, вопросы самоконтроля, рубежных контролей, текущего контроля, рекомендуемую литературу и т.д.

Методические указания по организации и выполнению самостоятельной работы студентов по дисциплине «Физика» предназначены для студентов специальности 5В073200 – Стандартизация и сертификация.

Рецензент: Мусаев Ж.М. – к.х.н., проф. каф. «Высшая математика и физика для технических специальностей» ЮКГУ им. М. Ауэзова

Рассмотрено и рекомендовано к печати заседанием кафедры
«Высшая математика и физика для технических специальностей»
(протокол № ____ от «_____»_____2017 г.)
и методической комиссией факультета «Механика и нефтегазовое дело»
(протокол № ____ от «_____»_____2017 г.)

Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом ЮКГУ им. М.Ауэзова,
протокол № ____ от «____»_____2017 г.

© Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова, 2017г.

Ответственный за выпуск: Пономаренко Е.В.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
ТЕМАТИКА СРС ПО МОДУЛЯМ 5
УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ СРС ПО МОДУЛЯМ 9
ПРИМЕРЫ ВОПРОСОВ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ 84
ПРИМЕРЫ ВОПРОСОВ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ 95
ПРИМЕРЫ ВОПРОСОВ РУБЕЖНОГО КОНТРОЛЯ 97
ПРИМЕРЫ ВОПРОСОВ ВОУД ПО ДИСЦИПЛИНЕ 109
ЛИТЕРАТУРА 116

ВВЕДЕНИЕ

Под самостоятельной работой студентов понимают разнообразные виды их индивидуальной или групповой познавательной деятельности. Самостоятельная работа студентов подразделяется на СРСП (самостоятельную работу студентов под руководством преподавателя во время аудиторных учебных занятий) и СРС (самостоятельную работу студентов во внеаудиторное время).

СРСП проводится с целью закрепления знаний и может проводиться на семинарских, практических или лабораторных занятиях. Задания для СРСП могут быть самые различные: устные ответы, контрольные работы, компьютерные презентации, решение задач, проведение деловых игр, составление глоссария и др. При кредитной системе обучения обязательным считается систематический мониторинг прогресса обучения.

Внеаудиторная СРС – это основной вид учебной деятельности, которая планируется и организуется самим студентом с помощью методических указаний. Она включает текущую подготовку к лекционным, лабораторным занятиям, выполнение курсовых проектов и работ, подготовку к экзаменам и т.д. А вообще СРС организуется на лекциях, семинарах, практических занятиях, во время проведения рубежного контроля, при непосредственном и активном участии преподавателя.

Данное методическое указание составлено с целью оказать помощь студенту в подготовке СРС. В пособии представлен материал, который необходимо изучить самостоятельно, приводится справочный материал, вопросы для самоконтроля знаний по каждой теме, которые разбираются на СРСП. Все задания должны быть сданы согласно датам, указанным в силлабусе. Задания, выполненные с опозданием, оцениваются меньше на 20%.

Сложность заданий различна, что позволяет обеспечить дифференцированный подход к уровню и качеству подготовки специалиста в зависимости от уровня его начальных базовых знаний, успеваемости, глубины изучаемого материала, дополнительных тем.

Задания по СРС направлены на развитие способностей студентов к творческой работе, анализу, поиску закономерностей. Задания СРС соответствуют учебным возможностям студентов.

Все виды СРС могут проводиться разными методическими приемами в различных сочетаниях.

ТЕМАТИКА СРС ПО МОДУЛЯМ

Модуль 1 Механика, молекулярная физика и термодинамика, электричество и магнетизм

СРС 1 Составить глоссарий по теме «Механика»: Система отсчета. Материальная точка. Перемещение. Скорость. Ускорение. Угловая скорость. Угловое ускорение. Инерциальные системы отсчета. Система материальных точек. Внешние силы. Внутренние силы. Момент силы. Момент инерции. Импульс. Момент импульса. Кинетическая энергия. Потенциальная энергия. Консервативные силы. Неконсервативные силы. Математический маятник. Физический маятник. Плоская волна. Бегущая волна. Стоячая волна. Фазовая скорость.

Форма сдачи СРС: Устный опрос

Дата сдачи: 3 неделя.

Требования и рекомендуемый объем работы: не более 3 стр. формата А-4, рукописных либо набранных на компьютере.

Примечание: Составление глоссария означает определение терминов и понятий. Необходимо также указывать источник, откуда взято то или иное определение.

СРС 2 Подготовить презентацию (тема на выбор студента):

Тема 1. Силы в механике.
Тема 2. Фазовые переходы, равновесия и превращения.
Тема 3. Машиностроительная гидравлика.
Тема 4. Звук. Ультразвук и его применение в технике. Шумы.
Тема 5. Реактивное движение. Гироскоп. Гироскопический эффект.
Тема 6. Жидкости, поверхностное натяжение в жидкостях, охлаждение жидкости при испарении, терморегуляция растений и животных.
Тема 7. Смачивающие и несмачивающие жидкости. Капиллярные явления. Формула Лапласа.
Тема 8. Понятие о термодинамике необратимых процессов и открытых систем. Энтропия в системе организм-окружающая среда.
Тема 9. Производство энтропии в неравновесной среде и теорема Пригожина.
Тема 10. Проводники и диэлектрики в электростатическом поле.
Тема 11. Электрический ток в газах и в плазме.
Тема 12. Ферромагнетики, диамагнетики, парамагнетики
Тема 13. Магнитосфера Земли. Эффект Холла.

Форма сдачи СРС: защита, выступление

Срок сдачи СРС: 5 неделя

Примечание: Презентация (представление информации в форме компьютерной презентации) - это выбор студентом определенной темы и выражение своего видения, творческого понимания какого-либо аспекта темы. Чтобы защитить презентацию, необходимо выступить на аудиторном или внеаудиторном занятии.

Требования и рекомендуемый объем работы: не менее 20 слайдов, обязательно содержание, основная часть, заключение, список литературы. Также желательно применить знания, полученные на занятиях по информатике: использовать анимации и иные возможности компьютерной техники.

СРС 3 Составить конспект по теме «Магнитное поле в веществе» (с указанием литературы) по следующему плану: Магнетики. Виды магнетиков. Диамагнетики. Парамагнетики. Ферромагнетики. Магнитный гистерезис. Температура Кюри. Закон полного тока для магнитного поля в веществе.

Форма сдачи СРС: Письменный/устный опрос

Дата сдачи: 7 неделя

Требования и рекомендуемый объем работы: не более 5 стр. формата А-4, рукописных либо набранных на компьютере. Желательно представить информацию в структурированном виде, в виде таблиц и схем.

Примечание: Устное изложение материала – студент излагает материал на заданную тему в соответствии с вопросами по самоподготовке. Оценивается: насколько раскрыта тема, интерес слушателей, использование литературы. Письменный опрос – это наборы специальных заданий, проверяющих знания студента по выбранной теме.

СРС 4 Опрос по формулам по 1 модулю

Форма сдачи СРС: Письменный/устный опрос

Дата сдачи: 7 неделя

Примечание: студент должен знать теоретический материал по изучаемой дисциплине в полном объеме. Преподаватель проверяет знание студента всех формул по тому или иному разделу изученного материала.

Оценивается: правильность и точность формулировок, знание используемых обозначений физических величин и физических постоянных, а также знание единиц их измерения.

Внимание! В связи с необходимостью подготовки к ВОУД по физике, студент не только должен знать формулу, уметь ее написать и объяснить, но и записать ее как минимум тремя разными способами, используя физический и математический аппарат.

Модуль 2. Электромагнетизм, оптика, квантовая и атомная физика

СРС 5 Составить глоссарий (с указанием литературы) по теме «Геометрическая оптика. Фотометрия».

Форма сдачи СРС: Устный/письменный опрос

Дата сдачи: 10 неделя.

Требования и рекомендуемый объем работы: не более 3 стр. формата А-4, рукописных либо набранных на компьютере.

Примечание: Составление глоссария означает определение терминов и понятий. Необходимо также указывать источник, откуда взято то или иное определение.

СРС 6 Подготовить презентацию (тема на выбор студента):

Тема 1. Явление полного внутреннего отражения и его применение.
Тема 2. Линзы. Зеркала. Построение изображений в линзах и зеркалах.
Тема 3. Применение интерференции света. Интерферометры.
Тема 4. Спектральное разложение. Голография.
Тема 5. Способы получения поляризованного света. Поляризационные приборы и использование поляризованных лучей. Явление двойного лучепреломления.
Тема 6. Оптическая пирометрия.
Тема 7. Рентгеновское излучение. Рентгенография.
Тема 8. Лазеры и их применение.
Тема 9. Дифракция электронов.
Тема 10. Элементы квантовой статистики.
Тема 11. Элементы физики твердого тела. Явление сверхпроводимости.
Тема 12. Ядерный реактор. Реакция синтеза. Проблема источников энергии.
Тема 13. Элементы физики элементарных частиц

Форма сдачи СРС: защита, выступление

Срок сдачи СРС: 13 неделя

Примечание: Презентация (представление информации в форме компьютерной презентации) - это выбор студентом определенной темы и выражение своего видения, творческого понимания какого-либо аспекта темы. Чтобы защитить презентацию, необходимо выступить на аудиторном или внеаудиторном занятии.

Требования и рекомендуемый объем работы: не менее 20 слайдов, обязательно содержание, основная часть, заключение, список литературы. Также желательно применить знания, полученные на занятиях по

информатике: использовать анимации и иные возможности компьютерной техники.

СРС 7 Составить конспект по теме «Элементы физики твердого тела» (с указанием литературы) по следующему плану: Теплоемкость кристаллической решетки. Фононный газ. Электропроводность металлов. Носители тока как квазичастицы. Энергетические зоны в кристаллах. Электропроводность металлов. Металлы, диэлектрики и полупроводники в зонной теории. Уровень Ферми. Поверхность Ферми. Понятие электронной и дырочной проводимости. Собственная и примесная проводимость. Явление сверхпроводимости. Намагничивание ферромагнетиков.

Форма сдачи СРС: Письменный/устный опрос

Дата сдачи: 15 неделя

Требования и рекомендуемый объем работы: не более 5 стр. формата А-4, рукописных либо набранных на компьютере. Желательно представить информацию в структурированном виде, в виде таблиц и схем.

Примечание: Устное изложение материала – студент излагает материал на заданную тему в соответствии с вопросами по самоподготовке. Оценивается: насколько раскрыта тема, интерес слушателей, использование литературы. Письменный опрос – это наборы специальных заданий, проверяющих знания студента по выбранной теме.

СРС 8 Опрос по формулам по 2 модулю

Форма сдачи СРС: Письменный/устный опрос

Дата сдачи: 15 неделя

Примечание: студент должен знать теоретический материал по изучаемой дисциплине в полном объеме. Преподаватель проверяет знание студента всех формул по тому или иному разделу изученного материала.

Оценивается: правильность и точность формулировок, знание используемых обозначений физических величин и физических постоянных, а также знание единиц их измерения.

Внимание! В связи с необходимостью подготовки студентов к ВОУД по физике, студент не только должен знать формулу, уметь ее написать и объяснить, но и записать ее как минимум тремя разными способами, используя физический и математический аппарат.

УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ СРС ПО МОДУЛЯМ

КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Механическое движение — это изменение с течением времени взаимного расположения тел или их частей. Механика Галилея — Ньютона называется классической механикой. В ней изучаются законы движения макроскопических тел, скорости которых малы по сравнению со скоростью света в вакууме. Законы движения макроскопических тел со скоростями, сравнимыми со скоростью *c,* изучаются релятивистской механикой, основанной на специальной теории относительности, сформулированной А.Эйнштейном. Для описания движения микроскопических тел (отдельные атомы и элементарные частицы) законы классической механики заменяются законами квантовой механики.

Механика делится на три раздела: кинематика изучает движение тел, не рассматривая причины, которые это движение обусловливают; динамика изучает законы движения тел и причины, которые вызывают или изменяют это движение; статика изучает законы равновесия системы тел.

Механика для описания движения тел в зависимости от условий задачи использует физические модели. Простейшей моделью является материальная точка — тело, обладающее массой, размерами которого в данной задаче можно пренебречь. Произвольное макроскопическое тело или систему тел можно мысленно разбить на малые взаимодействующие между собой части, каждая из которых рассматривается как материальная точка. Тогда изучение движения произвольной системы тел сводится к изучению системы материальных точек. Абсолютно твердым телом называется тело, которое ни при каких условиях не может деформироваться и при всех условиях расстояние между двумя точками этого тела остается постоянным.

Инерциальные системы отсчета

Механическое движение относительно, и его характер зависит от системы отсчета. Первый закон Ньютона выполняется не во всякой системе отсчета, а те системы, по отношению к которым он выполняется, называются инерциальными системами отсчета. Инерциальной системой отсчета является такая система, которая либо покоится, либо движется равномерно и прямолинейно относительно какой-то другой инерциальной системы. *Первый закон Ньютона утверждает существование инерциальных систем отсчета.*

Еще в глубокой древности было замечено, что в отличие от звезд, которые неизменно сохраняют свое взаимное расположение в пространстве в течение столетий, планеты описывают среди звезд сложнейшие траектории. Для объяснения петлеобразного движения планет

древнегреческий ученый Птоломей, считая Землю расположенной в центре Вселенной, предположил, что каждая из планет движется по малому кругу (эпициклу), центр которого равномерно движется по большому кругу, в центре которого находится Земля. Эта концепция получила название птоломеевой геоцентрической системы мира и при поддержке католической церкви господствовала почти полторы тысячи лет.

В начале XVI в. Н.Коперник обосновал гелиоцентрическую систему, согласно которой движения небесных тел объясняются движением Земли (и других планет) вокруг Солнца и суточным вращением Земли. Теория и наблюдения Коперника воспринимались как фантазия.

К началу XVII столетия большинство ученых убедилось, однако, в справедливости гелиоцентрической системы мира. И.Кеплер, обработав и уточнив результаты многочисленных наблюдений датского астронома Т.Браге, изложил законы движения планет:

1. Планеты движутся по эллипсам, в одном из фокусов которого находится Солнце.
2. Радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает одинаковые площади.
3. Квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей их орбит.

Задание: Составьте таблицу «Виды сил в механике» (примерное содержание таблицы приведено ниже)

Вид	Определение	Причина	Природа	Направление	Формула
Сила тяжести					
Вес					
Сила всемирного тяготения					
Сила трения					
Сила упругости					

ДИНАМИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

1. *Момент инерции* – величина аддитивная; момент инерции тела равен сумме моментов инерции его частей. В случае непрерывного распределения масс эта сумма сводится к интегралу

$$J = \int r^2 dm = \int \rho r^2 dV ,$$

где интегрирование производится по всему объему тела. Величина *r* в этом случае есть функция положения точки с координатами *x, y, z*.

В качестве примера найдем момент инерции однородного сплошного цилиндра высотой h и радиусом R относительно его геометрической оси. Разобьем цилиндр на отдельные полые концентрические цилиндры бесконечно малой толщины dr с внутренним радиусом r и внешним - r+dr. Момент инерции каждого полого цилиндра $dJ = r^2dm$ (так как dr<<r, то считаем, что расстояние всех точек цилиндра от оси равно r), где dm — масса всего элементарного цилиндра; его объем $2\pi rhdr$. Если ρ — плотность материала, то $dm=\rho \cdot 2\pi rhdr$ и $dJ = 2\pi\rho r^3dr$. Тогда момент инерции сплошного цилиндра

$$J = \int dJ = 2\pi h\rho \int_0^R r^3 dr = {}^1/_2 \pi h R^4 \rho,$$

Но т.к. $\pi R'^2h$ - объем цилиндра, то его масса $m = \pi R^2h\rho$, а момент инерции цилиндра относительно его геометрической оси равен $J = \frac{1}{2}mR^2$.

В таблице приведены моменты инерции для некоторых однородных тел.

Таблица 1 – Моменты инерции некоторых однородных тел

Тело	Положение оси вращения	Момент инерции
полый тонкостенный цилиндр радиуса R	ось симметрии	$J = mR^2$
сплошной цилиндр или диск радиуса R	ось симметрии	$J = \frac{1}{2}mR^2$
прямой тонкий стержень длиной l	ось перпендикулярна стержню и проходит через его середину	$J = \frac{1}{12}ml^2$
прямой тонкий стержень длиной l	ось перпендикулярна стержню и проходит через его конец	$J = \frac{1}{3}ml^2$
шар радиуса R	ось проходит через центр шара	$J = \frac{2}{5}mR^2$

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Энергия - универсальная мера различных форм движения и взаимодействия. С различными формами движения материи связывают различные формы энергии: механическую, тепловую, электромагнитную,

ядерную и др. В одних явлениях форма движения материи не изменяется (например, горячее тело нагревает холодное), в других — переходит в иную форму (например, в результате трения механическое движение превращается в тепловое). Однако существенно, что во всех случаях энергия, отданная (в той или иной форме) одним телом другому телу, равна энергии, полученной последним телом.

Механическая система - совокупность материальных точек (тел), рассматриваемых как единое целое. Внутренние силы - силы взаимодействия между материальными точками механической системы. Внешние силы - силы, с которыми на материальные точки системы действуют внешние тела. Замкнутая система тел - механическая система тел, на которую не действуют внешние силы. Энергия — универсальная мера различных форм движения и взаимодействия. Консервативные силы – силы, работа которых при перемещении тела из одного положения в другое не зависит от того, по какой траектории это перемещение произошло, а зависит только от начального и конечного положения (например, сила тяжести). Работа консервативных сил при элементарном (бесконечно малом) изменении конфигурации системы равна приращению потенциальной энергии, взятому со знаком минус, так как работа совершается за счет убыли потенциальной энергии $dA = -d\Pi$. Диссипативная сила – сила, работа которой зависит от траектории перемещения тела (например, сила трения).

1) Рассматривается одномерное движение тела (потенциальная энергия – функция одной только лишь переменной); 2) рассматриваются только консервативные системы (в них механическая энергия превращается только в механическую)

График зависимости потенциальной энергии от некоторого аргумента называется потенциальной кривой. Анализ позволяет определить характер движения тела. Графическое представление потенциальной энергии для тела в однородном поле тяжести дано на рис. 15 и для упругодеформированного тела – на рис. 16.

Применение закона сохранения импульса к столкновению упругих и неупругих тел

Удар — это столкновение двух или более тел, при котором взаимодействие длится очень короткое время. Отношение нормальных составляющих относительной скорости тел после и до удара называется коэффициентом восстановления ε: $\varepsilon = \frac{v_n^{|}}{v_n}$ Если для сталкивающихся тел ε=0, то такие тела называются абсолютно неупругими, если ε=1— абсолютно упругими. Удар называется центральным, если тела до удара движутся вдоль прямой, проходящей через их центры масс.

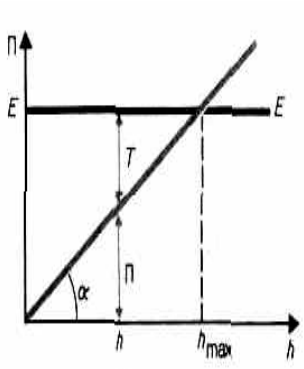


Рис. 15

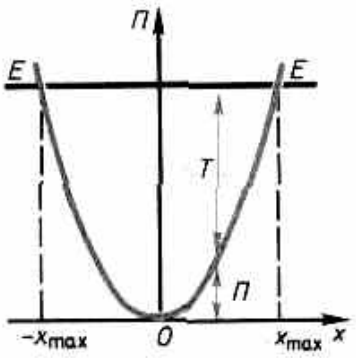


Рис. 16

Абсолютно упругий удар — столкновение двух тел, в результате которого в обоих взаимодействующих телах не остается никаких деформаций и вся кинетическая энергия, которой обладали тела до удара, после удара снова превращается в кинетическую энергию. Для абсолютно упругого удара выполняются закон сохранения импульса и закон сохранения кинетической энергии.

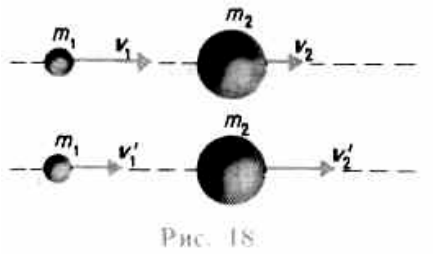


Рис. 18

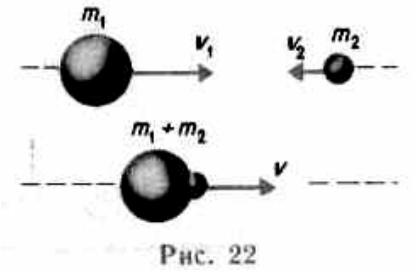


Рис. 22

Обозначим скорости шаров массами m_1 и m_2 до удара через v_1 и v_2, после удара — через v'_1 и v'_2 (рис. 18). Законы сохранения имеют вид

$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1^{|} + m_2 v_2^{|}$ и $\frac{m_1 v_1^{\,2}}{2} + \frac{m_2 v_2^{\,2}}{2} = \frac{m_1 v_1^{|2}}{2} + \frac{m_2 v_2^{|2}}{2}$, отсюда скорости тел после удара равны $v_1^{|} = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2 v_2}{m_1 + m_2}$ и $v_2^{|} = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1 v_1}{m_1 + m_2}$

Абсолютно неупругий удар — столкновение двух тел, в результате которого тела объединяются, двигаясь дальше как единое целое (рис. 22). Если массы шаров m_1 и m_2, их скорости до удара v_1 и v_2, то, используя закон сохранения импульса, можно записать $m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{v}$, откуда $\vec{v} = \frac{m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2}{m_1 + m_2}$. Если шары движутся навстречу друг другу, то они вместе будут продолжать двигаться в ту сторону, в которую двигался шар, обладающий большим импульсом. В частном случае если массы шаров равны $(m_1 = m_2)$, то $v = \frac{v_1 + v_2}{2}$

Как изменяется кинетическая энергия шаров при центральном абсолютно неупругом ударе? Мы имеем дело с силами, подобными силам трения, поэтому закон сохранения механической энергии не должен соблюдаться. Вследствие деформации происходит «потеря» кинетической энергии, перешедшей в тепловую или другие формы энергии. Эту «потерю» можно определить по разности кинетической энергии тел до и после удара

$\Delta T = (\frac{m_1 v_1^{\ 2}}{2} + \frac{m_2 v_2^{\ 2}}{2}) - \frac{(m_1 + m_2)v^2}{2}$. Если ударяемое тело было первоначально неподвижно (v_2=0), то $v = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2}$

Абсолютно неупругий удар — пример того, как происходит «потеря» механической энергии под действием диссипативных сил.

Реактивное движение. Движение некоторых тел сопровождается изменением их массы, например масса ракеты уменьшается за счет истечения газов, образующихся при сгорании топлива, и т. п. Выведем уравнение движения тела переменной массы на примере движения ракеты. Уравнение движения тела переменной массы $m\vec{a} = \vec{F} + \vec{F}p$ впервые было выведено И. В.Мещерским. Идея применения реактивной силы для создания летательных аппаратов высказывалась в 1881 г. Кибальчичем. Циолковский в 1903 г. опубликовал статью, где предложил теорию движения ракеты и основы теории жидкостного реактивного двигателя. Поэтому его считают основателем отечественной космонавтики. Если в начальный момент времени скорость ракеты равна нулю, а ее стартовая масса то, то C = uln m_0. Следовательно, $\upsilon = u \ln \frac{m_0}{m}$ Это соотношение называется формулой Циолковского. Она показывает, что: 1) чем больше конечная масса ракеты *m,* тем больше должна быть стартовая масса ракеты то; 2) чем больше скорость истечения *u* газов, тем больше может быть конечная масса при данной стартовой массе ракеты. Выражения получены для нерелятивистских движений, т. е. для случаев, когда скорости *v* и u малы по сравнению со скоростью света *c.*

Гироскоп. Гироскопический эффект. Для того чтобы сохранить положение оси вращения твердого тела с течением времени неизменным, используют подшипники, в которых она удерживается. Однако существуют такие оси вращения тел, которые не изменяют своей ориентации в пространстве без действия на нее внешних сил. Эти оси называются свободными осями (или осями свободного вращения). Можно доказать, что в любом теле существуют три взаимно перпендикулярные оси, проходящие через центр масс тела, которые могут служить свободными осями (они называются главными осями инерции тела).

Например, главные оси инерции однородного прямоугольного параллелепипеда проходят через центры противоположных граней

(рис.30). Для однородного цилиндра одной из главных осей инерции является его геометрическая ось, а в качестве остальных осей могут быть две любые взаимно перпендикулярные оси, проведенные через центр масс в плоскости, перпендикулярной геометрической оси цилиндра. Главными осями инерции шара являются любые три взаимно перпендикулярные оси, проходящие через центр масс. Для устойчивости вращения большое значение имеет, какая именно из свободных осей служит осью вращения.

Можно показать, что вращение вокруг главных осей с наибольшим и наименьшим моментами инерции оказывается устойчивым, а вращение около оси со средним моментом — неустойчивым. Так, если подбросить тело, имеющее форму параллелепипеда, приведя его одновременно во вращение, то оно, падая, будет устойчиво вращаться вокруг осей *1* и *2* (рис. 30).

Если, например, палочку подвесить за один конец нити, а другой конец, закрепленный к шпинделю центробежной машины, привести в быстрое вращение, то палочка будет вращаться в горизонтальной плоскости около вертикальной оси, перпендикулярной оси палочки и проходящей через ее середину (рис.31). Это и есть свободная ось вращения (момент инерции при этом положении палочки максимальный). Если теперь палочку, вращающуюся вокруг свободной оси, освободить от внешних связей (аккуратно снять верхний конец нити с крючка шпинделя), то положение оси вращения в пространстве в течение некоторого времени сохраняется. Свойство свободных осей сохранять свое положение в пространстве широко применяется в технике.

Наиболее интересны в этом плане гироскопы — массивные однородные тела, вращающиеся с большой угловой скоростью около своей оси симметрии, являющейся свободной осью.

Рассмотрим одну из разновидностей гироскопов — гироскоп на кардановом подвесе (рис.32). Дискообразное тело — гироскоп — закреплено на оси *AA,* которая может вращаться вокруг перпендикулярной ей горизонтальной оси *BB,* которая, в свою очередь, может поворачиваться вокруг вертикальной оси *DD.* Все три оси пересекаются в одной точке С, являющейся центром масс гироскопа и остающейся неподвижной, а ось гироскопа может принять любое направление в пространстве. Силами трения в подшипниках всех трех осей и моментом импульса колец пренебрегаем.

Так как трение в подшипниках мало, то, пока гироскоп неподвижен, его оси можно придать любое направление. Если начать гироскоп быстро вращать (например, с помощью намотанной на ось веревочки) и поворачивать его подставку, то ось гироскопа сохраняет свое положение в пространстве неизменной.

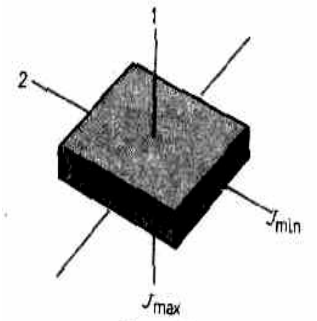
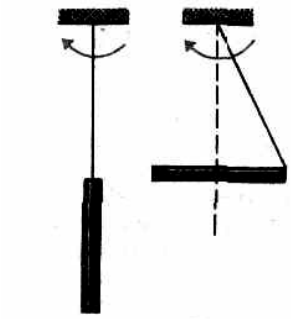


Рис. 30


Рис. 31

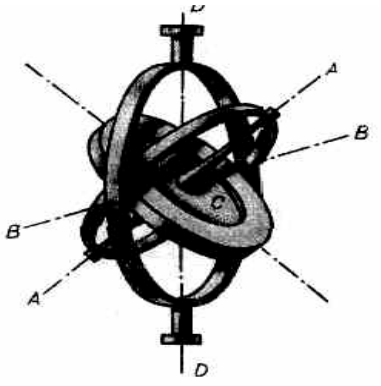


Рис. 32

Это можно объяснить с помощью основного закона динамики вращательного движения. Для свободного вращающегося гироскопа сила тяжести не может изменить ориентацию его оси вращения, так как эта сила приложена к центру масс (центр вращения С совпадает с центром масс), а момент силы тяжести относительно закрепленного центра масс равен нулю. Моментом сил трения мы также пренебрегаем. Поэтому если момент внешних сил относительно его закрепленного центра масс равен нулю, то L == const, т. е. момент импульса гироскопа сохраняет свою величину и направление в пространстве. Следовательно, вместе *с* ним сохраняет свое положение в пространстве и ось гироскопа.

Чтобы ось гироскопа изменила свое направление в пространстве, необходимо отличие от нуля момента внешних сил. Если момент внешних сил, приложенных к вращающемуся гироскопу относительно его центра масс, отличен от нуля, то наблюдается явление, получившее название гироскопического эффекта. Оно состоит в том, что под действием пары сил F, приложенной к оси вращающегося гироскопа, ось гироскопа (рис. 33) поворачивается вокруг прямой O_3O_3, а не вокруг прямой O_2O_2, как это казалось бы естественным на первый взгляд (O_1O_1 и O_2O_2 лежат в плоскости чертежа, а O_3O_3 и силы F перпендикулярны ей).

Гироскопический эффект объясняется следующим образом. Момент M пары сил F направлен вдоль прямой O_2O_2. За время dt момент импульса L гироскопа получит приращение dL = Mdt (направление dL совпадает с направлением M) и станет равным L'=L+dL. Направление вектора L' совпадает с новым направлением оси вращения гироскопа. Таким образом, ось вращения гироскопа повернется вокруг прямой O_3O_3. Если время действия силы мало, то, хотя момент сил M и велик, изменение момента импульса dL гироскопа будет также весьма малым. Поэтому кратковременное действие сил практически не приводит к изменению ориентации оси вращения гироскопа в пространстве. Для ее изменения следует прикладывать силы в течение длительного времени.

Если ось гироскопа закреплена подшипниками, то вследствие гироскопического эффекта возникают так называемые гироскопические

силы, действующие на опоры, в которых вращается ось гироскопа. Их действие необходимо учитывать при конструировании устройств, содержащих быстровращающиеся массивные составные части. Гироскопические силы имеют смысл только во вращающейся системе отсчета и являются частным случаем кориолисовой силы инерции.

Гироскопы применяются в различных гироскопических навигационных приборах (гирокомпас, гирогоризонт и т. д.). Другое важное применение гироскопов — поддержание заданного направления движения транспортных средств, например судна (авторулевой) и самолета (автопилот) и т. д. При всяком отклонении от курса вследствие каких-то воздействий (волны, порыва ветра и т. д.) положение оси гироскопа в пространстве сохраняется. Следовательно, ось гироскопа вместе с рамами карданова подвеса поворачивается относительно движущегося устройства. Поворот рам карданова подвеса с помощью определенных приспособлений включает рули управления, которые возвращают движение к заданному курсу. Впервые гироскоп применен французским физиком Ж. Фуко для доказательства вращения Земли.

ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД. УПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Общие свойства жидкостей и газов. Молекулы газа, совершая беспорядочное, хаотическое движение, не связаны или весьма слабо связаны силами взаимодействия, поэтому они движутся свободно и в результате соударений стремятся разлететься во все стороны, заполняя весь предоставленный им объем, т. е. объем газа определяется объемом того сосуда, который газ занимает. Как и газ, жидкость принимает форму того сосуда, в который она заключена. Но в жидкостях в отличие от газов среднее расстояние между молекулами остается практически постоянным, поэтому жидкость обладает практически неизменным объемом.

Хотя свойства жидкостей и газов во многом отличаются, в ряде механических явлений их поведение определяется одинаковыми параметрами и идентичными уравнениями. Поэтому гидроаэромеханика — раздел механики, изучающий равновесие и движение жидкостей и газов, их взаимодействие между собой и обтекаемыми ими твердыми телами,— использует *единый подход* к изучению жидкостей и газов.

В механике с большой степенью точности жидкости и газы рассматриваются как сплошные, непрерывно распределенные в занятой ими части пространства. Плотность жидкости мало зависит от давления. Плотность же газов от давления зависит существенно. Из опыта известно, что сжимаемостью жидкости и газа во многих задачах можно пренебречь и пользоваться единым понятием несжимаемой жидкости — жидкости, плотность которой всюду одинакова и не изменяется со временем.

Режимы течения жидкостей. Ламинарное и турбулентное течение жидкостей. Существует два режима течения жидкостей. Течение называется ламинарным (слоистым), если вдоль потока каждый выделенный тонкий слой скользит относительно соседних, не перемешиваясь с ними, и турбулентным (вихревым), если вдоль потока происходит интенсивное вихреобразование и перемешивание жидкости (газа).

Ламинарное течение жидкости наблюдается при небольших скоростях ее движения. Внешний слой жидкости, примыкающий к поверхности трубы, в которой она течет, из-за сил молекулярного сцепления прилипает к ней и остается неподвижным. Скорости последующих слоев тем больше, чем больше их расстояние до поверхности трубы, и наибольшей скоростью обладает слой, движущийся вдоль оси трубы.

При турбулентном течении частицы жидкости приобретают составляющие скоростей, перпендикулярные течению, поэтому они могут переходить из одного слоя в другой. Скорость частиц жидкости быстро возрастает по мере удаления от поверхности трубы, затем изменяется довольно незначительно. Так как частицы жидкости переходят из одного слоя в другой, то их скорости в различных слоях мало отличаются. Из-за большого градиента скоростей у поверхности трубы обычно происходит образование вихрей.

Профиль усредненной скорости при турбулентном течении в трубах (рис. 53) отличается от параболического профиля при ламинарном течении более быстрым возрастанием скорости у стенок трубы и меньшей кривизной в центральной части течения.

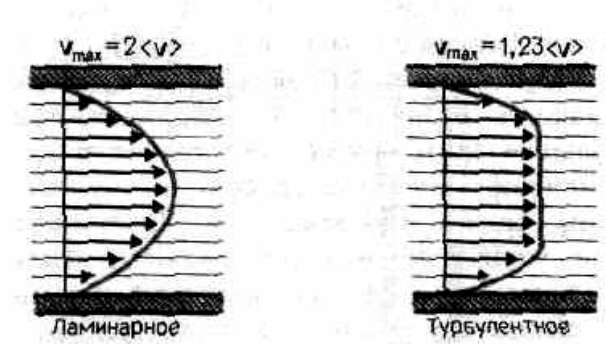


Рис. 53

Английский ученый Рейнольдс в 1883 г. установил, что характер течения зависит от безразмерной величины, называемой числом Рейнольдса: $\mathrm{Re} = \dfrac{\rho\langle\upsilon\rangle d}{\eta} = \dfrac{\langle\upsilon\rangle d}{\nu}$, где $\nu = \eta / \rho$ — кинематическая вязкость; ρ — плотность жидкости; (v)—средняя по сечению трубы скорость жидкости; d — характерный линейный размер, например диаметр трубы.

При малых значениях числа Рейнольдса (Re≤1000) наблюдается ламинарное течение, переход от ламинарного течения к турбулентному происходит в области 1000≤:Re≤2000, а при Re = 2300 (для гладких труб) течение — турбулентное. Если число Рейнольдса одинаково, то режим течения различных жидкостей (газов) в трубах разных сечений одинаков.

Упругие напряжения. Деформации твердых тел подчиняются закону Гука до известного предела. Связь между деформацией и напряжением представляется в виде диаграммы напряжений (рис. 35).

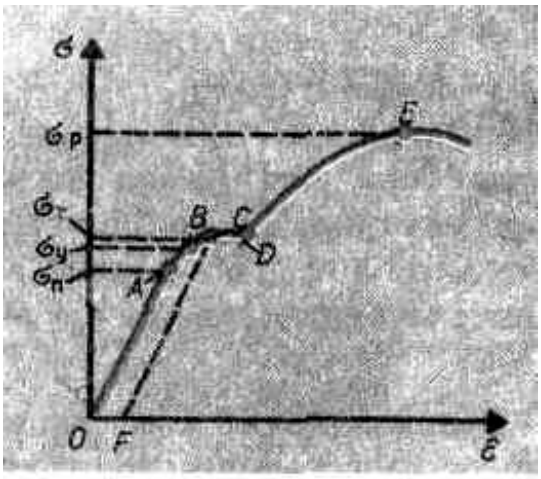


Рис. 35

Из рисунка видно, что линейная зависимость σ (ε), установленная Гуком, выполняется лишь в очень узких пределах до так называемого предела пропорциональности ($\sigma_п$). При дальнейшем увеличении напряжения деформация еще упругая (хотя зависимость σ (ε) уже не линейна) и до предела упругости ($\sigma_у$) остаточные деформации не возникают. За пределом упругости в теле возникают остаточные деформации и график, описывающий возвращение тела в первоначальное состояние после прекращения действия силы, изобразится не кривой *BO, a* параллельной ей — *CF*. Напряжение, при котором появляется заметная остаточная деформация (~0,2 %), называется пределом текучести ($\sigma_т$) - точка *C* на кривой. В области *CD* деформация возрастает без увеличения напряжения, т.е. тело как бы «течет». Эта область называется областью текучести (или областью пластических деформаций). Материалы, для которых область текучести значительна, называются вязкими, для которых же она практически отсутствует — хрупкими. При дальнейшем растяжении происходит разрушение тела. Максимальное напряжение, возникающее в теле до разрушения, называется пределом прочности ($\sigma_р$). Диаграмма напряжений для реальных тел зависит от различных факторов. Одно и то же твердое тело может при кратковременном действии сил проявлять себя как хрупкое, а при длительных, но слабых силах является текучим.

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Таблица 1- Виды колебаний

Колебания - движения или процессы, которые характеризуются определенной повторяемостью во времени	
Вид колебаний	Определение
Свободные (собственные)	Колебания, которые совершаются за счет первоначально сообщенной энергии при последующем отсутствии внешних воздействий на колебательную систему
Свободные затухающие	Свободные колебания, амплитуда которых из-за потерь энергии реальной колебательной системой уменьшается со временем
Вынужденные	Колебания, происходящие при периодическом внешнем воздействии.
Гармонические	Колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по закону синуса (косинуса).
Автоколебания	Незатухающие колебания, возникающие и поддерживаемые в диссипативной системе за счет постоянного внешнего источника энергии, причем свойства этих колебаний определяются самой системой

Таблица 2 - Характеристики колебательного движения

Физическая величина	Обозначен.	Единица измер.	Определение	Формула или пояснение
Мгновенное значение величины	S	м	Мгновенное значение величины, колеблющейся по гармоническому закону (например, смещение точки)	$s = A\cos(\omega_0 t + \varphi)$
Амплитуда	A	м	Максимальное значение колеблющейся величины	принимает значение от –A до +A
Цикл. частота	ω_0	рад/с	Число колебаний за 2π секунд	$\omega_0 = 2\pi\nu$
Фаза	$\omega_0 t + \varphi$	градус, радиан	Величина, определяющая значение колеблющейся величины от времени, прошедшего от начала текущего периода колебаний	Фаза является аргументом косинуса
Начальная фаза	φ	градус, радиан	Величина, определяющая значение колеблющейся величины в начальный момент времени	При t = 0 $s = A\cos\varphi$

Период	T	с	Время, за которое фаза колебания получила приращение 2π	$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{1}{\nu}$
Частота	ν	Гц (Гц=1/с)	Число колебаний, совершенных в единицу времени	$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega_0}{2\pi}$

Механические гармонические колебания

1)Зависимость координаты от времени $x = A\cos(\omega_0 t + \varphi)$

2)Скорость колеблющейся точки

$$\upsilon = \frac{dx}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi) = A\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2})$$

3)Ускорение колеблющейся точки

$$a = \frac{d\upsilon}{dt} = -A{\omega_0}^2 \cos(\omega_0 t + \varphi) = A{\omega_0}^2 \cos(\omega_0 t + \varphi + \pi)$$

4)Сила, действующая на колеблющуюся точку $F = -m{\omega_0}^2 x$ пропорциональна смещению материальной точки из положения равновесия и направлена в противоположную сторону.

5)Кинетическая энергия колеблющейся точки

$$T = \frac{m\upsilon^2}{2} = \frac{mA^2{\omega_0}^2}{4}\sin^2(\omega_0 t + \varphi)$$

6)Потенциальная энергия колеблющейся точки

$$П = -\int_0^x F dx = \frac{m{\omega_0}^2 x^2}{2} = \frac{mA^2{\omega_0}^2}{4}\cos^2(\omega_0 t + \varphi)$$

7)Полная энергия $E = T + П = \frac{mA^2{\omega_0}^2}{2}$ остается постоянной, так как при гармонических колебаниях справедлив закон сохранения механической энергии, поскольку упругая сила консервативна.

Таблица 3 - Основные сведения о маятниках

Пружинный маятник	Математический маятник	Физический маятник
Определение		
Груз массой *m,* подвешенный на абсолютно упругой пружине и совершающий гармонические колебания под действием упругой силы $F = -kx$	Идеализированная система, состоящая из материальной точки массой *m,* подвешенной на нерастяжимой невесомой нити, и колеблющаяся под действием силы тяжести	Твердое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг неподвижной горизонтальной оси подвеса, не проходящей через центр масс тела

Закон движения, дифференциальное уравнение		
$\frac{md^2x}{dt^2} = -kx$ $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0{}^2 x = 0$	$M = J\frac{d^2\alpha}{dt^2} = -mgl\sin\alpha$ $\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \omega_0{}^2\alpha = 0$	$M = J\frac{d^2\alpha}{dt^2} = -mgl\sin\alpha$ $\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \omega_0{}^2\alpha = 0$
Решение дифференциального уравнения		
$x = A\cos(\omega_0 t + \varphi)$	$\alpha = \alpha_0\cos(\omega_0 t + \varphi)$	$\alpha = \alpha_0\cos(\omega_0 t + \varphi)$
Формулы для циклической частоты и периода колебаний		
$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$	$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$ $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$	$\omega_0 = \sqrt{\frac{mgl}{J}}$ $T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgl}} = 2\pi\sqrt{\frac{L}{l}}$
Обозначения в формулах		
k – жесткость пружины m – масса колеблющегося груза Потенциальная энергия $\boxed{П = \frac{kx^2}{2}}$	M - момент возвращающей силы l – длина маятника α - угол отклонения маятника α_0 - амплитуда	M - момент возвращающей силы J – момент инерции маятника α - угол отклонения маятника α_0 - амплитуда $\boxed{L = \frac{J}{ml}}$ - приведенная длина, l – расстояние между точкой подвеса и центром масс маятника

Волновые процессы

Волна - процесс распространения колебаний в сплошной среде. *Основное свойство всех волн - перенос энергии без переноса вещества.* Бывают следующие типы волн: волны на поверхности жидкости, упругие и электромагнитные волны. Упругими (или механическими) волнами называются механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде. Упругие волны бывают продольные и поперечные. В продольных волнах частицы среды колеблются в направлении распространения волны, в поперечных — в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны.

Продольные волны могут распространяться в средах, в которых возникают упругие силы *при деформации сжатия и растяжения,* т. е. твердых, жидких и газообразных телах. Поперечные волны могут распространяться в среде, в которой возникают упругие силы *при деформации сдвига,* т. е. фактически только в твердых телах; в жидкостях

и газах возникают только продольные волны, а в твердых телах — как продольные, так и поперечные.

Упругая волна называется гармонической, если соответствующие ей колебания частиц среды являются гармоническими. На рис. 220 представлена гармоническая поперечная волна, распространяющаяся со скоростью *v* вдоль оси x, т. е. приведена зависимость между смещением ξ частиц среды, участвующих в волновом процессе, и расстоянием *x* этих частиц от источника колебаний *O* для какого-то фиксированного момента времени *t.* Хотя приведенный график функции I *(x, t)* похож на график гармонического колебания, но они *различны по существу.* График волны дает зависимость смещения *всех частиц среды* от расстояния до источника колебаний в данный момент времени, а график колебаний — зависимость смещения *данной частицы от времени.*

Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется длиной волны λ. Длина волны равна расстоянию, на которое распространяется определенная фаза колебания за период, т. е. $\boxed{\lambda = \upsilon T}$ или $\boxed{\lambda = \dfrac{\upsilon}{\nu}}$, где ν — частота колебаний,

Геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени *t,* называется волновым фронтом. Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе, называется волновой поверхностью. Волновых поверхностей можно провести бесчисленное множество, а волновой фронт в каждый момент времени — один.

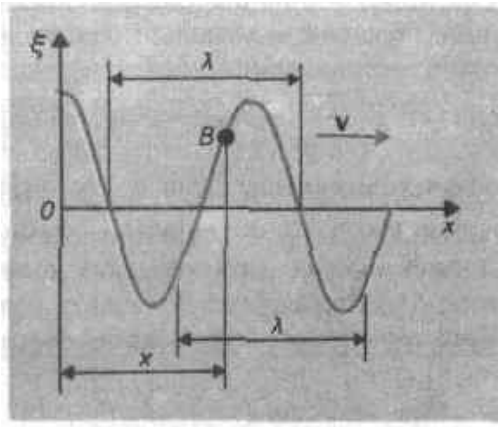


Рис. 220

Бегущими волнами называются волны, которые переносят в пространстве энергию. Перенос энергии в волнах количественно характеризуется вектором плотности потока энергии. Этот вектор для упругих волн называется вектором Умова. Его направление совпадает с направлением переноса энергии, а его модуль равен энергии, переносимой волной за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны.

Любая волна может быть представлена в виде суммы гармонических волн, т. е. в виде волнового пакета, или группы волн. Волновым пакетом называется суперпозиция волн, мало отличающихся друг от друга по частоте, занимающая в каждый момент времени ограниченную область пространства. Групповая скорость $\frac{dx}{dt} = \frac{d\omega}{dk} = u$ - это скорость движения группы волн, образующих в каждый момент времени локализованный в пространстве волновой пакет. Связь между групповой и фазовой скоростями $u = \upsilon - \lambda \frac{d\upsilon}{d\lambda}$. Г*рупповая скорость и ≤ с,* в то время как *для фазовой скорости ограничений не существует.*

Стоячие волны — это волны, образующиеся при наложении двух бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу с одинаковыми частотами и амплитудами. Уравнение стоячей волны: $\xi = 2A\cos kx\cos\omega t = 2A\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\cos\omega t$. В точках среды, где 2πx/λ = ±mπ (m=0, 1, 2, ...), амплитуда колебаний достигает максимального значения, равного 2 А. В точках среды, где 2πx/λ = ±(m+1/2)π (m=0,1,2,...), амплитуда колебаний обращается в нуль. Точки, в которых амплитуда колебаний максимальна ($A_{ст}$=2A), называются пучностями стоячей волны, а точки, в которых амплитуда колебаний равна нулю ($A_{ст}$=0), называются узлами стоячей волны. Точки среды, находящиеся в узлах, колебаний не совершают. *Координаты пучностей и узлов:* $x_0 = \pm m\lambda/2$ (m=0, 1,2, ...); $x_{узл} = \pm(m+1/2)\lambda/2$ (m=0, 1, 2, ...). Расстояния между двумя соседними пучностями и двумя соседними узлами одинаковы и равны λ/2. Расстояние между соседними пучностью и узлом стоячей волны равно λ/4.

В отличие от бегущей волны, все точки которой совершают колебания с одинаковой амплитудой, но с запаздыванием по фазе, все точки стоячей волны между двумя узлами колеблются с разными амплитудами, но с одинаковыми фазами.

Если рассматривать бегущую волну, то в направлении ее распространения переносится энергия колебательного движения. В *случае же стоячей волны переноса энергии нет*, так как падающая и отраженная волны одинаковой амплитуды несут одинаковую энергию в противоположных направлениях.

Поэтому полная энергия результирующей стоячей волны, заключенной между узловыми точками, остается постоянной. Лишь в пределах расстояний, равных половине длины волны, происходят взаимные превращения кинетической энергии в потенциальную и обратно.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Термодинамика имеет дело с термодинамической системой — совокупностью макроскопических тел, которые взаимодействуют и обмениваются энергией как между собой, так и с другими телами (внешней средой). Основа термодинамического метода — определение состояния термодинамической системы. Состояние системы задается термодинамическими параметрами (параметрами состояния) — совокупностью физических величин, характеризующих свойства термодинамической системы. Обычно в качестве параметров состояния выбирают температуру, давление и удельный объем.

Температура — одно из основных понятий, играющих важную роль не только в термодинамике, но и в физике в целом. Температура — физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. В соответствии с решением XI Генеральной конференции по мерам и весам (1960) в настоящее время можно применять только две температурные шкалы — термодинамическую и Международную практическую, градуированные соответственно в Кельвинах (К) и в градусах Цельсия (°С).

В Международной практической шкале температура замерзания и кипения воды при давлении $1{,}013 \cdot 10^5$ Па соответственно 0 и 100 °С (так называемые реперные точки).

Термодинамическая температурная шкала определяется по одной реперной точке, в качестве которой взята тройная точка воды (температура, при которой лед, вода и насыщенный пар при давлении 609 Па находятся в термодинамическом равновесии). Температура этой точки по термодинамической шкале равна 273,16 К, (точно). Градус Цельсия равен Кельвину. В термодинамической шкале температура замерзания воды равна 273,15 К (при том же давлении, что и в Международной практической шкале), поэтому, по определению, термодинамическая температура и температура по Международной практической шкале связаны соотношением $T=273{,}15+t$. Температура $T=0$ называется нулем кельвин. Анализ различных процессов показывает, что 0 К недостижим, хотя приближение к нему сколь угодно близко возможно.

Удельный объем v — это объем единицы массы. Когда тело однородно, т. е. его плотность $\rho=\text{const}$, то $v = V/m = 1/\rho$. Так как при постоянной массе удельный объем пропорционален общему объему, то макроскопические свойства однородного тела можно характеризовать объемом тела.

Параметры состояния системы могут изменяться. Любое изменение в термодинамической системе, связанное с изменением хотя бы одного из ее термодинамических параметров, называется термодинамическим процессом. Макроскопическая система находится в термодинамическом равновесии, если ее состояние с течением времени не меняется

(предполагается, что внешние условия рассматриваемой системы при этом не изменяются).

1. **Броуновское движение.** Шотландский ботаник Р. Броун (1773—1858), наблюдая под микроскопом взвесь цветочной пыльцы в воде, обнаружил, что частицы пыльцы оживленно и беспорядочно двигались, то вращаясь, то перемещаясь с места на место, подобно пылинкам в солнечном луче. Впоследствии оказалось, что подобное сложное зигзагообразное движение характерно для любых частиц малых размеров (≈1мкм), взвешенных в газе или жидкости. Интенсивность этого движения, называемого броуновским, повышается с ростом температуры среды, с уменьшением вязкости и размеров частиц (независимо от их химической природы). Причина броуновского движения долго оставалась неясной. Лишь через 80 лет после обнаружения этого эффекта ему было дано объяснение: броуновское движение взвешенных частиц вызывается ударами молекул среды, в которой частицы взвешены. Так как молекулы движутся хаотически, то броуновские частицы получают толчки с разных сторон, поэтому и совершают движение столь причудливой формы. Таким образом, броуновское движение является подтверждением выводов молекулярно-кинетической теории о хаотическом тепловом движении атомов и молекул.

2. **Опыт Штерна**. Первое экспериментальное определение скоростей молекул выполнено физиком Штерном. Его опыты позволили также оценить распределение молекул по скоростям. Вдоль оси внутреннего цилиндра с щелью натянута платиновая проволока, покрытая слоем серебра, которая нагревается током при откачанном воздухе. При нагревании серебро испаряется. Атомы серебра, вылетая через щель, попадают на внутреннюю поверхность второго цилиндра, давая изображение щели *O*.

Если прибор привести во вращение вокруг общей оси цилиндров, то атомы серебра осядут не против щели, а сместятся от точки *O* на некоторое расстояние s. Изображение щели получается размытым. Исследуя толщину осажденного слоя, можно оценить распределение молекул по скоростям, которое соответствует максвелловскому распределению. Зная радиусы цилиндров, их угловую скорость вращения, а также измеряя s, можно вычислить скорость движения атомов серебра при данной температуре проволоки. Результаты опыта показали, что средняя скорость атомов серебра близка к той, которая следует из максвелловского распределения молекул по скоростям.

Классическая теория теплоемкостей газов расходится с опытом.

1) Теория приводит к выводу о независимости теплоемкости от температуры, в то время как для всех веществ, в том числе и для газов, теплоемкость растет с увеличением температуры, а при достаточно низких температурах быстро убывает и стремится к нулю при $T \to 0$ К.

2) Теория дает заниженные значения теплоемкостей многоатомных газов по сравнению с опытом при средних и высоких температурах. Введение колебательных степеней свободы в рамках закона о равномерном распределении энергии по степеням свободы не устраняет расхождения между теорией и экспериментом.

Причина кроется в ограниченной пригодности закона равномерного распределения энергии по степеням свободы. В квантовой теории теплоемкостей все эти трудности преодолены. Дело в том, что при вычислении теплоемкости надо учитывать квантование энергии вращения и колебаний молекул (возможны не любые вращательные и колебательные энергии, а лишь определенный дискретный ряд значений энергий).

Если энергия теплового движения недостаточна, например, для возбуждения колебаний, то эти колебания не вносят своего вклада в теплоемкость (соответствующая степень свободы «замораживается» — к ней неприменим закон равнораспределения энергии).

Этим объясняется, что теплоемкость моля двухатомного газа — водорода — при комнатной температуре равна $^5/_2\ R$ вместо $^7/_2\ R$. Аналогично можно объяснить уменьшение теплоемкости при низкой температуре («замораживаются» вращательные степени свободы) и увеличение при высокой («возбуждаются» колебательные степени свободы).

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Первоначально термодинамика возникла как наука о закономерностях превращения тепла в работу при помощи тепловых двигателей. Круг вопросов, которые изучает термодинамика, связан с тепловой формой движения материи, т.е. с хаотическим движением атомов и молекул. Термодинамика основывается на нескольких законах (или началах), которые получены путем обобщения огромного числа опытных фактов, касающихся макроскопических свойств вещества. Из этих законов математическим путем выводится большое число следствий, верных безотносительно к микроскопической структуре тел. Следствия термодинамики используются в гидродинамике, теории упругости и других разделах физики. Они составляют основу физической химии, находят применения в биологии, метеорологии и др. науках.

Графически можно изображать только равновесные процессы — процессы, состоящие из последовательности равновесных состояний. Они протекают так, что изменение термодинамических параметров за конечный промежуток времени бесконечно мало. Все реальные процессы неравновесны (они протекают с конечной скоростью), но в ряде случаев неравновесностью реальных процессов можно пренебречь (чем медленнее процесс протекает, тем он ближе к равновесному). В дальнейшем рассматриваемые процессы будем считать равновесными.

Теплота – энергетическая характеристика процесса теплообмена, определяемая количеством энергии, которое получает (отдает) тело в процессе теплообмена. Теплообмен происходит между телами или частями одного тела, нагретыми до разной температуры. Существуют три способа теплообмена: конвекция, теплопроводность, излучение.

В отличие от **внутренней энергии** системы, которая является однозначной функцией состояния этой системы, понятие теплоты и работы имеют смысл только в связи с процессом изменения состояния системы. Они являются энергетическими характеристиками этого процесса. Для перевода системы из одного состояние в другое требуется разная работа и разная теплота, в зависимости от того, через какие промежуточные состояния проходит система. В отличие от этого изменение внутренней энергии системы целиком определяется начальным и конечным состояниями системы.

Круговым процессом (или циклом) называется процесс, при котором система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное. На диаграмме процессов цикл изображается замкнутой кривой. Цикл, совершаемый идеальным газом, можно разбить на процессы расширения и сжатия газа. Следовательно, работа, совершаемая газом за цикл, определяется площадью, охватываемой замкнутой кривой.

Если за цикл совершается положительная работа (цикл протекает по часовой стрелке), то он называется *прямым*, если за цикл совершается отрицательная работа (цикл протекает против часовой стрелки), то он называется *обратным*.

Прямой цикл используется в *тепловых двигателях* — периодически действующих двигателях, совершающих работу за счет полученной извне теплоты. Обратный цикл используется в *холодильных машинах* — периодически действующих установках, в которых за счет работы внешних сил теплота переносится к телу с более высокой температурой.

Термодинамический процесс называется **обратимым**, если он может происходить как в прямом, так и в обратном направлении, причем если такой процесс происходит сначала в прямом, а затем в обратном направлении и система возвращается в исходное состояние, то в окружающей среде и в этой системе не происходит никаких изменений. Всякий процесс, не удовлетворяющий этим условиям, является **необратимым**.

Любой равновесный процесс является обратимым. Обратимость равновесного процесса, происходящего в системе, следует из того, что ее любое промежуточное состояние есть состояние термодинамического равновесия; для него «безразлично», идет процесс в прямом или обратном направлении. Реальные процессы сопровождаются диссипацией энергии (из-за трения, теплопроводности и т.д.), которая нами не обсуждается.

Обратимые процессы — это идеализация реальных процессов. Их рассмотрение важно по двум причинам: 1) многие процессы в природе и технике практически обратимы; 2) обратимые процессы являются наиболее экономичными; имеют максимальный термический коэффициент полезного действия, что позволяет указать пути повышения к. п. д. реальных тепловых двигателей.

Понятие **энтропии** введено в 1865 г. Клаузиусом. Для выяснения физического содержания этого понятия рассматривают отношение теплоты Q, полученной телом в изотермическом процессе, к температуре T теплоотдающего тела, называемое приведенным количеством теплоты.

Энтропия обладает свойством *аддитивности: энтропия системы равна сумме энтропии тел, входящих в систему.* Свойством аддитивности обладают также внутренняя энергия, масса, объем (температура и давление таким свойством не обладают).

Более глубокий смысл энтропии вскрывается в статистической физике, энтропия связывается с термодинамической вероятностью состояния системы. Термодинамическая вероятность W состояния системы — это *число способов,* которыми может быть реализовано данное состояние макроскопической системы, или 'число микросостояний, осуществляющих данное макросостояние (по определению, $W \geq 1$, т. е. термодинамическая вероятность не есть вероятность в математическом смысле.

В самом деле, чем больше число микросостояний, реализующих данное макросостояние, тем больше энтропия. В состоянии равновесия — наиболее вероятного состояния системы — число микросостояний максимально, при этом максимальна и энтропия.

Так как реальные процессы необратимы, то можно утверждать, что все процессы в замкнутой системе ведут к увеличению ее энтропии — принцип возрастания энтропии. При статистическом толковании энтропии это означает, что процессы в замкнутой системе идут в направлении увеличения числа микросостояний, иными словами, от менее вероятных состояний к более вероятным, до тех пор пока вероятность состояния не станет максимальной.

Видим, что энтропия и термодинамическая вероятность состояний замкнутой системы могут либо возрастать (в случае необратимых процессов), либо оставаться постоянными (в случае обратимых процессов).

Однако, эти утверждения имеют место для систем, состоящих из очень большого числа частиц, но могут нарушаться в системах с малым числом частиц. Для «малых» систем могут наблюдаться флуктуации, т. е. энтропия и термодинамическая вероятность состояний замкнутой системы на определенном отрезке времени могут убывать, а не возрастать, или оставаться постоянными.

В статистике, которая оперирует случайными величинами, любое хаотическое, т.е. случайно происходящее событие характеризуется вероятностью. Можно показать, что энтропия пропорциональна вероятности пребывания системы в определенном состоянии. Наиболее вероятным состоянием системы, состоящей из большого числа частиц, будет состояние, когда все частицы равномерно распределены по всему объему системы, т.е. они распределены хаотически. Поэтому возрастание энтропии означает, что любая система стремится в состояние с наибольшей вероятностью. Другими словами, наиболее вероятным состоянием системы является состояние полного хаоса.

Если применить этот термодинамический вывод к нашей Вселенной, то можно придти к заключению, что, несмотря на ее огромные размеры, в ней тоже поздно или рано, но обязательно произойдет выравнивание концентрации материи; температура всех частей Вселенной также выровняется и наступит естественная «тепловая смерть» Вселенной.

В действительности такой вывод является несостоятельным по ряду причин. Так, например, до сих пор никто не доказал, что Вселенную можно рассматривать как замкнутую систему (вывод о возрастании энтропии получен в предположении о замкнутости рассматриваемой системы). Кроме того, из рассмотрения других функций состояния системы с большим количеством частиц следует, что возможны локальные отклонения в распределении плотности (у нас нет возможности провести такой вывод) материи, которые получили название флуктуаций. Флуктуации могут существовать достаточно долго, причем их среднее число не меняется с течением времени.

ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

Неравновесное состояние термодинамической системы – состояние, в котором хотя бы один из параметров системы изменяется либо в пространстве, либо во времени.

В термодинамически неравновесных системах возникают особые необратимые процессы, называемые явлениями переноса. Явления переноса – это группа необратимых процессов, связанных с выравниванием неоднородностей плотности, температуры или скорости упорядоченного перемещения отдельных слоев вещества. К явлениям переноса относится **теплопроводность** (обусловлена переносом энергии), **диффузия** (обусловлена переносом массы) и **внутреннее трение** (обусловлено переносом импульса).

Теплопроводность возникает при наличии разности температур, вызванной какими-либо внешними причинами. При этом молекулы газа в разных местах его объема имеют разные средние кинетические энергии и хаотическое тепловое движение молекул приводит к направленному

переносу внутренней энергии газа. Молекулы, попавшие из нагретых областей в более холодные, отдают часть своей энергии окружающим частицам. Наоборот, медленнее движущиеся частицы, попадая из холодных областей объема газа в более нагретые, увеличивают свою энергию за счет соударений с молекулами, имеющими большие скорости и энергии.

Диффузией в простейшем случае называют самопроизвольное взаимное проникновение и перемешивание частиц двух соприкасающихся газов. В химически чистых газах при постоянной температуре диффузия возникает вследствие неодинаковой плотности в различных частях объема газа. Для смеси газов диффузия вызывается различием в концентрациях отдельных газов в разных частях объема смеси. При постоянной температуре явление диффузии заключается в переносе массы газа из мест с большой концентрацией газа в места с меньшей концентрацией.

Внутреннее трение (вязкость) связано с возникновением сил трения между слоями газа, перемещающимися параллельно с различными скоростями. Силы трения направлены по касательной к поверхности соприкосновения слоев. С молекулярно-кинетической точки зрения причиной вязкости является наложение упорядоченного движения слоев газа с различными скоростями и хаотического теплового движения молекул.

Молекулы газа, находясь в состоянии хаотического движения, непрерывно сталкиваются друг с другом. Между двумя последовательными столкновениями молекулы проходят некоторый путь *l*, который называется длиной свободного пробега. В общем случае длина пути между последовательными столкновениями различна, но так как мы имеем дело с огромным числом молекул и они находятся в беспорядочном движении, то можно говорить о средней длине свободного пробега молекул <*l*>.

Минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул, называется эффективным диаметром молекулы *d* (рис.88). Он зависит от скорости сталкивающихся молекул, т. е. от температуры газа (несколько уменьшается с ростом температуры). Так как за 1 с молекула проходит в среднем путь, равный средней арифметической скорости <v>, и если (z) —среднее число столкновений, испытываемых одной молекулой газа за 1 с, то средняя длина свободного пробега ‹l› = ‹v› / ‹z›

Для определения <z> представим себе молекулу в виде шарика диаметром *d,* которая движется среди других «застывших» молекул. Эта молекула столкнется только с теми молекулами, центры которых находятся на расстояниях, равных или меньших *d,* т. е. лежат внутри «ломаного» цилиндра радиусом *d.*

Тогда средняя длина свободного пробега молекул $\boxed{\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}}$

Эффективный диаметр молекул $d = \sqrt{\frac{\langle \upsilon \rangle M}{3\sqrt{2}\pi N_A \eta}}$

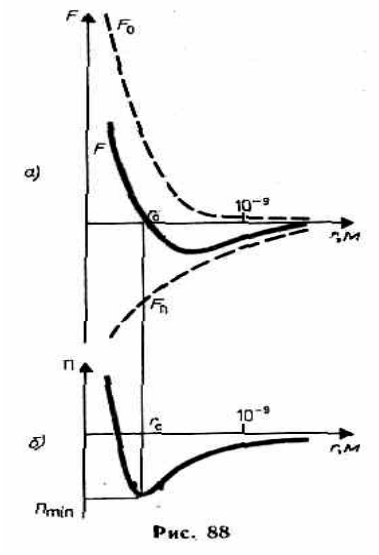


Рис. 88

Если система выведена из состояния равновесия и предоставлена самой себе, то через некоторое время она снова придет в равновесное состояние. Этот процесс перехода из неравновесного состояния в равновесное называется релаксацией системы, а промежуток времени, в течение которого система приходит в равновесное состояние, называется временем релаксации системы.

Из сопоставления формул, описывающих явления переноса, следует, что закономерности всех явлений переноса сходны между собой. Эти законы были установлены задолго до того, как они были обоснованы и выведены из МКТ, позволившей установить, что внешнее сходство их математических выражений обусловлено общностью лежащего в основе явлений теплопроводности, диффузии и внутреннего трения молекулярного механизма перемешивания молекул в процессе их хаотического движения и столкновений друг с другом.

2. Силы межмолекулярного взаимодействия. Фазовые переходы первого и второго рода. Фазовые равновесия и фазовые превращения. Критическая точка. Местабильные состояния. Тройная точка.

При рассмотрении реальных газов – газов, свойства которых зависят от взаимодействия молекул, надо учитывать силы взаимодействия, т.е. у молекул, кроме кинетической энергии их хаотического движения, появляется потенциальная энергия. Силы взаимодействия называют короткодействующими, т.к. они возникают на расстоянии $< 10^{-9}$ м и быстро убывают при увеличении расстояний между молекулами.

По мере развития представлений о строении атома было выяснено, что между молекулами вещества одновременно действуют силы притяжения (их считают положительными) и силы отталкивания (их считают отрицательными). На рис. 88, *а* приведена качественная зависимость сил межмолекулярного взаимодействия от расстояния r между молекулами, где $F_о$ и $F_п$ — соответственно силы отталкивания и притяжения, а F — их результирующая. Силы отталкивания считаются *положительными,* а силы взаимного притяжения — *отрицательными.* На расстоянии $r = r_0$ результирующая сила F=0, т. е. силы притяжения и отталкивания уравновешивают друг друга. Таким образом, расстояние r_0 соответствует равновесному расстоянию между молекулами, на котором бы они находились в отсутствие теплового движения. При $r<r_0$ преобладают силы отталкивания (F>0), при $r>r_0$ — силы притяжения (F<0). На расстояниях $r>10^{-9}$ м межмолекулярные силы взаимодействия практически отсутствуют *($F \to 0$).*На расстоянии, равном радиусу молекулы, силы притяжения и отталкивания уравновешены. Таким образом, это расстояние соответствует равновесному состоянию между молекулами, на котором бы они находились в отсутствие теплового движения.

Из анализа качественной зависимости потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними (рис. 88) следует, что если молекулы находятся друг от друга на расстоянии, на котором межмолекулярные силы не действуют, то П = 0. При постепенном сближении молекул между ними появляется сила притяжения, которая совершает положительную работу. Тогда потенциальная энергия уменьшается, достигая минимума при $r = r_0$. При $r < r_0$ с уменьшением r силы отталкивания резко возрастают и совершаемая против них работа отрицательна. Потенциальная энергия тоже резко возрастает и становится положительной. Из данной потенциальной кривой следует, что система из двух взаимодействующих молекул в состоянии устойчивого равновесия обладает минимальной потенциальной энергией.

Критерием различных агрегатных состояний вещества является соотношение между величинами $П_{min}$ и kT. $П_{min}$ – наименьшая потенциальная энергия взаимодействия молекул – определяет работу, которую нужно совершить против сил притяжения для того, чтобы разъединить молекулы, находящиеся в равновесии; kT определяет удвоенную среднюю энергию, приходящуюся на одну степень свободы хаотического движения молекул.

Фазой вещества называется термодинамически равновесное состояние вещества, отличающееся по физическим свойствам от других возможных равновесных состояний того же вещества. Если, например, в закрытом сосуде находится вода, то эта система является двухфазной: жидкая фаза – вода; газообразная фаза – смесь воздуха с водяными парами. Если в воду

бросить кусочки льда, то эта система станет трехфазной, в которой лед является твердой фазой.

Часто понятие «фаза» употребляется в смысле агрегатного состояния, однако надо учитывать, что оно шире, чем понятие «агрегатное состояние». В пределах одного агрегатного состояния вещество может находиться в нескольких фазах, отличающихся по своим свойствам, составу и строению (лед может встречаться в пяти разных фазах). Переход вещества из одной фазы в другую – фазовый переход – всегда связан с качественными изменениями свойств вещества. Примером фазового перехода могут служить изменения агрегатного состояния вещества или переходы, связанные с изменениями в составе, строении и свойствах вещества (например, переход кристаллического вещества из одной модификации в другую). Различают фазовые переходы первого и второго рода.

Фазовый переход первого рода (плавление, кристаллизация) сопровождается поглощением или выделением теплоты, называемой теплотой фазового перехода. Фазовые переходы первого рода характеризуются постоянством температуры, изменениями энтропии и объема. Например, при плавлении телу нужно сообщить некоторое количество теплоты, чтобы вызвать разрушение кристаллической решетки. Подводимая при этом теплота идет не на нагрев тела, а не разрыв межатомных связей, поэтому плавление протекает при постоянной температуре. В подобных переходах – из более упорядоченного кристаллического состояния в менее упорядоченное жидкое состояние – степень беспорядка увеличивается, т.е. согласно второго начала термодинамики, этот процесс связан с возрастанием энтропии системы. Если переход происходит в обратном направлении (кристаллизация), то система теплоту выделяет.

Фазовые переходы, не связанные с поглощением или выделением тепла и изменением объема, называются фазовыми переходами второго рода. Эти переходы характеризуются постоянством энтропии и объема, но скачкообразным изменением теплоемкости. Примером служит переход ферромагнитных веществ при определенных давлении и температуре в парамагнитное состояние; переход металлов и некоторых сплавов в сверхпроводящее состояние; превращение жидкого гелия в другую жидкую модификацию, обладающую свойствами сверхтекучести.

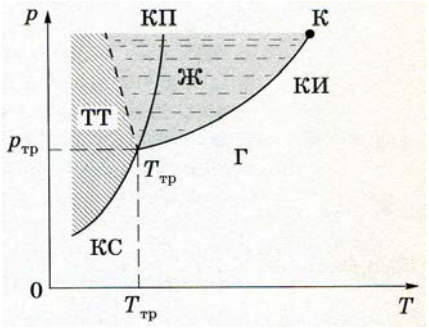
Диаграмма состояния. Тройная точка

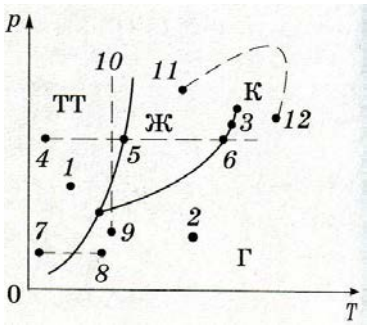
Если система является однокомпонентной, т.е. состоящей из химически однородного вещества или его соединения, то понятие фазы совпадает с понятием агрегатного состояния. Фазовые превращения определяются изменениями температуры и давления.

Для наглядного изображения фазовых превращений используется диаграмма состояния (рис.), на которой дана зависимость между

температурой фазового перехода и давлением в виде кривых кипения (КИ), плавления (КП), сублимации (КС), разделяющие поле диаграммы на три области, соответствующие условиям существования твердой (ТТ), жидкой (Ж) и газообразной (Г) фаз. Кривые на диаграмме называются кривыми фазового равновесия, каждая точка на них соответствует условиям равновесия двух сосуществующих фаз: КП – твердого тела и жидкости, КИ – жидкости и газа, КС – твердого тела и газа. Точка, в которой пересекаются эти кривые и которая, следовательно, определяет условия одновременного равновесного сосуществования трех фаз вещества, называется тройной точкой. Каждое вещество имеет только одну тройную точку. Тройная точка воды соответствует температуре 273, 16 К и является основной реперной точкой для построения термодинамической температурной шкалы.

При условиях, соответствующих точке *1*, вещество находится в твердом состоянии, точке 2 — в газообразном, а точке 3 — одновременно в жидком и газообразном состояниях. Допустим, что вещество в твердом состоянии, соответствующем точке *4,* подвергается изобарному нагреванию, изображенному на диаграмме состояния горизонтальной штриховой прямой *4*—5—*6.* Из рисунка видно, что при температуре, соответствующей точке *5,* вещество плавится, при более высокой температуре, соответствующей точке *6,*— начинает превращаться в газ. Если же вещество находится в твердом состоянии, соответствующем точке 7, то при изобарном нагревании (штриховая прямая 7—*8)* кристалл превращается в газ минуя жидкую фазу. Если вещество находится в состоянии, соответствующем точке 9, то при изотермическом сжатии (штриховая прямая *9—10)* оно пройдет следующие три состояния: газ — жидкость — кристаллическое состояние.





На диаграмме состояний видно, что кривая испарения заканчивается в критической точке К. Поэтому возможен *непрерывный* переход вещества из жидкого состояния в газообразное и обратно в обход критической точки, без пересечения кривой испарения (переход *11—12* на рис. 116), т. е. такой переход, который не сопровождается фазовыми превращениями. Это возможно благодаря тому, что различие между газом и жидкостью

является чисто количественным (оба эти состояния, например, являются изотропными). Переход же кристаллического состояния (характеризуется анизотропией) в жидкое или газообразное может быть только скачкообразным (в результате фазового перехода), поэтому кривые плавления и сублимации не могут обрываться, как это имеет место для кривой испарения в критической точке. Кривая плавления уходит в бесконечность, а кривая сублимации идет в точку, где p=0 и T=0.

ПОСТОЯННОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ

Еще в глубокой древности было известно, что янтарь, потертый о шерсть, притягивает легкие предметы. Несмотря на огромное разнообразие веществ в природе, существует только *два типа электрических зарядов:* заряды, подобные возникающим на стекле, потертом о кожу (их назвали *положительными),* и заряды, подобные возникающим на эбоните, потертом о мех (их назвали *отрицательными);* одноименные заряды друг от друга отталкиваются, разноименные — притягиваются.

Опытным путем американский физик Милликен показал, что электрический заряд дискретен, т. е. заряд любого тела составляет целое кратное от элементарного электрического заряда e (e = 1,6•10^{-19} Кл). Электрон *(*m_e = 9,11•10^{-31} кг) и протон *(*m_p=1,67•10^{-27} кг) являются соответственно носителями элементарных отрицательного и положительного зарядов.

Все тела в природе способны электризоваться, т. е. приобретать электрический заряд. Электризация тел может осуществляться различными способами: соприкосновением (трением), электростатической индукцией и т.д. Всякий процесс заряжения сводится к разделению зарядов, при котором на одном из тел (или части тела) появляется избыток положительного заряда, а на другом (или другой части тела) — избыток отрицательного заряда.

Закон сохранения заряда: алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы (системы, не обменивающейся зарядами с внешними телами) остается неизменной, какие бы процессы ни происходили внутри этой системы.

Проводники — тела, в которых электрический заряд может перемещаться по всему объему. 1) проводники первого рода (металлы) — перенесение зарядов (свободных электронов) не сопровождается химическими превращениями; 2) проводники второго рода (расплавленные соли, растворы кислот) — перенесение в них зарядов (положительных и отрицательных ионов) ведет к химическим изменениям. Полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками.

Если в пространство, окружающее электрический заряд, внести другой заряд, то на него будет действовать кулоновская сила; значит, в пространстве, окружающем электрические заряды, существует силовое поле. Согласно представлениям современной физики, поле реально существует и наряду с веществом является одной из форм существования материи, посредством которого осуществляются определенные взаимодействия между макроскопическими телами или частицами, входящими в состав вещества. В данном случае говорят об электрическом поле — поле, посредством которого взаимодействуют электрические заряды. Мы будем рассматривать электрические поля, которые создаются неподвижными электрическими зарядами и называются электростатическими.

Единица электрического заряда (производная единица, так как определяется через единицу силы тока) — кулон (Кл) — электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А за время 1 с.

Электрический диполь — система двух равных по модулю разноименных точечных зарядов (+Q, -*Q*), расстояние *l* между которыми значительно меньше расстояния до рассматриваемых точек поля. Вектор, направленный по оси диполя (прямой, проходящей через оба заряда) от отрицательного заряда к положительному и равный расстоянию между ними, называется плечом диполя *l*. Вектор $\vec{p} = |Q|\vec{l}$, совпадающий по направлению с плечом диполя и равный произведению заряда |*Q*| на плечо *l*, называется электрическим моментом диполя p или дипольным моментом (рис. 122).



Рис. 122

Работа электрического поля.

Электростатическое поле точечного заряда является потенциальным, а электростатические силы — консервативными. Работа по перемещению заряда из точки 1 в точку 2 $A_{12} = k\left(\frac{QQ_0}{r_1} - \frac{QQ_0}{r_2}\right)$ или $A_{12} = U_1 - U_2 = Q_0(\varphi_1 - \varphi_2)$.

Проводники в электростатическом поле

Если поместить проводник во внешнее электростатическое поле или его зарядить, то на заряды проводника будет действовать электростатическое поле, в результате чего они начнут перемещаться. Перемещение зарядов (ток) продолжается до тех пор, пока не установится равновесное распределение зарядов, при котором электростатическое поле

внутри проводника обращается в нуль. Это происходит в течение очень короткого времени. В самом деле, если бы поле не было равно нулю, то в проводнике возникло бы упорядоченное движение зарядов без затраты энергии от внешнего источника, что противоречит закону сохранения энергии. Итак, напряженность поля во всех точках внутри проводника равна нулю.

Отсутствие поля внутри проводника означает, что потенциал во всех точках внутри проводника постоянен (φ=const), т.е. поверхность проводника в электростатическом поле является *эквипотенциальной*. Отсюда же следует, что вектор напряженности поля на внешней поверхности проводника направлен по нормали к каждой точке его поверхности. Если бы это было не так, то под действием касательной составляющей E заряды начали бы по поверхности проводника перемещаться, что, в свою очередь, противоречило бы равновесному распределению зарядов.

Если проводнику сообщить некоторый заряд *Q*, то нескомпенсированные заряды располагаются *только на поверхности* проводника. Это следует непосредственно из теоремы Гаусса, согласно которой заряд *Q*, находящийся внутри проводника в некотором объеме, ограниченном произвольной замкнутой поверхностью, равен нулю, так как во всех точках внутри поверхности D=0.

Если во внешнее электростатическое поле внести нейтральный проводник, то свободные заряды (электроны, ионы) будут перемещаться: положительные — по полю, отрицательные — против поля. На одном конце проводника будет скапливаться избыток положительного заряда, на другом — избыток отрицательного. Эти заряды называются индуцированными.

Процесс будет происходить до тех пор, пока напряженность поля внутри проводника не станет равной нулю, а линии напряженности вне проводника — перпендикулярными его поверхности. Таким образом, нейтральный проводник, внесенный в электростатическое поле, разрывает часть линий напряженности; они заканчиваются на отрицательных индуцированных зарядах и вновь начинаются на положительных. Индуцированные заряды распределяются на внешней поверхности проводника. Явление перераспределения поверхностных зарядов на проводнике во внешнем электростатическом поле называется электростатической индукцией. Индуцированные заряды появляются на проводнике вследствие *смещения* их под действием поля, т. е. σ является поверхностной плотностью смещенных зарядов. По (92.1), электрическое смещение *D* вблизи проводника численно равно поверхностной плотности смещенных зарядов. Поэтому вектор D получил название вектора электрического смещения.

Так как в состоянии равновесия внутри проводника заряды отсутствуют, то создание внутри него полости не повлияет на

конфигурацию расположения зарядов и тем самым на электростатическое поле. Следовательно, внутри полости поле будет отсутствовать. Если теперь этот проводник с полостью заземлить, то потенциал во всех точках полости будет нулевым, т. е. полость полностью изолирована от влияния внешних электростатических полей. На этом основана электростатическая защита — экранирование тел, например измерительных приборов, от влияния внешних электростатических полей. Вместо сплошного проводника для защиты может быть использована густая металлическая сетка, которая, кстати, является эффективной при наличии не только постоянных, но и переменных электрических полей.

ЭЛЕКТРОЁМКОСТЬ

Типы диэлектриков. Условия на границе раздела двух диэлектриков и проводник-диэлектрик

Первую группу диэлектриков (N_2, H_2, O_2, CO_2, CH_4, ...) составляют вещества, молекулы которых имеют симметричное строение, т. е. центры «тяжести» положительных и отрицательных зарядов в отсутствие внешнего электрического поля совпадают и, следовательно, дипольный момент молекулы p равен нулю. Молекулы таких диэлектриков называются *неполярными*. Под действием внешнего электрического поля заряды неполярных молекул смещаются в противоположные стороны (положительные по полю, отрицательные против поля) и молекула приобретает дипольный момент.

Вторую группу диэлектриков (H_2O, NH_3, SO_2, CO, ...) составляют вещества, молекулы которых имеют асимметричное строение, т. е. центры «тяжести» положительных и отрицательных зарядов не совпадают. Таким образом, эти молекулы в отсутствие внешнего электрического поля обладают дипольным моментом. Молекулы таких диэлектриков называются *полярными*. При отсутствии внешнего поля, однако, дипольные моменты полярных молекул вследствие теплового движения ориентированы в пространстве хаотично и их результирующий момент равен нулю. Если такой диэлектрик поместить во внешнее поле, то силы этого поля будут стремиться повернуть диполи вдоль поля и возникает отличный от нуля результирующий момент.

Третью группу диэлектриков (NaCl, KCl, KBr,...) составляют вещества, молекулы которых имеют *ионное* строение. Ионные кристаллы представляют собой пространственные решетки с правильным чередованием ионов разных знаков. В этих кристаллах нельзя выделить отдельные молекулы, а рассматривать их можно как систему двух вдвинутых одна в другую ионных подрешеток. При наложении на ионный кристалл электрического поля происходит некоторая деформация кристал-

лической решетки или относительное смещение подрешеток, приводящее к возникновению дипольных моментов.

Сегнетоэлектрики — диэлектрики, обладающие в определенном интервале температур спонтанной (самопроизвольной) поляризованностью, т. е. поляризованностью в отсутствие внешнего электрического поля. К сегнетоэлектрикам относятся, например, детально изученные советскими физиками Курчатовым и Кобеко сегнетова соль $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$ (от нее и получили свое название Сегнетоэлектрики) и титанат бария $BaTiO_3$.

При отсутствии внешнего электрического поля сегнетоэлектрик представляет собой как бы мозаику из доменов — областей с различными направлениями поляризованности. Это схематически показано на примере титаната бария (рис. 139), где стрелки и знаки указывают направление вектора Р. Так как в смежных доменах эти направления различны, то в целом дипольный момент диэлектрика равен нулю. При внесении сегнетоэлектрика во внешнее поле происходит переориентация дипольных моментов доменов по полю, а возникшее при этом суммарное электрическое поле доменов будет поддерживать их некоторую ориентацию и после прекращения действия внешнего поля. Поэтому Сегнетоэлектрики имеют аномально большие значения диэлектрической проницаемости (для сегнетовой соли, например, $\varepsilon_{max} \approx 10^4$).

Сегнетоэлектрические свойства сильно зависят от температуры. Для каждого сегнетоэлектрика имеется определенная температура, выше которой его необычные свойства исчезают и он становится обычным диэлектриком. Эта температура называется точкой Кюри. Как правило, сегнетоэлектрики имеют только одну точку Кюри; исключение составляют лишь сегнетова соль (-18 и + 24 °С). В сегнетоэлектриках вблизи точки Кюри наблюдается резкое возрастание теплоемкости. Превращение сегнетоэлектриков в диэлектрик, происходящее в точке Кюри, сопровождается фазовым переходом II рода. Диэлектрическая проницаемость и восприимчивость сегнетоэлектриков зависит от напряженности поля в веществе.

Для сегнетоэлектриков связь между векторами поляризованности (Р) и напряженности (Е) *нелинейная* и зависит от значений Е в предшествующие моменты времени. В сегнетоэлектриках наблюдается явление диэлектрического гистерезиса. С увеличением напряженности E внешнего электрического поля поляризованность P растет, достигая насыщения (кривая *1*). Уменьшение P с уменьшением E происходит по кривой *2,* и при $E=0$ сегнетоэлектрик сохраняет остаточную поляризованность P_0, т. е. сегнетоэлектрик остается поляризованным в отсутствие внешнего электрического поля. Чтобы уничтожить остаточную поляризованность, надо приложить электрическое поле обратного направления ($-E_c$). Вели-

чина E_c называется коэрцитивной силой (от лат. coercitio — удерживание). Если далее E изменять, то P изменяется по кривой 3 петли гистерезиса.

Интенсивному изучению сегнетоэлектриков послужило открытие советским физиком Вулом аномальных диэлектрических свойств титаната бария. Титанат бария из-за его химической устойчивости и высокой механической прочности, а также из-за сохранения сегнетоэлектрических свойств в широком температурном интервале нашел большое научно-техническое применение (например, в качестве генератора и приемника ультразвуковых волн). В настоящее время известно более сотни сегнетоэлектриков, не считая их твердых растворов. Сегнетоэлектрики широко применяются также в качестве материалов с большими значениями ε (например, в конденсаторах).

Пьезоэлектрики — кристаллические вещества, в которых при сжатии или растяжении в определенных направлениях возникает электрическая поляризация даже в отсутствие внешнего электрического поля (прямой пьезоэффект).

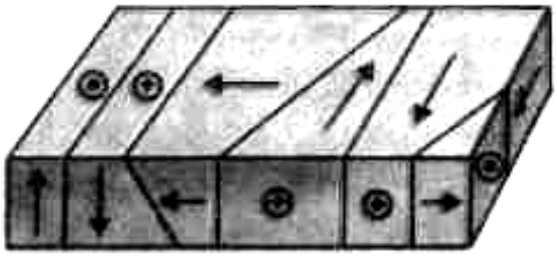


Рис. 139

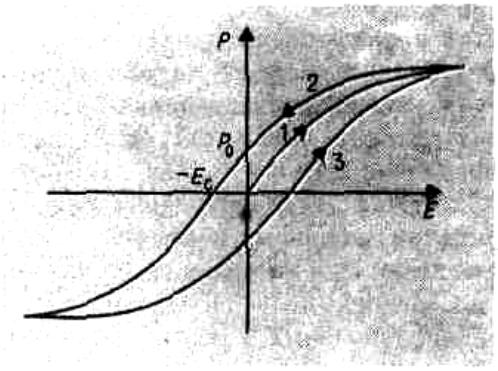


Рис. 140

Следствием прямого пьезоэффекта является обратный пьезоэффект — появление механической деформации под действием электрического поля. У некоторых пьезоэлектриков решетка положительных ионов в состоянии термодинамического равновесия смещена относительно решетки отрицательных ионов, в результате чего они оказываются электрически поляризованными даже без внешнего электрического поля. Такие кристаллы называются пироэлектриками.

Еще существуют *электреты* — диэлектрики, длительно сохраняющие поляризованное состояние после снятия внешнего электрического поля (электрические аналоги постоянных магнитов). Эти группы веществ находят широкое применение в технике и бытовых устройствах.

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Общие характеристики и условия существования электрического тока. Сторонние силы. ЭДС гальванического элемента.

В электродинамике - разделе учения об электричестве, в котором рассматриваются явления и процессы, обусловленные движением электрических зарядов или макроскопических заряженных тел, - важнейшим понятием является понятие электрического тока. Электрическим током называется любое упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов. В проводнике под действием приложенного электрического поля $\vec{E}$ свободные электрические заряды перемещаются: положительные - по полю, отрицательные - против поля, т.е. в проводнике возникает электрический ток, называемый током проводимости. Если же упорядоченное движение электрических зарядов осуществляется перемещением в пространстве заряженного макроскопического тела, то возникает конвекционный ток.

Для возникновения и существования электрического тока необходимо, с одной стороны, наличие свободных носителей тока - заряженных частиц, способных перемещаться упорядоченно, а с другой - наличие электрического поля, энергия которого, каким-то образом восполняясь, расходовалась бы на их упорядоченное движение. За направлением тока условно принимают направление движения положительных зарядов.

Если в цепи на носители тока действуют только силы электростатического поля, то происходит перемещение носителей (они предполагаются положительными) от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом. Это приведет к выравниванию потенциалов во всех точках цепи и к исчезновению электрического поля. Поэтому для существования постоянного тока необходимо наличие в цепи устройства, способного создавать и поддерживать разность потенциалов за счет работы сил неэлектростатического происхождения. Такие устройства называются источниками тока. Силы неэлектростатического происхождения, действующие на заряды со стороны источников тока, называются сторонними силами.

Природа сторонних сил может быть различной. Например, в гальванических элементах они возникают за счет энергии химических реакций между электродами и электролитами; в генераторе - за счет механической энергии вращения ротора генератора и т.п.. Роль источника тока в электрической цепи, образно говоря, такая же, как роль насоса, который необходим для перекачивания жидкости в гидравлической системе. Под действием создаваемого поля сторонних сил электрические заряды движутся внутри источника тока против сил электростатического поля, благодаря чему на концах цепи поддерживается разность потенциалов и в цепи течет постоянный электрический ток.

Сторонние силы совершают работу по перемещению электрических зарядов. Физическая величина, определяемая работой, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда, называется электродвижущей силой (ЭДС) действующей в цепи: ξ =

A/Q_0 Эта работа производится за счет энергии, затрачиваемой в источнике тока, поэтому величину ξ, можно также называть электродвижущей силой источника тока, включенного в цепь. Часто, вместо того чтобы сказать «в цепи действуют сторонние силы» говорят: «в цепи действует ЭДС», т.е. термин «электродвижущая сила» употребляется как характеристика сторонних сил. ЭДС, как и потенциал, выражается в вольтах.

ЭДС, действующая в цепи $\xi_{12} = \int_1^2 \vec{E}_{cm} d\vec{l}$, т.е. ЭДС, действующая в замкнутой цепи, может быть определена как циркуляция вектора напряженности поля сторонних сил.

Работа $A_{12} = Q_0\xi_{12} + Q_0(\varphi_1 - \varphi_2)$. для замкнутой цепи работа электрических сил равна нулю, поэтому $A_{12} = Q_0\xi_{12}$.

Электрический ток в плазме

Плазма – четвертое состояние вещества - (сильно ионизованный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных зарядов практически одинакова) обладает следующими основными свойствами: высокой степенью ионизации газа; равенством нулю результирующего пространственного заряда; большой электропроводностью; свечением; сильным воздействием с электрическим и магнитным полями; колебаниями электронов в плазме с большой частотой, вызывающими общее вибрационное состояние плазмы; одновременным взаимодействием громадного числа частиц (в обычных газах частицы взаимодействуют друг с другом попарно).

Термоэлектронная эмиссия - испускание электронов нагретыми металлами. Концентрация свободных электронов в металлах достаточно высока, поэтому даже при средних температурах вследствие распределения электронов по скоростям (по энергиям) некоторые электроны обладают энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера на границе металла. С повышением температуры число электронов, кинетическая энергия теплового движения которых больше работы выхода, растет, и явление термоэлектронной эмиссии становится заметным.

Исследование закономерностей термоэлектронной эмиссии можно провести с помощью простейшей двухэлектродной лампы - вакуумного диода, представляющего собой откачанный баллон, содержащий два электрода: катод К и анод А. в простейшем случае катодом служит нить из тугоплавкого металла (например вольфрама), накаливаемая электрическим током. Анод чаще всего имеет форму металлического цилиндра, окружающего катод. Если диод включить в цепь, как это показано на

рис.6, то при накаливании катода и подаче на анод положительного напряжения (относительно катода) в анодной цепи диода возникает ток. Если поменять полярность батареи Ба, то ток прекращается, как бы сильно катод ни накаливали. Следовательно, катод испускает отрицательные частицы-электроны.

Если поддерживать температуру наколенного катода постоянной и снять зависимость анодного тока Ia от анодного напряжения Ua – вольтамперную характеристику (рис.153), то оказывается, что она является линейной, т.е.для вакуумного диода закон Ома не выполняется. Зависимость термоэлектронного тока I от анодного напряжения в области малых положительных значений U описывается законом трех вторых (установлен Богуславским и Ленгмюром): $I=BU^{3/2}$, где B-коэффициент, зависящий от формы и размеров электродов, а также их взаимного расположения.

При увеличении анодного напряжения ток возрастает до некоторого максимального значения, называемого током насыщения. Это означает, что почти все электроны, покидающие катод, достигают анода, поэтому дальнейшее увеличение напряженности поля не может привести к увеличению термоэлектронного тока. Следовательно, плотность тока насыщения характеризует эмиссионную способность материала катода.

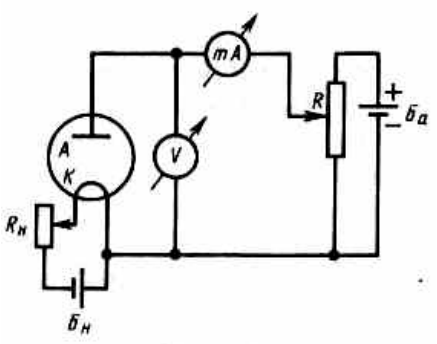


Рис. 152

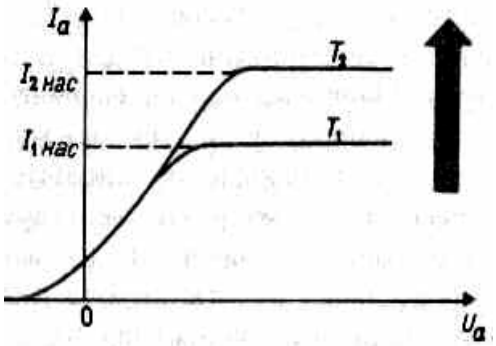


Рис. 153

На рис представлены вольт - амперные характеристики для двух температур катода: T1 и T2, причем T2>T1. с повышением температуры катода испускание электронов с катода интенсивнее, при этом увеличивается и ток насыщения. При Ua=0 наблюдается анодный ток, т.е. некоторые электроны, эмитируемые катодом, обладают энергией, достаточной для преодоления работы выхода и достижения анода без приложения электрического поля.

Явление термоэлектронной эмиссии используется в приборах, в которых необходимо получить поток электронов в вакууме, например в электронных лампах, рентгеновских трубках, электронных микроскопах и

т.д. Электронные лампы широко применяются в электро- и радиотехнике, автоматике и телемеханике для выпрямления переменных токов, усиления электрических сигналов и переменных токов, генерирования электромагнитных колебаний и т.д. В зависимости от назначения в лампах используются дополнительные управляющие электроды.

Вторичная электронная эмиссия - испускание электронов поверхностью металлов, полупроводников или диэлектриков при бомбардировке их пучком электронов. Вторичный электронный поток состоит из электронов, отраженных поверхностью (упруго и неупруго отраженные электроны), и «истинно» вторичных электронов-электронов, выбитых из металла, полупроводника или диэлектрика первичными электронами.

Отношение числа вторичных n_2 электронов к числу первичных n_1, вызвавших эмиссию, называется коэффициентом вторичной электронной эмиссии: $\delta = n_2 / n_1$.

Коэффициент δ зависит от природы материала поверхности, энергии бомбардирующих частиц и их угла падения на поверхность. У полупроводников и диэлектриков δ больше, чем у металлов. Это объясняется тем, что в металлах, где концентрация электронов проводимости велика, вторичные электроны, часто сталкиваясь с ними, теряют свою энергию и не могут выйти из металла. В полупроводниках и диэлектриках же из-за малой концентрации электронов проводимости столкновения вторичных электронов с ними происходят гораздо реже и вероятность выхода вторичных электронов из эмиттера возрастает в несколько раз.

Для примера на рис. приведена качественная зависимость коэффициента вторичной электронной эмиссии δ от энергии E падающих электронов для KCl. С увеличением энергии электронов δ возрастает, так как первичные электроны все глубже проникают в кристаллическую решетку и, следовательно, выбивают больше вторичных электронов. Однако при некоторой энергии первичных электронов δ начинает уменьшаться. Это связано с тем, что с увеличением глубины проникновения первичных электронов вторичным все труднее вырваться на поверхность. Значение δ_{max} для KCl достигает ≈12 (для чистых металлов оно не превышает 2).

Явление вторичной электронной эмиссии используется в фотоэлектронных умножителях (ФЭУ), применяемых для усиления слабых электрических токов. ФЭУ представляет собой вакуумную трубку с фотокатодом К и анодом А, между которыми расположено несколько электродов – эмиттеров. Электроны, вырванные из фотокатода под действием света, попадают на эмиттер Э1, пройдя ускоряющую разность потенциалов между К и Э1. Из эмиттера Э1 выбивается δ электронов. Усиленный таким образом электронный поток направляется на эмиттер

Э2, и процесс умножения повторяется на всех последующих эмиттерах. Если ФЭУ содержит n эмиттеров, то на аноде А, называемом коллектором, получается усиленный в δ^n раз фотоэлектронный ток.

Автоэлектронная эмиссия – испускание электронов проводящими твердыми и жидкими телами под действием сильного внешнего электрического поля. Эти явления можно наблюдать в откаченной трубке, конфигурация электродов которой (катод – острие, анод – внутренняя поверхность трубки) позволяет при напряжениях примерно 10^3 В получать электрические поля напряженностью примерно 10^7 В/м. При постепенном повышении напряжения уже при напряженности поля у поверхности катода примерно 10^5 - 10^6 В/м возникает слабый ток, обусловленный электродами, испускаемыми катодом. Сила этого тока увеличивается с повышением напряжения на трубке. Токи возникают при холодной эмиссией. Объяснение механизма этого явления возможно лишь на основе квантовой теории.

Электрический ток в газах

Газы при не слишком высоких температурах и при давлениях, близких к атмосферному, являются хорошими изоляторами. Если поместить в сухой атмосферный воздух, заряженный электрометр с хорошей изоляцией, то его заряд долго остается неизменным. Это объясняется тем, что газы при обычных условиях состоят из нейтральных атомов и молекул и не содержат свободных зарядов (электронов и ионов). Газ становится проводником электричества, когда некоторая часть его молекул ионизуется, т.е. происходит расщепление нейтральных атомов и молекул на ионы и свободные электроны. Для этого газ надо подвергнуть действию какого-либо ионизатора (например, если к заряженному электрометру поднести пламя свечи, то наблюдается уменьшение его заряда. Электропроводность газа вызывается нагреванием).

Под действием какого-либо ионизатора происходит вырывание из электронной оболочки атома или молекулы одного или нескольких электронов, что приводит к образованию свободных электронов и положительных ионов. Электроны могут присоединяться к нейтральным молекулам и атомам, превращая их в отрицательные ионы. Следовательно, в ионизованном газе имеются положительные и отрицательные ионы и свободные электроны. Прохождение электрического тока через газы называется газовым разрядом.

Ионизация газов может происходить под действием различных ионизаторов: сильный нагрев (столкновения быстрых молекул становятся настолько сильными, что они разбиваются на ионы), короткое электромагнитное излучение (ультрафиолетовое, рентгеновское и γ -

излучение), корпускулярное излучение (потоки электронов, протонов, α - частиц), и т.д.

Атомы и молекулы – устойчивые системы заряженных частиц. Поэтому для ионизации атома (или молекулы) газа необходимо совершить работу ионизации Аи. Работа ионизации зависит от химической природы газа и энергетического состояния вырываемого электрона в ионизируемом атоме или молекуле. Наиболее слабо связаны в атоме внешние (валентные) электроны. Поэтому для удаления из атома валентного электрона нужно затратить меньшую работу, чем для вырывания любого другого электрона атома. После удаления из атома валентного электрона и образования таким образом положительного иона прочность связи остальных электронов возрастает. Следовательно, для удаления из однократно ионизированного атома (одновалентного иона) еще одного электрона нужно совершить работу, которая значительно больше работы отрыва первого электрона.

Работа ионизации можно характеризовать с помощью потенциала ионизации. Потенциалом ионизации $\varphi_и$ называется разность потенциалов, которую должен пройти электрон в ускоряющем электрическом поле, чтобы увеличение его энергии было равно работе ионизации: $\varphi_и = \frac{A_и}{e}$

Количественной характеристикой процесса ионизации служит *интенсивность ионизации,* равная числу пар противоположных по знаку заряженных частиц, возникающих в единице объема газа за единицу времени. Одновременно с процессом ионизации газа происходит и обратный процесс – процесс *рекомбинации*: положительные и отрицательные ионы, положительные ионы и электроны, встречаясь, воссоединяются между собой с образованием нейтральных атомов и молекул. Чем больше ионов возникает под действием ионизатора, тем интереснее идет и процесс рекомбинации.

Строго говоря, электропроводность газа нулю не равна никогда, так как в нем всегда имеются свободные заряды, образующиеся в результате действия на газы излучения радиоактивных веществ, имеющихся на поверхности Земли, а также космического излучения. Эта незначительная электропроводность воздуха (интенсивность ионизации под действием указанных факторов невелика) служит причиной утечки зарядов наэлектризованных тел даже при хорошей их изоляции.

Характер газового разряда определяется составом газа, его температурой и давлением, размерами, конфигурацией и материалом электродов, приложенных напряжением, плотностью тока.

Рассмотрим цепь, содержащую газовый промежуток (рис), подвергающийся непрерывному, постоянному по интенсивности воздействия ионизатора. В результате действия ионизатора газ приобретает некоторую электропроводность. Зависимость возникающего в цепи тока от приложенного напряжения дана на рис.

На участке кривой ОА сила тока возрастает пропорционально напряжению, т.е. выполняется закон Ома. При дальнейшем увеличении напряжения закон Ома нарушается: рост силы тока замедляется (участок АВ) и наконец прекращается совсем. Участок ВС описывает процесс, когда ионы и электроны, создаваемые внешним ионизатором за единицу времени за тоже время достигают электродов. В результате получаем ток насыщения ($I_{нас}$), значение которого определяется мощностью ионизатора. Ток насыщения, таким образом, является мерой ионизирующего действия ионизатора. Если в режиме ОС прекратить действие ионизатора, то прекращается и разряд. Разряды, существующие только под действием внешних ионизаторов, называются несамостоятельными.

Самостоятельный разряд – разряд в газе, сохраняющийся после прекращения действия внешнего ионизатора. При больших напряжениях возникающие под действием внешнего ионизатора электроны, сильно ускоренные электрическим полем, сталкиваясь с нейтральными молекулами газа, ионизируют их, в результате чего образуются вторичные электроны и положительные ионы. Положительные ионы движутся к катоду, а электроны – к аноду. Вторичные электроны вновь ионизируют молекулы газа, и, следовательно, общее количество электронов и ионов будет возрастать по мере продвижения электронов к аноду лавинообразно. Описанный процесс называется ударной ионизацией.

Однако ударная ионизация под действием электронов недостаточна для поддержания разряда при удалении внешнего ионизатора. Для этого необходимо, чтобы электронные лавины «воспроизводились», т.е. чтобы в газе под действием каких-то процессов возникали новые электроны. Такие процессы схематически показаны на рис.: 1) ускоренные полем положительные ионы, ударяясь о катод, выбивают из него электроны; 2) положительные ионы, сталкиваясь с молекулами газа, переводят их в возбужденное состояние; переход таких молекул в нормальное состояние сопровождается испусканием фотона; 3) фотон, поглощенный нейтральной молекулой, ионизирует ее, происходит так называемый процесс фотонной ионизации молекул; 4) выбивание электронов из катода.

Наконец, при значительных напряжениях между электродами газового промежутка наступает момент, когда положительные ионы, обладающие меньшей длиной свободного пробега, чем электроны, приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул газа, и к отрицательной пластине устремляются ионные лавины. Когда возникают, кроме электронных лавин, еще и ионные, сила тока растет уже практически без увеличения напряжения.

В результате описанных процессов число ионов и электронов в объеме газа лавинообразно возрастает и разряд становится самостоятельным разрядом, т.е. сохраняется после прекращения действия внешнего

ионизатора. Напряжение, при котором возникает самостоятельный разряд, называется напряжением пробоя.

В зависимости от давления газа, конфигурация электродов, параметров внешней цепи можно говорить о четырех типах самостоятельного разряда: тлеющем, искровом, дуговом и коронном.

1. *Тлеющий разряд* возникает при низких давлениях. Если к электродам, впаянным в стеклянную трубку длиной 30-50 см, приложить постоянное напряжение в несколько сотен вольт, постепенно откачивая из трубки воздух, то при давлении ≈ 5,3-6,7 кПа возникает разряд в виде светящегося извилистого шнура красноватого цвета, идущего от катода к аноду. При дальнейшем понижении давления шнур утолщается.

Непосредственно к катоду прилегает тонкий светящийся слой 1 – первое катодное свечение, или катодная пленка, затем следует темный слой 2 – катодное темное пространство, переходящее в дальнейшем в светящийся слой 3 – тлеющее свечение, имеющее резкую границу со стороны катода, постепенно исчезающую со стороны анода. Оно возникает из-за рекомбинации электронов с положительными ионами. С тлеющим свечением граничит темный промежуток 4 – фарадеево темное пространство, за которым следует столб ионизированного светящегося газа 5 – положительный столб. Положительный столб существенной роли в поддержании разряда не имеет. Например, при уменьшении расстояния между электродами трубки его длина сокращается, в то время как катодные части разряда по форме и величине остаются неизменными.

При давлении ≈ 1,3 Па свечение газа ослабевает и начинают светиться стенки трубки. Электроны, выбиваемые из катода положительными ионами, при таких разрежениях редко сталкиваются с молекулами газа и поэтому, ускоренные полем, ударяясь о стекло, вызывают его свечение, так называемую катодолюминесценцию. Поток этих электронов исторически получил название катодных лучей. Если в катоде просверлить малые отверстия, то положительные ионы, бомбардирующие катод, пройдя через отверстия, проникают в пространство за катодом и образуют резко ограниченный пучок, получивший название каналовых (или положительных) лучей, названых по заряду, который они несут.

Тлеющий разряд широко используется в технике. Так как свечение положительного столба имеет характерный для каждого газа цвет, то его используют в газосветных трубках для светящихся надписей и реклам (например, неоновые газоразрядные трубки дают красное свечение, аргоновые - синевато-зеленое). В лампах дневного света, более экономичных, чем лампы накаливания, излучение тлеющего разряда, происходящее в парах ртути, поглощается нанесенным на внутреннюю поверхность трубки флуоресцирующим веществом (люминофором). Под воздействием поглощенного излучения люминофор начинает светиться. Спектр свечения при соответствующем подборе люминофоров близок к

спектру солнечного излучения. Тлеющий разряд используется для катодного напыления металлов. Вещество катода в тлеющем разряде вследствие бомбардировки положительными ионами сильно нагревается и переходит в парообразное состояние. Помещая вблизи катода различные предметы, их можно покрыть равномерным слоем металла.

2.*Искровой разряд* возникает при больших напряженностях электрического поля ($\approx 3*10^6$ В/м) в газе, находящемся под давлением порядка атмосферного. Искра имеет вид ярко светящегося тонкого канала, сложным образом изогнутого и разветвленного.

Объяснение искрового разряда на основе стримерной теории, согласно которой возникновению ярко светящегося канала искры предшествует появление слабосветящихся скоплений ионизованного газа - стримеров. Стримеры возникают не только в результате образования электронных лавин посредством ударной ионизации, но и в результате фотонной ионизации газа. Лавины, догоняя друг друга, образуют проводящие мостики из стримеров, по которым в следующие моменты времени и устремляются мощные потоки электронов, образующие каналы искрового разряда. Из-за выделения при рассмотренных процессах большого количества энергии газ в искровом промежутке нагревается до очень высокой температуры (примерно 10^4 К), что приводит к его свечению. Быстрый нагрев газа ведет к повышению давления и возникновению ударных волн, объясняющих звуковые эффекты при искровом разряде – характерное потрескивание в слабых разрядах и мощные раскаты грома в случае молнии, являющейся примером мощного искрового разряда между грозовым облаком и землей или между двумя грозовыми облаками.

Искровой разряд используется для воспламенения горючей смеси в двигателях внутреннего сгорания и предохранения электрических линий передачи от перенапряжений (искровые разрядники). При малой длине разрядного промежутка искровой разряд вызывает разрушение (эрозию) поверхности металла, поэтому он применяется для электроискровой точной обработки металлов (резание, сверление). Его используют в спектральном анализе для регистрации частиц (искровые счетчики).

3.*Дуговой разряд.* Если после зажигания искрового разряда от мощного источника постепенно уменьшать расстояние между электродами, то разряд становится непрерывным – возникает дуговой разряд. При этом сила тока резко возрастает, достигая сотен ампер, а напряжение на разрядном промежутке падает до нескольких десятков вольт. Дуговой разряд можно получить от источника низкого напряжения минуя стадию искры. разряд поддерживается за счет высокой температуры катода из – за интенсивной термоэлектронной эмиссии, а также термической тонизации молекул, обусловленной высокой температурой газа.

Дуговой разряд находит широкое применение для сварки и резки металлов, получения высококачественных сталей (дуговая печь) и

освещения (прожекторы, проекционная аппаратура). Широко применяются также дуговые лампы с ртутными электродами в кварцевых баллонах, где дуговой разряд возникает в ртутном паре при откачанном воздухе. Дуга, возникающая в ртутном паре, является мощным источником ультрафиолетового излучения и используется в медицине.

4.*Коронный разряд* – высоковольтный электрический разряд при высоком (например, атмосферном) давлении в резко неоднородном поле вблизи электродов с большой кривизной поверхности (например острия). Когда напряженность поля вблизи острия достигает 30 кВ/см, то вокруг него возникает свечение, имеющее вид короны, чем и вызвано название этого вида разряда.Коронный разряд, являясь прерывистым, становится также источником радиопомех.

Используется коронный разряд в электрофильтрах, применяемых для очистки промышленных газов от примесей. Коронный разряд применяется также при нанесении порошковых и лакокрасочных покрытий.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ И ВЕЩЕСТВЕ

Работа по перемещению проводника и контура с током в магнитном поле равна произведению силы тока на магнитный поток, пересеченный движущимся проводником. $\boxed{dA = Id\Phi}$ Работа по перемещению замкнутого контура с током в магнитном поле равна произведению силы тока в контуре на *изменение магнитного потока, сцепленного с контуром* $\boxed{dA = I\left(d\Phi_2 - d\Phi_1\right)}$

Движение заряженных частиц в магнитном поле

1. Если заряженная частица движется в магнитном поле со скоростью v вдоль линий магнитной индукции, сила Лоренца равна нулю, т. е. магнитное поле на частицу не действует и она движется равномерно и прямолинейно.
2. Если заряженная частица движется в магнитном поле со скоростью v, перпендикулярной вектору B, то сила Лоренца постоянна по модулю и нормальна к траектории частицы. Согласно второму закону Ньютона, частица будет двигаться по окружности $r = \frac{m}{Q}\frac{\upsilon}{B}$ с периодом $T = \frac{2\pi}{B}\frac{m}{Q}$
3. Если скорость v заряженной частицы **направлена под углом** а к вектору B (рис. 170), то возникает движение по спирали, ось которой параллельна магнитному полю (рис. 170). Шаг винтовой линии $h = \upsilon_{\parallel}T = \upsilon T\cos\alpha$ или $h = \frac{2\pi m\upsilon\cos\alpha}{BQ}$

Эффект Холла – это возникновение поперечного электрического поля в проводнике (или полупроводнике) с током при его помещении в магнитное поле $\Delta\varphi = \frac{1}{en}\frac{IB}{d} = R\frac{IB}{d}$, где $\Delta\varphi$ — поперечная (холловская) разность

потенциалов, d- толщина пластинки, n – концентрация электронов, R – постоянная Холла, зависящая от вещества $R = \frac{1}{en}$

Ферромагнетики - вещества, обладающие спонтанной намагниченностью, т. е. они намагничены даже при отсутствии внешнего магнитного поля (железо, кобальт, никель, гадолиний, их сплавы и соединения). Особенность ферромагнетиков — большие значения μ (для железа — 5000) и сложная зависимость μ от *H*, что определяется тем, как ферромагнетик был намагничен. Это явление получило название магнитного гистерезиса. Если намагнитить ферромагнетик до насыщения (точка *1*, рис. 195), а затем начать уменьшать напряженность *H* намагничивающего поля, то, как показывает опыт, уменьшение *J* описывается кривой *1—2,* лежащей выше кривой *1*—0. При *H*=0 *J* отличается от нуля, т. е. в ферромагнетике наблюдается остаточное намагничение $J_{ос}$.

С наличием остаточного намагничения связано существование постоянных магнитов. Намагничение обращается в нуль под действием поля H_C, имеющего направление, противоположное полю, вызвавшему намагничение. Напряженность H_C называется коэрцитивной силой.

При дальнейшем увеличении противоположного поля ферромагнетик перемагничивается (кривая *3—4),* и при $H=-H_{нас}$ достигается насыщение (точка *4).* Затем ферромагнетик можно опять размагнитить (кривая *4—5—6)* и вновь перемагнитить до насыщения (кривая 6-*1*).

Таким образом, при действии на ферромагнетик переменного магнитного поля намагниченность J изменяется в соответствии с кривой *1—2—3—4—5—6—1,* которая называется петлей гистерезиса (от греч. «запаздывание»). Гистерезис приводит к тому, что намагничение ферромагнетика не является однозначной функцией H, т. е. одному и тому же значению *H* соответствует несколько значений *J*.

Различные ферромагнетики дают разные гистерезисные петли. Ферромагнетики с малой (в пределах от нескольких тысячных до 1—2 А/см) коэрцитивной силой H_C (с узкой петлей гистерезиса) называются мягкими, с большой (от нескольких десятков до нескольких тысяч ампер на сантиметр) коэрцитивной силой (с широкой петлей гистерезиса) — жесткими. Величины H_C, $J_{ос}$ и μ_{max} определяют применимость ферромагнетиков для тех или иных практических целей. Так, жесткие ферромагнетики (например, углеродистые и вольфрамовые стали) применяются для изготовления постоянных магнитов, а мягкие (например, мягкое железо, сплав железа с никелем) —для изготовления сердечников трансформаторов.

Ферромагнетики обладают еще одной существенной особенностью: для каждого ферромагнетика имеется определенная температура,

называемая точкой Кюри, при которой он теряет свои магнитные свойства. При нагревании образца выше точки Кюри ферромагнетик превращается в обычный парамагнетик. Переход вещества из ферромагнитного состояния в парамагнитное, происходящий в точке Кюри, не сопровождается поглощением или выделением теплоты, т. е. в точке Кюри происходит фазовый переход II рода.

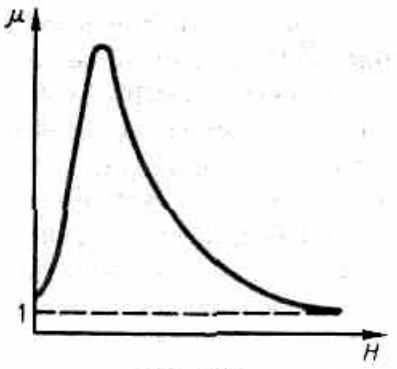


Рис. 194

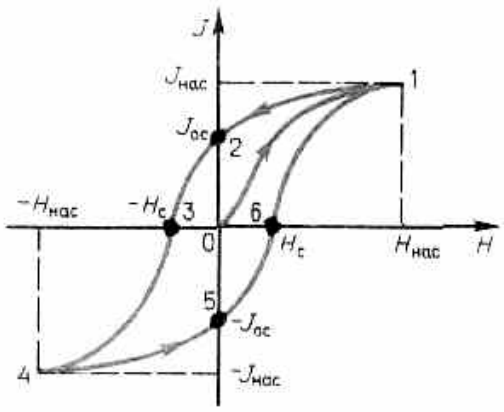


Рис. 195

Наконец, процесс намагничения ферромагнетиков сопровождается изменением его линейных размеров и объема. Это явление получило название магнитострикции. Величина и знак эффекта зависят от напряженности Я намагничивающего поля, от природы ферромагнетика и ориентации кристаллографических осей по отношению к полю.

Природа ферромагнетизма

Описательная теория ферромагнетизма была разработана французским физиком Вейссом. Последовательная количественная теория на основе квантовой механики развита советским физиком Френкелем и немецким физиком Гейзенбергом.

Согласно представлениям Вейсса, ферромагнетики при температурах ниже точки Кюри обладают спонтанной намагниченностью независимо от наличия внешнего намагничивающего поля. Спонтанное намагничение, однако, находится в кажущемся противоречии с тем, что многие ферромагнитные материалы даже при температурах ниже точки Кюри не намагничены. Для устранения этого противоречия Вейсс ввел гипотезу, согласно которой ферромагнетик ниже точки Кюри разбивается на большое число малых макроскопических областей — доменов, самопроизвольно намагниченных до насыщения.

При отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты отдельных доменов ориентированы хаотически и компенсируют друг друга, поэтому результирующий магнитный момент ферромагнетика равен

нулю и ферромагнетик не намагничен. Внешнее магнитное поле ориентирует по полю магнитные моменты не отдельных атомов, как это имеет место в случае парамагнетиков, а целых областей спонтанной намагниченности. Поэтому с ростом H намагниченность J (см. рис. 192) и магнитная индукции B уже в довольно слабых полях растут очень быстро. Этим объясняется также увеличение μ ферромагнетиков до максимального значения в слабых полях (см. рис. 194). Это свидетельствует о том, что внутри ферромагнетика домены поворачиваются по полю скачком.

При ослаблении внешнего магнитного поля до нуля ферромагнетики сохраняют остаточное намагничение, так как тепловое движение не в состоянии быстро дезориентировать магнитные моменты столь крупных образований, какими являются домены. Поэтому и наблюдается явление магнитного гистерезиса (рис.195). Для того чтобы ферромагнетик размагнитить, необходимо приложить коэрцитивную силу; размагничиванию способствуют также встряхивание и нагревание ферромагнетика. Точка Кюри оказывается той температурой, выше которой происходит разрушение доменной структуры.

Существование доменов в ферромагнетиках доказано экспериментально. Прямым экспериментальным методом их наблюдения является метод порошковых фигур.

ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Правило Ленца: индукционный ток в контуре имеет всегда такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызвавшего этот индукционный ток.

Возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока называется самоиндукцией. Если контур не деформируется и магнитная проницаемость среды не изменяется, то L=const и $\boxed{\xi_S = -L\frac{dI}{dt}}$, где знак минус, обусловленный правилом Ленца, показывает, что наличие индуктивности в контуре приводит к замедлению изменения тока в нем. Таким образом, контур, обладая определенной индуктивностью, приобретает электрическую инертность, заключающуюся в том, что любое изменение тока тормозится тем сильнее, чем больше индуктивность контура.

Экстратоки самоиндукции – это дополнительные токи за счет возникновения ЭДС самоиндукции при любом изменении силы тока в цепи. Согласно правилу Ленца, они всегда направлены так, чтобы препятствовать изменениям тока в цепи, т. е. направлены противоположно току, создаваемому источником. При выключении источника тока экстратоки имеют такое же направление, что и ослабевающий ток.

Следовательно, наличие индуктивности в цепи приводит к замедлению исчезновения или установления тока в цепи.

Размыкание цепи Сила тока при размыкании цепи убывает по экспоненциальному закону $I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$, где $\tau = \frac{L}{R}$ — постоянная, называемая временем релаксации - время, в течение которого сила тока уменьшается в е раз. Таким образом, в процессе отключения источника э.д.с. сила тока определяется кривой 1 на рис. 183. Чем больше индуктивность цепи и меньше ее сопротивление, тем больше т и, следовательно, тем медленнее уменьшается ток в цепи при ее размыкании.

Оценка ЭДС самоиндукции при размыкании цепи $\xi_S = \frac{R}{R_0}\xi e^{-\frac{R}{L}t}$ Таким образом, в процессе включения источника э.д.с. нарастание силы тока в цепи определяется кривой 2. Установление тока происходит тем быстрее, чем меньше индуктивность цепи и больше ее сопротивление.

Замыкание цепи Сила тока при замыкании цепи $I = I_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$

Взаимная индукция – это явление возникновения ЭДС в одном из контуров при изменении силы тока в другом.

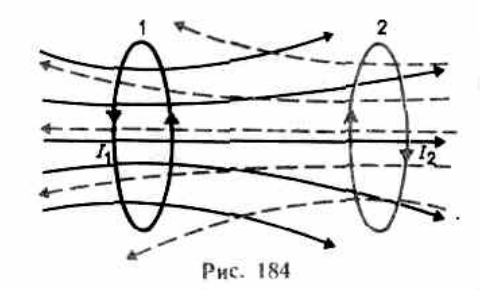


Рис. 184

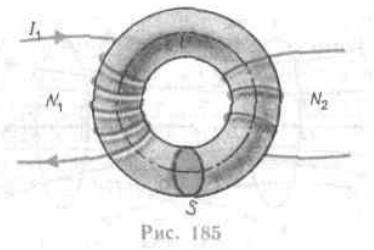


Рис. 185

Если ток I_1 изменяется, то в контуре 2 индуцируется э.д.с., которая по закону Фарадея, равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока Φ_{21}, созданного током в первом контуре и пронизывающего второй: $\xi_{i1} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L\frac{dI_2}{dt}$ (рис. 184) Аналогично для второго контура.

Взаимная индуктивность двух катушек, намотанных на общий тороидальный сердечник $L = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} S$ (рис. 185).

Трансформатор – это устройство, применяемое для повышения или понижения напряжения переменного тока (рис. 186)

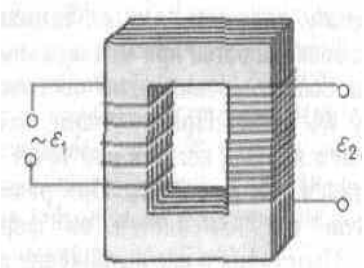


Рис. 186

Принцип действия трансформаторов, применяемых для повышения или понижения напряжения переменного тока, основан на явлении взаимной индукции. Отношение числа витков, показывающее, во сколько раз ЭДС во вторичной обмотке трансформатора больше (или меньше), чем в первичной, называется коэффициентом трансформации $k = \frac{N_2}{N_1}$. Если k>1, то трансформатор повышающий, увеличивающий переменную ЭДС и понижающим ток; если k<1, то трансформатор понижающий, уменьшающий ЭДС и повышающим ток.

Теория Максвелла, являясь обобщением основных законов электрических и магнитных явлений, смогла объяснить не только уже известные экспериментальные факты, что также является важным ее следствием, но и предсказала новые явления. Одним из важных выводов этой теории явилось существование магнитного поля токов смещения, что позволило Максвеллу предсказать существование электромагнитных волн — переменного электромагнитного поля, распространяющегося в пространстве с конечной скоростью. В дальнейшем было доказано, что скорость распространения свободного электромагнитного поля (не связанного с зарядами и токами) в вакууме равна скорости света с = $3 \cdot 10^8$ м/с. Этот вывод и теоретическое исследование свойств электромагнитных волн привели Максвелла к созданию электромагнитной теории света, согласно которой свет представляет собой также электромагнитные волны. Электромагнитные волны на опыте были получены Герцем, доказавшим, что законы их возбуждения и распространения полностью описываются уравнениями Максвелла. Таким образом, теория Максвелла была экспериментально подтверждена.

К электромагнитному полю применим только принцип относительности Эйнштейна, так как факт распространения электромагнитных волн в вакууме во всех системах отсчета с одинаковой скоростью с не совместим с принципом относительности Галилея.

Согласно принципу относительности Эйнштейна, механические, оптические и электромагнитные явления во всех инерциальных системах отсчета протекают одинаково, т. е. описываются одинаковыми уравнениями. Уравнения Максвелла инвариантны относительно преобразований Лоренца: их вид не меняется при переходе от одной

инерциальной системы отсчета к другой, хотя величины E, B, D, H в них преобразуются по определенным правилам.

Из принципа относительности вытекает, что отдельное рассмотрение электрического и магнитного полей имеет относительный смысл. Так, если электрическое поле создается системой неподвижных зарядов, то эти заряды, являясь неподвижными относительно одной инерциальной системы отсчета, движутся относительно другой и, следовательно, будут порождать не только электрическое, но и магнитное поле. Аналогично, неподвижный относительно одной инерциальной системы отсчета проводник с постоянным током, возбуждая в каждой точке пространства постоянное магнитное поле, движется относительно других инерциальных систем, и создаваемое им переменное магнитное поле возбуждает вихревое электрическое поле.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Колебательный контур — цепь, состоящая из включенных последовательно катушки индуктивностью L, конденсатора емкостью C и резистора сопротивлением R. Второе правило Кирхгофа для контура $U_c = \varepsilon_S$, где $U_c = \frac{Q}{C}$ - напряжение на конденсаторе, $\varepsilon_S = -L\frac{dI}{dt}$ - ЭДС самоиндукции, возникающая в катушке. Т.к. сила тока есть первая производная от заряда, получим дифференциальное уравнение колебаний заряда в контуре $Q + \frac{R}{L}Q + \frac{1}{LC}Q = 0$ Если R=0, то свободные электромагнитные колебания в контуре являются гармоническими.

Дифференциальное уравнение *свободных* гармонических колебаний заряда в контуре $Q + \frac{1}{LC}Q = 0$. Заряд совершает гармонические колебания по закону $Q = Q_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$, где Q_m — амплитуда колебаний заряда конденсатора с циклической частотой ω_0, называемой собственной частотой контура $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ и периодом $T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}$ (формула Томсона). Сила тока в колебательном контуре $I = Q = -\omega_0 Q_m \sin(\omega_0 t + \varphi) = I_m \cos(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2})$. Напряжение на конденсаторе $U_c = \frac{Q}{C} = \frac{Q_m}{C}\cos(\omega_0 t + \varphi) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$, где $I_m = \omega_0 Q_m$ — амплитуда силы тока, $U_m = \frac{Q_m}{C}$ - амплитуда напряжения. Колебания тока I опережают по фазе колебания заряда Q на $\pi/2$, т. е., когда ток достигает максимального значения, заряд (а также и напряжение) обращается в нуль, и наоборот.

Резонансная частота – частота, при которой амплитуда достигает максимального значения. Резонансная частота для заряда $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}}$, а для силы тока $\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Сила тока при установившихся вынужденных колебаниях $I = I_m \cos(\omega t - \varphi)$, где $I_m = \omega Q_m = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$ - амплитуда тока, $\varphi = \alpha - \frac{\pi}{2}$ - сдвиг по фазе между током и ЭДС.

Резонансные кривые для амплитуды заряда – это зависимость амплитуды заряда на конденсаторе от частоты внешней ЭДС при различных коэффициентах затухания. Резонансные кривые для амплитуды силы тока – это зависимость амплитуды силы тока в контуре от частоты внешней ЭДС при различных коэффициентах затухания. Чем больше δ, тем ниже и левее максимумы резонансных кривых.

Резонанс напряжений (последовательный резонанс)

Явление резкого возрастания амплитуды силы тока в контуре при совпадении циклической частоты внешнего переменного напряжения с собственной частотой колебательного контура. Отчетливо проявляется резонанс при малом активном сопротивлении. Цепь для наблюдения резонанса напряжений - последовательное соединение RLC. Условие наблюдения резонанса $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, откуда $tg\varphi = 0$, $Z = R$ - сопротивление минимально. Следствия данного условия: сдвиг фаз между током и напряжением обращается в нуль; изменения силы тока и напряжения происходят синфазно. Полное сопротивление равно активному сопротивлению, ток определяется только активным сопротивлением, принимая максимальное значение. Резонансная частота $\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Векторная диаграмма для резонанса напряжений - рис. 217, 218

Резонанс токов (параллельный резонанс)

Явление резкого уменьшения амплитуды силы тока во внешней цепи, питающей параллельно включенные конденсатор и катушку индуктивности, при приближении частоты ω приложенного напряжения к резонансной частоте $\omega_{рез}$. Цепь для наблюдения резонанса токов содержит параллельно включенные конденсатор и катушку. Активным сопротивлением пренебрегаем (рис. 219).

Амплитуда силы тока оказалась равна нулю, т.к. активным сопротивлением контура пренебрегли. Если учесть сопротивление R, то разность фаз не будет равна π, поэтому при резонансе токов амплитуда силы тока будет отлична от нуля, но примет наименьшее возможное значение.

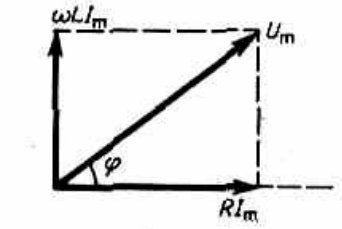


Рис. 217

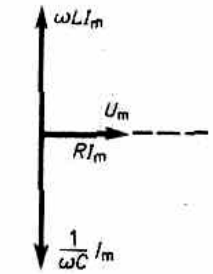


Рис. 218

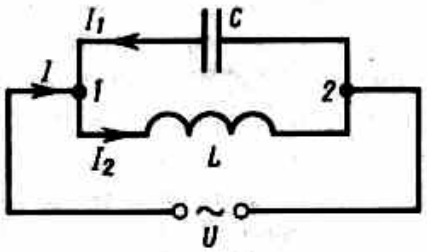


Рис. 219

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИРОДЕ СВЕТА

Основные законы оптики известны еще с древних веков. Так, Платон (430 г. до н. э.) установил законы прямолинейного распространения и отражения света. Аристотель (350 г. до н. э.) и Птолемей изучали преломление света. Первые представления о природе света возникли у древних греков и египтян, которые в дальнейшем, по мере изобретения и усовершенствования различных оптических инструментов, например параболических зеркал (XIII в.), фотоаппарата и микроскопа (XVI в.), зрительной трубы (XVII в.), развивались и трансформировались. В конце XVII в. на основе многовекового опыта и развития представлений о свете возникли две теории света: корпускулярная (И. Ньютон) и волновая (Р. Гук и Х. Гюйгенс).

Согласно корпускулярной теории, свет представляет собой поток частиц (корпускул), испускаемых светящимися телами и летящих по прямолинейным траекториям. Движение световых корпускул Ньютон подчинил сформулированным им законам механики. Так, отражение света понималось аналогично отражению упругого шарика при ударе о плоскость, где также соблюдается закон равенства углов падения и отражения. Преломление света Ньютон объяснял притяжением корпускул преломляющей средой, в результате чего скорость корпускул меняется при переходе из одной среды в другую. Согласно волновой теории, развитой на основе аналогии оптических и акустических явлений, свет представляет собой упругую волну, распространяющуюся в особой среде — эфире. Эфир заполняет все мировое пространство, пронизывает все тела и обладает механическими свойствами — упругостью и плотностью. Согласно Гюйгенсу, большая скорость распространения света обусловлена особыми свойствами эфира. Волновая теория основывается на принципе Гюйгенса:

каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн дает положение волнового фронта в следующий момент времени. Волновым фронтом называется геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t. Принцип Гюйгенса позволяет анализировать распространение света и вывести законы отражения и преломления.

Таким образом, к началу XVIII в. существовало два противоположных подхода к объяснению природы света: корпускулярная теория Ньютона и волновая теория Гюйгенса. Обе эти теории объясняли прямолинейное распространение света, законы отражения и преломления. Экспериментальное доказательство справедливости волновой теории было получено в 1851 г., когда Фуко измерил скорость распространения света в воде. К началу XIX столетия корпускулярная теория была полностью отвергнута и восторжествовала волновая теория. Большая заслуга в этом отношении принадлежит английскому физику Юнгу, исследовавшему явления дифракции и интерференции, и французскому физику Френелю, дополнившему принцип Гюйгенса и объяснившему эти явления.

Несмотря на признание волновой теории, она обладала целым рядом недостатков. Например, явления интерференции, дифракции и поляризации могли быть объяснены только в том случае, если световые волны считать поперечными. С другой стороны, если световые волны - поперечные, то их носитель - эфир - должен обладать свойствами твердых тел. Попытка же наделить эфир свойствами твердого тела успеха не имела, так как эфир не оказывает заметного воздействия на движущиеся в нем тела. Далее эксперименты показали, что скорость распространения света в разных средах различна, поэтому эфир должен обладать в разных средах различными свойствами. Теория Гюйгенса не могла объяснить также физической природы наличия разных цветов.

Наука о свете накапливала экспериментальные данные, свидетельствующие о взаимосвязи световых, электрических и магнитных явлений, что позволило Максвеллу в 70-х годах прошлого столетия создать электромагнитную теорию света. Согласно электромагнитной теории Максвелла, $c/v=\sqrt{\varepsilon\mu}=n$, где c и v - соответственно скорости распространения света в вакууме и в среде с диэлектрической проницаемостью ε и магнитной проницаемостью μ. Это соотношение связывает оптические, электрические и магнитные постоянные вещества. По Максвеллу, ε и μ - величины, не зависящие от длины волны света, поэтому электромагнитная теория не могла объяснить явление дисперсии (зависимость показателя преломления от длины волны). Эта трудность была преодолена в конце XIX в. Лоренцем, предложившим электронную теорию, согласно которой диэлектрическая проницаемость ε зависит от длины волны падающего света. Теория Лоренца ввела представление об

электронах, колеблющихся внутри атома, и позволила объяснить явления испускания и поглощения света веществом.

Несмотря на огромные успехи электромагнитной теории Максвелла и электронной теории Лоренца, они были несколько противоречивы и при их применении встречался ряд затруднений. Обе теории основывались на гипотезе об эфире, только «упругий эфир» был заменен «эфиром электромагнитным» (теория Максвелла), или «неподвижным эфиром» (теория Лоренца). Теория Максвелла не смогла объяснить процессов испускания и поглощения света, фотоэлектрического эффекта, комптоновского рассеяния и т. д. Теория Лоренца, в свою очередь, не смогла объяснить многие явления, связанные с взаимодействием света с веществом, в частности вопрос о распределении энергии по длинам волн при тепловом излучении черного тела.

Перечисленные затруднения и противоречия были преодолены благодаря смелой гипотезе (1900) немецкого физика Планка, согласно которой излучение и поглощение света происходит не непрерывно, а дискретно, т. е. определенными порциями (квантами).

Теория Планка не нуждалась в понятии об эфире. Она объяснила тепловое излучение черного тела. Эйнштейн в 1905 г. создал квантовую теорию света, согласно которой не только излучение света, но и его распространение происходит в виде потока световых квантов - фотонов.

Квантовые представления о свете хорошо согласуются с законами излучения и поглощения света, законами взаимодействия света с веществом. Однако как с помощью этих представлений объяснить такие хорошо изученные явления, как интерференция, дифракция и поляризация света? Эти явления легко объясняются на основе волновых представлений. Все многообразие изученных свойств и законов распространения света, его взаимодействия с веществом показывает, что свет имеет сложную природу. Он представляет собой единство противоположных видов движения — корпускулярного (квантового) и волнового (электромагнитного). Длительный путь развития привел к современным представлениям о двойственной корпускулярно-волновой природе света. Таким образом, свет представляет собой единство дискретности и непрерывности, что находится в полном соответствии с выводами материалистической диалектики.

ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Призмы применяются в оптических приборах (например, в биноклях, перископах), а также в рефрактометрах, позволяющих определять показатели преломления тел (по закону преломления, измеряя $i_{пр}$, определяем относительный показатель преломления двух сред, а также

абсолютный показатель преломления одной из сред, если показатель преломления второй среды известен).

Явление полного отражения используется также в световодах (светопроводах), представляющих собой тонкие, произвольным образом изогнутые нити (волокна) из оптически прозрачного материала. В волоконных деталях применяют стеклянное волокно, световедущая жила (сердцевина) которого окружается стеклом — оболочкой из другого стекла с меньшим показателем преломления. Свет, падающий на торец световода под углами, большими предельного, претерпевает на поверхности раздела сердцевины и оболочки полное отражение и распространяется только по световедущей жиле.

Таким образом, с помощью световодов можно как угодно искривлять путь светового пучка. Диаметр световедущих жил лежит в пределах от нескольких микрометров до нескольких миллиметров. Для передачи изображений, как правило, применяются многожильные световоды. Вопросы передачи световых волн и изображений изучаются в специальном разделе оптики - волоконной оптике, возникшей в 50-е годы XX столетия. Световоды используются в электронно-лучевых трубках, в электронно-счетных машинах, для кодирования информации, в медицине (например, диагностика желудка), для целей интегральной оптики и т.д.

ФОТОМЕТРИЯ

Фотометрия - раздел оптики, занимающийся вопросами измерения интенсивности света и его источников. В фотометрии используются следующие величины: 1) энергетические - характеризуют энергетические параметры оптического излучения безотносительно к его действию на приемники излучения; 2) световые - характеризуют физиологические действия света и оцениваются по воздействию на глаз (исходят из так называемой средней чувствительности глаза) или другие приемники излучения.

1. Энергетические величины. Поток излучения Φ_e — величина, равная отношению энергии W излучения ко времени t, за которое излучение произошло $\Phi_e = \frac{W}{t}$ Единица потока излучения — ватт (Вт).

Энергетическая светимость (излучательность) R_e — величина, равная отношению потока излучения Φ_e, испускаемого поверхностью, к площади S сечения, сквозь которое этот поток проходит $R_e = \frac{\Phi_e}{S}$, т. е. представляет собой поверхностную плотность потока излучения. Единица энергетической светимости — ватт на метр в квадрате (Вт/м^2).

Энергетическая сила света (сила излучения) I_e определяется с помощью понятия о точечном источнике света. Энергетическая сила света

1_e — величина, равная отношению потока излучения Φ_e источника к телесному углу ω, в пределах которого это излучение распространяется $I_e = \frac{\Phi_e}{\omega}$ Единица энергетической силы света — ватт на стерадиан (Вт/ср).

Энергетическая яркость (лучистость)B_e — величина, равная отношению энергетической силы света ΔI_e элемента излучающей поверхности к площади ΔS проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения $B_e = \frac{\Delta I_e}{\Delta S}$

Единица энергетической яркости — ватт на стерадиан-метр в квадрате (Вт/(ср•м^2)).

Энергетическая освещенность (облученность) Ее характеризует величину потока излучения, падающего на единицу освещаемой поверхности. Единица энергетической освещенности совпадает с единицей энергетической светимости (Вт/м^2).

2. Световые величины. При оптических измерениях используются различные приемники излучения (например, глаз, фотоэлементы, фотоумножители), которые не обладают одинаковой чувствительностью к энергии различных длин волн, являясь, таким образом, селективными (избирательными). Каждый приемник излучения характеризуется своей кривой чувствительности к свету различных длин волн. Поэтому световые измерения, являясь субъективными, отличаются от объективных, энергетических и для них вводятся световые единицы, используемые только для видимого света. Основной световой единицей в СИ является единица силы света — кандела (кд). Определение световых единиц аналогично энергетическим.

Световой поток Ф определяется как мощность оптического излучения по вызываемому им световому ощущению (по его действию на селективный приемник света с заданной спектральной чувствительностью) .Единица светового потока — люмен (лм): 1 лм — световой поток, испускаемый точечным источником силой света в 1 кд внутри телесного угла в 1 ср (при равномерности поля излучения внутри телесного угла) (1 лм = 1 кд•ср).

Светимость $R = \frac{\Phi}{S}$ Единица светимости — люмен на метр в квадрате (лм/м^2).

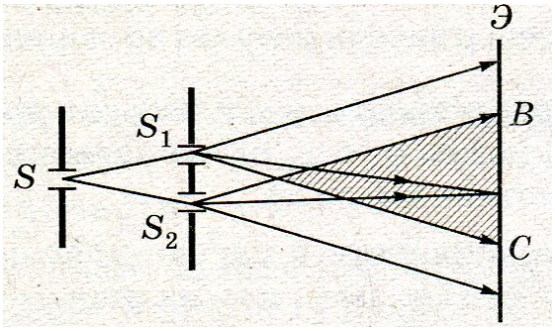
Яркость B_φ светящейся поверхности в некотором направлении φ есть величина, равная отношению силы света I в этом направлении к площади S проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную данному направлению $B_\varphi = \frac{I}{S\cos\varphi}$ Единица яркости — кандела на метр в квадрате (кд/м^2).

Освещенность E — величина, равная отношению светового потока Ф, падающего на поверхность, к площади S этой поверхности $E = \frac{\Phi}{S}$ Единица освещенности — люкс (лк): 1 лк — освещенность поверхности, на 1 м^2 которой падает световой поток в 1 лм (1 лк = 1 лм/м^2).

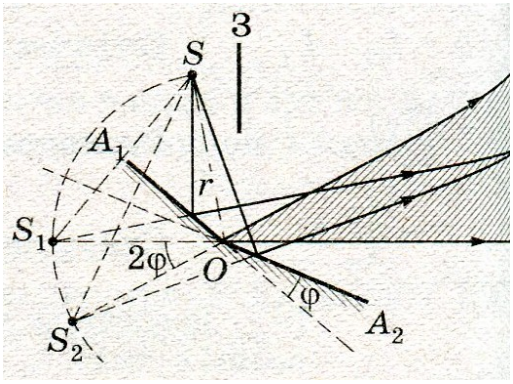
МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА

Для осуществления интерференции света необходимо получить когерентные световые пучки, для чего применяются различные приемы. До появления лазеров во всех приборах для наблюдения интерференции света когерентные пучки получали разделением и последующим сведением световых лучей, исходящих из одного и того же источника. Практически это можно осуществить с помощью экранов и щелей, зеркал и преломляющих тел. Рассмотрим некоторые из этих методов.

1. **Метод Юнга.** Источником света служит ярко освещенная щель S (рис.245), от которой световая волна падает на две узкие равноудаленные щели S_1 и S_2, параллельные щели S. Таким образом, щели S_1 и S_2 играют роль когерентных источников. Интерференционная картина (область BC) наблюдается на экране (Э), расположенном на некотором расстоянии параллельно S_1 и S_2. Как уже указывалось, Т. Юнгу принадлежит первое наблюдение явления интерференции.

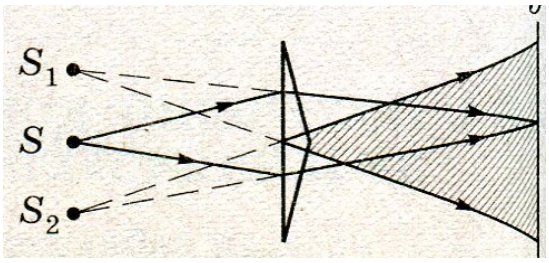


3. **Зеркала Френеля**. Свет от источника S (рис. 246) падает расходящимся пучком на два плоских зеркала A_1O и A_2O, расположенных относительно друг друга под углом, лишь немного отличающимся от 180° (угол φ мал). Учитывая правила построения изображения в плоских зеркалах, можно показать, что и источник, и его изображения S_1 и S_2 (угловое расстояние между которыми равно 2φ) лежат на одной и той же окружности радиуса r с центром в O (точка соприкосновения зеркал).



Световые пучки, отразившиеся от обоих зеркал, можно считать выходящими из мнимых источников S_1 и S_2, являющихся мнимыми изображениями S в зеркалах. Мнимые источники S_1 и S_2 взаимно когерентны, и исходящие из них световые пучки, встречаясь друг с другом, интерферируют в области взаимного перекрывания. Можно показать, что максимальный угол расхождения перекрывающихся пучков не может быть больше 2φ. Интерференционная картина наблюдается на экране (Э), защищенном от прямого попадания света заслонкой (3).

3. **Бипризма Френеля.** Она состоит из двух одинаковых, сложенных основаниями призм с малыми преломляющими углами. Свет от источника S (рис. 247) преломляется в обеих призмах, в результате чего за бипризмой распространяются световые лучи, как бы исходящие из мнимых источников S_1 и S_2, являющихся когерентными.



Таким образом, на поверхности экрана (в области, выполненной в цвете) происходит наложение когерентных пучков и наблюдается интерференция.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА

Явление интерференции обусловлено волновой природой света; его количественные закономерности зависят от длины волны λ_0. Поэтому это явление применяется для подтверждения волновой природы света и для измерения длин волн (интерференционная спектроскопия).

Явление интерференции применяется также для улучшения качества оптических приборов (просветление оптики) и получения

высокоотражающих покрытий. Прохождение света через каждую преломляющую поверхность линзы, например через границу стекло — воздух, сопровождается отражением ≈ 4 % падающего потока (при показателе преломления стекла ≈1,5). Так как современные объективы содержат большое количество линз, то число отражений в них велико, а поэтому велики и потери светового потока. Таким образом, интенсивность прошедшего света ослабляется и светосила оптического прибора уменьшается. Кроме того, отражения от поверхностей линз приводят к возникновению бликов, что часто (например, в военной технике) демаскирует положение прибора.

Для устранения указанных недостатков осуществляют так называемое просветление оптики. Для этого на свободные поверхности линз наносят тонкие пленки с показателем преломления меньшим, чем у материала линзы. При отражении света от границ раздела воздух — пленка и пленка — стекло возникает интерференция когерентных лучей 1' и 2. Толщину пленки d и показатели преломления стекла n_c и пленки n можно подобрать так, чтобы интерферирующие лучи гасили друг друга. Для этого их амплитуды должны быть равны, а оптическая разность хода — равна $(2m+1)\lambda_0/2$.

Расчет показывает, что амплитуды отраженных лучей равны, если $n=\sqrt{n_c}$. Так как n_c, n и показатель преломления воздуха по удовлетворяют условиям $n_c>n>n_0$, то потеря полуволны происходит на обеих поверхностях; следовательно, условие минимума (предполагаем, что свет падает нормально, т. е. i=0 $2nd=(2m+l)\lambda_0/2$, где nd — оптическая толщина пленки.

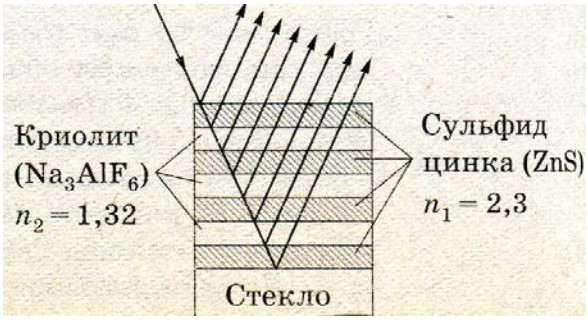
Обычно принимают m=0, тогда $nd=\lambda_0/4$. Таким образом, если оптическая толщина пленки равна $\lambda_0/4$, то в результате интерференции наблюдается гашение отраженных лучей. Так как добиться одновременного гашения для всех длин волн невозможно, то это обычно делается для наиболее восприимчивой глазом длины волны $\lambda_0\approx0,55$ мкм. Поэтому объективы с просветленной оптикой кажутся голубыми.

Создание высокоотражающих покрытий стало возможным лишь на основе многолучевой интерференции. В отличие от двухлучевой интерференции, многолучевая интерференция возникает при наложении большого числа когерентных световых пучков.

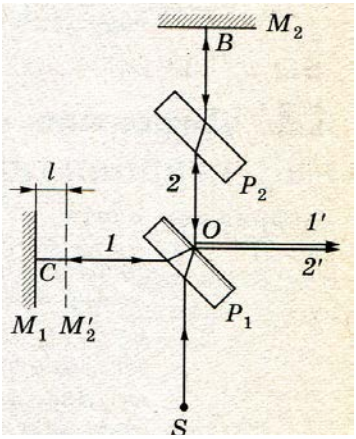
Распределение интенсивности в интерференционной картине существенно различается; интерференционные максимумы значительно уже и ярче, чем при наложении двух когерентных световых пучков. Так, результирующая амплитуда световых колебаний одинаковой амплитуды в максимумах интенсивности, где сложение происходит в одинаковой фазе, в N раз больше, а интенсивность в N^2 раз больше, чем от одного пучка (N — число интерферирующих пучков). Отметим, что для нахождения

результирующей амплитуды удобно пользоваться графическим методом, используя метод вращающегося вектора амплитуды. Многолучевая интерференция осуществляется в дифракционной решетке.

Многолучевую интерференцию можно осуществить в многослойной системе чередующихся пленок с разными показателями преломления (но одинаковой оптической толщиной, равной $\lambda_0/4$), нанесенных на отражающую поверхность. Можно показать, что на границе раздела пленок (между двумя слоями ZnS с большим показателем преломления n_1 находится пленка криолита с меньшим показателем преломления n_2) возникает большое число отраженных интерферирующих лучей, которые при оптической толщине пленок $\lambda_0/4$ будут взаимно усиливаться, т. е. коэффициент отражения возрастает. Характерной особенностью такой высокоотражательной системы является то, что она действует в очень узкой спектральной области, причем чем больше коэффициент отражения, тем уже эта область. Например, система из семи пленок для области 0,5 мкм дает коэффициент отражения $\rho \approx 96\%$ (при коэффициенте пропускания $\approx 3{,}5\%$ и коэффициенте поглощения $<0{,}5\%$). Подобные отражатели применяются в лазерной технике, а также используются для создания интерференционных светофильтров высокой (узкополосных оптических фильтров).



Явление интерференции также применяется в очень точных измерительных приборах, называемых интерферометрами. Все интерферометры основаны на одном и том же принципе и различаются лишь конструкционно. На рис. 255 представлена упрощенная схема интерферометра Майкельсона. Монохроматический свет от источника S падает под углом 45° на плоскопараллельную пластинку P_1.



Сторона пластинки, удаленная от S, посеребренная и полупрозрачная, разделяет луч на две части: луч 1 (отражается от посеребренного слоя) и луч 2 (проходит через него). Луч 1 отражается от зеркала M_1 и, возвращаясь обратно, вновь проходит через пластинку P_1 (луч 1'). Луч 2 идет к зеркалу M_2, отражается от него, возвращается обратно и отражается от пластинки P_1 (луч 2') Так как первый из лучей проходит пластинку P_1 дважды, то для компенсации возникающей разности хода на пути второго луча ставится пластинка P_2 (точно такая же, как и P_1, только не покрытая слоем серебра). Лучи 1' и 2' когерентны; следовательно, будет наблюдаться интерференция, результат которой зависит от оптической разности хода луча 1. от точки О до зеркала M_1 и луча 2 от точки О до зеркала M_2. При перемещении одного из зеркал на расстояние $\lambda_0/4$ разность хода обоих лучей увеличится на $\lambda_0/2$ и произойдет смена освещенности зрительного поля. Следовательно, по незначительному смещению интерференционной картины можно судить о малом перемещении одного из зеркал и использовать интерферометр Майкельсона для точного (порядка 10^{-7} м) измерения длин (измерения длины тел, длины световой волны, изменения длины тела при изменении температуры.

Интерферометры — очень чувствительные оптические приборы, позволяющие определять незначительные изменения показателя преломления прозрачных тел (газов, жидких и твердых тел) в зависимости от давления, температуры, примесей и т. д. Такие интерферометры получили название интерференционных рефрактометров.

РАССЕЯНИЕ СВЕТА

Дифракция света может происходить также в так называемых мутных средах — средах с явно выраженными оптическими неоднородностями. К мутным средам относятся аэрозоли (облака, дым, туман), эмульсия, коллоидные растворы и т. д., т. е. такие среды, в которых взвешено множество очень мелких частиц инородных веществ. Свет,

проходя через мутную среду, дифрагирует от беспорядочно расположенных микронеоднородностей, давая равномерное распределение интенсивностей по всем направлениям, не создавая какой-либо определенной дифракционной картины. Происходит так называемое рассеяние света в мутной среде. Это явление можно наблюдать, например, когда узкий пучок солнечных лучей, проходя через запыленный воздух, рассеивается на пылинках и становится тем самым видимым.

Рассеяние света (как правило, слабое) наблюдается также и в чистых средах, не содержащих посторонних частиц. Мандельштам объяснил рассеяние света в средах нарушением их оптической однородности, при котором показатель преломления среды не постоянен, а меняется от точки к точке. В дальнейшем польский физик Смолуховский указал, что причиной рассеяния света могут быть также флуктуации плотности, возникающие в процессе хаотического теплового движения молекул среды. Рассеяние света в чистых средах, обусловленное флуктуациями плотности, анизотропии или концентрации, называется молекулярным рассеянием.

Молекулярным рассеянием объясняется, например, голубой цвет неба. Согласно закону Рэлея, интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна четвертой степени длины волны ($I \sim \lambda^{-4}$), поэтому голубые и синие лучи рассеиваются сильнее, чем желтые и красные, обусловливая тем самым голубой цвет неба. По этой же причине свет, прошедший через значительную толщу атмосферы, оказывается обогащенным более длинными волнами (сине-фиолетовая часть спектра полностью рассеивается) и поэтому при закате и восходе Солнце кажется красным. Флуктуации плотности и интенсивность рассеяния света возрастают с увеличением температуры. Поэтому в ясный летний день цвет неба является более насыщенным по сравнению с таким же зимним днем.

ПОНЯТИЕ О ГОЛОГРАФИИ

Голография (от греч. «полная запись») — особый способ записи и последующего восстановления волнового поля, основанный на регистрации интерференционной картины. Она обязана своим возникновением законам волновой оптики — законам интерференции и дифракции.

Этот принципиально новый способ фиксирования и воспроизведения пространственного изображения предметов изобретен английским физиком Габором в 1947 г. (Нобелевская премия 1971 г.). Экспериментальное воплощение и дальнейшая разработка этого способа (советским ученым Денисюком в 1962 г. и американским физиком Лейтом в 1963 г.) стали возможными после появления в 1960 г. источников света высокой степени когерентности — лазеров.

Рассмотрим элементарные основы принципа голографии, т. е. регистрации и восстановления информации о предмете. Для регистрации и восстановления волны необходимо уметь регистрировать и восстанавливать амплитуду и фазу идущей от предмета волны. Это в принципе возможно, так как распределение интенсивности в интерференционной картине, $A^2=A^2_1+A^2_2+2A_1A_2\cos(\alpha_2-\alpha_1)$ (учитывая, что $I\sim A^2$), определяется как амплитудой интерферирующих волн, так и разностью их фаз. Поэтому для регистрации как фазовой, так и амплитудной информации кроме волны, идущей от предмета (так называемой предметной волны), используют еще когерентную с ней волну, идущую от источника света (так называемую опорную волну). Идея голографирования состоит в том, что фотографируется распределение интенсивности в интерференционной картине, возникающей при суперпозиции волнового поля объекта и когерентной ему опорной волны известной фазы. Последующая дифракция света на зарегистрированном распределении почернений в фотослое восстанавливает волновое поле объекта и допускает, изучение этого поля при отсутствии объекта.

Лазерный пучок делится на две части, причем одна его часть отражается зеркалом на фотопластинку (опорная волна), а вторая попадает на фотопластинку, отразившись от предмета (предметная волна). Опорная и предметная волны, являясь когерентными и накладываясь друг на друга, образуют на фотопластинке интерференционную картину. После проявления фотопластинки и получается голограмма — зарегистрированная на фотопластинке интерференционная картина, образованная при сложении опорной и предметной волн.

Для восстановления изображения голограмма помещается в то же самое положение, где она находилась до регистрации. Ее освещают опорным пучком того же лазера (вторая часть лазерного пучка перекрывается диафрагмой). В результате дифракции света на интерференционной структуре голограммы восстанавливается копия предметной волны, образующая объемное (со всеми присущими предмету свойствами) мнимое изображение предмета, расположенное в том месте, где предмет находился при голографировании. Оно кажется настолько реальным, что его хочется потрогать. Кроме того, восстанавливается еще действительное изображение предмета, имеющее рельеф, обратный рельефу предмета, т.е. выпуклые места заменены вогнутыми, и наоборот (если наблюдение ведется справа от голограммы).

Обычно пользуются мнимым голографическим изображением, которое по зрительному восприятию создает полную иллюзию существования реального предмета. Рассматривая из разных положений объемное изображение предмета, даваемое голограммой, можно увидеть более удаленные предметы, закрытые более близкими из них (заглянуть за ближние предметы). Это объясняется тем, что, перемещая голову в

сторону, мы воспринимаем изображение, восстановленное от периферической части голограммы, на которую при экспонировании падали также и лучи, отраженные от скрытых предметов. Голограмму можно расколоть на несколько кусков. Но даже малая часть голограммы восстанавливает полное изображение. Однако уменьшение размеров голограммы приводит к ухудшению четкости получаемого изображения. Это объясняется тем, что голограмма для опорного пучка служит дифракционной решеткой, а при уменьшении числа штрихов дифракционной решетки (при уменьшении размеров голограммы) ее разрешающая способность уменьшается.

Методы голографии (запись голограммы в трехмерных средах, цветное и панорамное голографирование и т. д.) находят все большее развитие. Применения голографии разнообразны, но наиболее важные, приобретающие все большее значение, являются запись и хранение информации.

Методы голографии позволяют записывать в сотни раз больше страниц печатного текста, чем методы обычной микрофотографии. По подсчетам, на фотопластинку размером 32х32 мм можно записать 1024 голограммы (площадь каждой из них 1 мм^2), т. е. на одной фотопластинке можно «разместить» книгу объемом свыше тысячи страниц. В качестве будущих разработок могут служить ЭВМ с голографической памятью, голографический электронный микроскоп, голографические кино и телевидение, голографическая интерферометрия и т. д.

АНАЛИЗ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

Вырезанная параллельно оптической оси пластинка, для которой оптическая разность хода $\Delta = \pm(m + \frac{1}{4})\lambda_0$, называется пластинкой в четверть волны (пластинкой $\lambda/4$). Знак плюс соответствует отрицательным кристаллам, минус — положительным. Плоскополяризованный свет, пройдя пластинку $\lambda/4$, на выходе превращается в эллиптически поляризованный (в частном случае циркулярно поляризованный). Конечный результат, как уже рассматривали, определяется разностью фаз φ и углом α. Пластинка с $\Delta = \pm(m + \frac{1}{2})\lambda_0$ называется пластинкой в полволны.

В циркулярно поляризованном свете разность фаз φ между любыми двумя взаимно перпендикулярными колебаниями равна $\pm\pi/2$. Если на пути такого света поставить пластинку $\lambda/4$, то она внесет дополнительную разность фаз $\pm\pi/2$. Результирующая разность фаз станет равной 0 или π. Следовательно, циркулярно поляризованный свет, пройдя пластинку $\lambda/4$, становится плоскополяризованным. Если теперь на пути луча поставить поляризатор, то можно добиться полного его гашения. Если же падающий

свет естественный, то он при прохождении пластинки λ/4 таковым и останется (ни при каком положении пластинки и поляризатора погашения луча не достичь).

Таким образом, если при вращении поляризатора при любом положении пластинки интенсивность не меняется, то падающий свет естественный. Если интенсивность меняется и можно достичь полного гашения луча, то падающий свет циркулярно поляризованный, если полного гашения не достичь, то падающий свет представляет смесь естественного и циркулярно поляризованного.

Если на пути эллиптически поляризованного света поместить пластинку λ/4, оптическая ось которой ориентирована параллельно одной из осей эллипса, то она внесет дополнительную разность фаз $\pm\pi/2$. Результирующая разность фаз станет равной нулю или π. Следовательно, эллиптически поляризованный свет, пройдя пластинку λ/4, повернутую определенным образом, превращается в плоскополяризованный и может быть погашен поворотом поляризатора. Этим методом можно отличить эллиптически поляризованный свет от частично поляризованного или циркулярно поляризованный свет от естественного.

Оптическая пирометрия

Законы теплового излучения используются для измерения температуры раскаленных и самосветящихся тел (например, звезд). Методы измерения высоких температур, использующие зависимость спектральной плотности энергетической светимости или интегральной энергетической светимости тел от температуры, называются оптической пирометрией. Приборы для измерения температуры нагретых тел по интенсивности их теплового излучения в оптическом диапазоне спектра называются пирометрами. В зависимости от того, какой закон теплового излучения используется при измерении температуры тел, различают радиационную, цветовую и яркостную температуры.

Радиационная температура — это такая температура черного тела, при которой его энергетическая светимость R_e равна энергетической светимости R_T исследуемого тела. В этом случае регистрируется энергетическая светимость исследуемого тела и по закону Стефана - Больцмана вычисляется его радиационная температура:

$$T_p = \sqrt[4]{R_T/\sigma}.$$

Радиационная температура тела всегда меньше его истинной температуры.

Цветовая температура. Для серых тел (или тел, близких к ним по свойствам) спектральная плотность энергетической светимости $R_{\lambda,T} = A_T R_{\lambda,T}$, где A_T = const и при этом < 1. Следовательно, распределение энергии в спектре излучения серого тела такое же, как и в спектре черного тела,

имеющего ту же температуру. Поэтому к серым телам применим закон Вина. Зная длину волны, соответствующую максимальной спектральной плотности энергетической светимости исследуемого тела, можно определить его температуру по формуле $T_ц = b/\lambda_{max}$, которая называется цветовой температурой. Для серых тел цветовая температура совпадает с истинной температурой тела. Для тел, которые сильно отличаются от серых, понятие цветовой температуры не имеет смысла. Так определяется температура на поверхности Солнца (примерно 6500 К) и звезд.

Яркостная температура $T_я$ - это температура черного тела, при которой для определенной длины волны его спектральная плотность энергетической светимости равна спектральной плотности энергетической светимости исследуемого тела. Она находится по формуле $r_{\lambda,Tя} = R_{\lambda,T}$, где T - истинная температура тела. Истинная температура тела всегда выше яркостной.

В качестве яркостного пирометра обычно используется пирометр с исчезающей нитью. Накал нити пирометра подбирается таким, чтобы изображение нити пирометра сливалось с фоном поверхности раскаленного тела. При этом нить как бы «исчезает». Используя проградуированный по черному телу миллиамперметр, можно определить яркостную температуру. Зная поглощательную способность $A_{\lambda,T}$ тела при той же длине волны, по яркостной температуре можно определить истинную температуру исследуемого тела.

ТЕПЛОВЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Свечение раскаленных тел используется для создания источников света, первые из которых - лампы накаливания и дуговые лампы - были изобретены учеными Лодыгиным в 1873 г. и Яблочковым в 1876 г.

На первый взгляд, кажется, что черные тела должны быть наилучшими тепловыми источниками света, так как их спектральная плотность энергетической светимости для любой длины волны больше спектральной плотности энергетической светимости нечерных тел, взятых при одинаковой температуре. Однако для некоторых тел (например, вольфрама), обладающих селективностью теплового излучения, доля энергии, приходящаяся на излучение в видимой области спектра, значительно больше, чем для черного тела, нагретого до той же температуры. Поэтому вольфрам, обладая еще и высокой температурой плавления, является наилучшим материалом для изготовления нитей ламп.

Температура вольфрамовой нити в вакуумных лампах не должна превышать 2450 К, поскольку при более высоких температурах происходит ее сильное распыление. Максимум излучения при этой температуре соответствует длине волны ≈ 1,1 мкм, что очень далеко от максимума чувствительности человеческого глаза (≈ 0,55 мкм).

Наполнение баллонов ламп инертными газами (например, смесью криптона и ксенона с добавлением азота) при давлении ≈ 50кПа позволяет увеличить температуру нити до 3000 К, что приводит к улучшению спектрального состава излучения. Однако светоотдача при этом не увеличивается, так как возникают дополнительные потери энергии из-за теплообмена между нитью и газом вследствие теплопроводности и конвекции.

Для уменьшения потерь энергии за счет теплообмена и повышения светоотдачи нити ламп изготовляют в виде спирали, отдельные витки которой обогревают друг друга. При высокой температуре вокруг этой спирали образуется неподвижный слой газа и вследствие конвекции теплообмен полностью исключается. КПД ламп накаливания в настоящее время не превосходит 5%, поэтому замена ламп накаливания на современные энергосберегающие лампы чрезвычайно актуальна.

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОЭФФЕКТА

На явлении фотоэффекта основано действие фотоэлектронных приборов, получивших разнообразное применение в различных областях науки и техники. В настоящее время практически невозможно указать отрасли производства, где бы не использовались фотоэлементы — приемники излучения, работающие на основе фотоэффекта и преобразующие энергию излучения в электрическую.

Простейшим фотоэлементом с внешним фотоэффектом является вакуумный фотоэлемент. Он представляет собой откачанный стеклянный баллон, внутренняя поверхность которого (за исключением окошка для доступа излучения) покрыта фоточувствительным слоем, служащим фотокатодом. В качестве анода обычно используется кольцо или сетка, помещаемая в центре баллона. Фотоэлемент включается в цепь батареи, э.д.с. которой выбирается такой, чтобы обеспечить фототок насыщения. Выбор материала фотокатода определяется рабочей областью спектра: для регистрации видимого света и инфракрасного излучения используется кислородно-цезиевый катод, для регистрации ультрафиолетового излучения и коротковолновой части видимого света — сурьмяно-цезиевый. Вакуумные фотоэлементы безынерционны, и для них наблюдается строгая пропорциональность фототока интенсивности излучения. Эти свойства позволяют использовать вакуумные фотоэлементы в качестве фотометрических приборов, например фотоэлектрический экспонометр, люксметр и т. д.

Для увеличения чувствительности вакуумных фотоэлементов баллон заполняется инертным газом (Ar или Ne при давлении ≈1,34 — 13 Па). Фототок в таком элементе, называемом газонаполненным, усиливается вследствие ударной ионизации молекул газа

фотоэлектронами. Интегральная чувствительность газонаполненных фотоэлементов (≈1 мА/лм) выше, чем вакуумных (20— 150 мкА/лм), но они обладают большей инерционностью, что приводит к ограничению области их применения.

Для усиления фототока применяются фотоэлектронные умножители, в которых наряду с фотоэффектом используется явление вторичной электронной эмиссии. Размеры фотоэлектронных умножителей немного превышают размеры обычной радиолампы, общий коэффициент усиления составляет $\approx 10^7$ (при напряжении питания 1 — 1,5 кВ), а их интегральная чувствительность может достигать 10 А/лм. Поэтому фотоэлектронные умножители начинают вытеснять фотоэлементы, правда, их применение связано с использованием высоковольтных стабилизированных источников питания, что несколько неудобно.

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом, называемые полупроводниковыми фотоэлементами или фотосопротивлениями (фоторезисторами), обладают гораздо большей чувствительностью, чем вакуумные. Для их изготовления используются PbS, CdS, PbSe и другие полупроводники. Если фотокатоды вакуумных фотоэлементов и фотоэлектронных умножителей имеют «красную границу» фотоэффекта не выше 1,1 мкм, то применение фотосопротивлений позволяет производить измерения в инфракрасной области спектра (3-4 мкм), а также в областях рентгеновского и гамма-излучений. Кроме того, они малогабаритны и имеют низкое напряжение питания. Недостаток фотосопротивлений — их заметная инерционность, поэтому они непригодны для регистрации быстропеременных световых потоков.

Фотоэлементы с вентильным фотоэффектом, называемые вентильными фотоэлементами, обладая строгой пропорциональностью фототока интенсивности излучения, имеют большую по сравнению с ними интегральную чувствительность (2-30 мА/лм) и не нуждаются во внешнем источнике ЭДС. Это германиевые, кремниевые, селеновые, и т.д. Кремниевые и другие фотоэлементы применяются для создания солнечных батарей, преобразующих световую энергию в электрическую. Эти батареи уже в течение многих лет работают на космических спутниках и кораблях. К. п. д. этих батарей ~10 % и может быть доведен до 22 %, что открывает перспективы использования в качестве источников электроэнергии.

Рассмотренные виды фотоэффекта используются также в производстве для контроля, управления и автоматизации различных процессов, в военной технике для сигнализации и локации невидимым излучением, в технике звукового кино, в различных системах связи и т. д.

ОПЫТЫ ФРАНКА И ГЕРЦА

Немецкие физики Франк и Герц, изучая методом задерживающего потенциала столкновения электронов с атомами газов (1913г.), экспериментально доказали дискретность значений энергии атомов. Вакуумная трубка, заполненная парами ртути (давление приблизительно равно 13 Па), содержала катод (К), две сетки ($С_1$ и $С_2$) и анод (А). Электроны, эмиттируемые катодом, ускорялись разностью потенциалов, приложенной между катодом и сеткой $С_1$ Между сеткой С2 и анодом приложен небольшой (примерно 0,5 В) задерживающий потенциал. Электроны, ускоренные в области 1, попадают в область 2 между сетками, где испытывают соударения с атомами паров ртути. Электроны, которые после соударений имеют достаточную энергию для преодоления задерживающего потенциала в области 3, достигают анода. При неупругих соударениях электронов с атомами ртути последние могут возбуждаться. Согласно боровской теории, каждый из атомов ртути может получить лишь вполне определенную энергию, переходя при этом в одно из возбужденных состояний. Поэтому если в атомах действительно существуют стационарные состояния, то электроны, сталкиваясь с атомами ртути, должны терять энергию дискретно, определенными порциями, равными разности энергий соответствующих стационарных состояний атома.

Из опыта следует, что при увеличении ускоряющего потенциала вплоть до 4,86 В анодный ток возрастает монотонно, его значение проходит через максимум (4,86 В), затем резко уменьшается и возрастает вновь. Дальнейшие максимумы наблюдаются при 2•4,86 и 3•4,86 В.

Ближайшим к основному, невозбужденному, состоянию атома ртути является возбужденное состояние, отстоящее от основного по шкале энергий на 4,86 эВ. Пока разность потенциалов между катодом и сеткой меньше 4,86 В, электроны, встречая на своем пути атомы ртути, испытывают с ними только упругие соударения. При $e\varphi$=4,86 эВ энергия электрона становится достаточной, чтобы вызвать неупругий удар, при котором электрон отдает атому ртути всю кинетическую энергию, возбуждая переход одного из электронов атома из нормального энергетического состояния на возбужденный энергетический уровень. Электроны, потерявшие свою кинетическую энергию, уже не смогут преодолеть тормозящего поля и достигнуть анода. Этим и объясняется первое резкое падение анодного тока при $e\varphi$=4,86 эВ. При значениях энергии, кратных 4,86 эВ, электроны могут испытать с атомами ртути 2, 3, ... неупругих соударения, потеряв при этом полностью свою энергию, и не достигнуть анода, т. е. должно наблюдаться резкое падение анодного тока. Это действительно наблюдается на опыте.

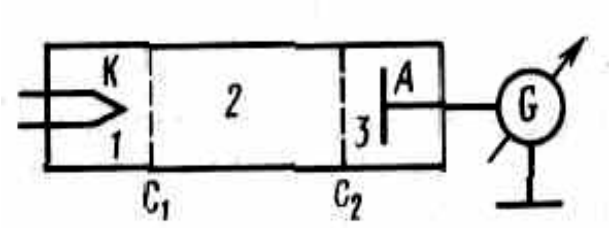


Рис. 292

Таким образом, опыты Франка и Герца показали, что электроны при столкновении с атомами ртути передают атомам только определенные порции энергии, причем 4,86 эВ — наименьшая возможная порция энергии (наименьший квант энергии), которая может быть поглощена атомом ртути в основном энергетическом состоянии. Следовательно, идея Бора о существовании в атомах стационарных состояний блестяще выдержала экспериментальную проверку.

Атомы ртути, получившие при соударении с электронами энергию ΔE, переходят в возбужденное состояние и должны возвратиться в основное, излучая при этом, согласно второму постулату Бора, световой квант с частотой $\nu=\Delta E/h$. По известному значению $\Delta E=4{,}86$ эВ можно вычислить длину волны излучения: $\lambda=hc/\Delta E\approx 255$ нм. Таким образом, если теория верна, то атомы ртути, бомбардируемые электронами с энергией 4,86 эВ, должны являться источником ультрафиолетового излучения с $\lambda\approx 255$ нм. Опыт действительно обнаруживает одну ультрафиолетовую линию с $\lambda\approx 254$ нм. Таким образом, опыты Франка и Герца экспериментально подтвердили не только первый, но и второй постулат Бора. Эти опыты сыграли огромное значение в развитии атомной физики.

МОДЕЛИ ЯДРА

1. *Капельная модель ядра* (1936; Бор и Френкель). Капельная модель ядра основана на аналогии между поведением нуклонов в ядре и поведением молекул в капле жидкости. Так, в обоих случаях силы, действующие между составными частицами — молекулами в жидкости и нуклонами в ядре,— являются короткодействующими и им свойственно насыщение. Для капли жидкости при данных внешних условиях характерна постоянная плотность ее вещества. Ядра же характеризуются практически постоянной удельной энергией связи и постоянной плотностью, не зависящей от числа нуклонов в ядре. Наконец, объем капли, так же как и объем ядра, пропорционален числу частиц. Существенное отличие ядра от капли жидкости в этой модели заключается в том, что она трактует ядро как каплю электрически заряженной несжимаемой жидкости (с плотностью, равной ядерной), подчиняющуюся законам квантовой механики.

Капельная модель ядра позволила получить формулу для энергии связи нуклонов в ядре, объяснила механизм ядерных реакций и особенно реакции деления ядер. Однако эта модель не смогла, например, объяснить повышенную устойчивость ядер.

2. *Оболочечная модель ядра* (1950; Гепперт-Майер и Иенсен). Оболочечная модель предполагает распределение нуклонов в ядре по дискретным энергетическим уровням (оболочкам), заполняемым нуклонами согласно принципу Паули, и связывает устойчивость ядер с заполнением этих уровней. Считается, что ядра с полностью заполненными оболочками являются наиболее устойчивыми. Оболочечная модель ядра позволила объяснить спины и магнитные моменты ядер, различную устойчивость атомных ядер, а также периодичность их свойств. Эта модель особенно хорошо применима для описания легких и средних ядер, а также для ядер, находящихся в основном состоянии. Но эта модель не смогла количественно описать свойства ядер.

МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ И ЧАСТИЦ

Практически все методы наблюдения и регистрации радиоактивных излучений (α, β, γ) и частиц основаны на их способности производить ионизацию и возбуждение атомов среды. Заряженные частицы вызывают эти процессы непосредственно, а γ-кванты и нейтроны обнаруживаются по ионизации, вызываемой возникающими в результате их взаимодействия с электронами и ядрами атомов среды быстрыми заряженными частицами. Вторичные эффекты, сопровождающие рассмотренные процессы, такие, как вспышка света, электрический ток, потемнение фотопластинки, позволяют регистрировать пролетающие частицы, считать их, отличать друг от друга и измерять их энергию.

Приборы, применяемые для регистрации радиоактивных излучений и частиц, делятся на две группы:

1) приборы, позволяющие регистрировать прохождение частицы через определенный участок пространства и в некоторых случаях определять ее характеристики, например энергию (сцинтилляционный счетчик, черенковский счетчик, импульсная ионизационная камера, газоразрядный счетчик, полупроводниковый счетчик);

2) приборы, позволяющие наблюдать, например фотографировать, следы (треки) частиц в веществе (камера Вильсона, диффузионная камера, пузырьковая камера, ядерные фотоэмульсии).

1. Сцинтилляционный счетчик. Наблюдение сцинтилляций — вспышек света при попадании быстрых частиц на флуоресцирующий экран — первый метод, позволивший Резерфорду на заре ядерной физики (1903) визуально регистрировать α-частицы. Сцинтилляционный счетчик

— детектор ядерных частиц, основными элементами которого являются сцинтиллятор (кристаллофосфор) и фотоэлектронный умножитель, позволяющий преобразовывать слабые световые вспышки в электрические импульсы, регистрируемые электронной аппаратурой. Обычно в качестве сцинтилляторов используют кристаллы некоторых неорганических (ZnS для α-частиц; NaI-Tl, CsI-Tl — для β-частиц и γ-квантов) или органических (антрацен, пластмассы — для γ-квантов) веществ.

Сцянтилляционные счетчики обладают высоким разрешением по времени (10^{-10}—10^{-5} с), определяемым родом регистрируемых частиц, сцинтиллятором и разрешающим временем используемой электронной аппаратуры (оно доведено сейчас до 10^{-9}—10^{-10}с). Для этого типа счетчиков эффективность регистрации — отношение числа зарегистрированных частиц к полному числу частиц, пролетевших в счетчике, примерно 100 % для заряженных частиц и 30 % для γ-квантов. Так как для многих сцинтилляторов (NaI-Tl, CsI-Tl, антрацен, стильбен) интенсивность световой вспышки в широком интервале энергий пропорциональна энергии первичной частицы, то счетчики на данных сцинтилляторах применяются для измерения энергии частиц.

2. Черенковский счетчик. Назначение черенковских счетчиков — это измерение энергии частиц, движущихся в веществе со скоростью, превышающей фазовую скорость света в данной среде, и разделение этих частиц по массам. Зная угол испускания излучения, можно определить скорость частицы, что при известной массе частицы равносильно определению ее энергии. С другой стороны, если масса частицы не известна, то она может быть определена по независимому измерению энергии частицы. Кроме того, при наличии двух пучков частиц с разными скоростями будут различными и углы испускания излучений, по которым можно искомые частицы определить. Для черенковских счетчиков разрешение по скоростям (иными словами, по энергиям) составляет 10^{-3}—10^{-5}. Это позволяет отделять элементарные частицы друг от друга при энергиях порядка 10 ГэВ, когда углы испускания излучения различаются очень мало. Время разрешения счетчиков достигает 10^{-9} с. Счетчики Черенкова устанавливаются на космических кораблях.

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ. ПОНЯТИЕ ОБ ЭФФЕКТЕ ДЖОЗЕФСОНА

Различные опыты, поставленные с целью изучения свойств сверхпроводников, приводят к выводу, что при переходе металла в сверхпроводящее состояние не изменяется структура его кристаллической решетки, не изменяются его механические и оптические (в видимой и инфракрасной областях) свойства. Однако при таком переходе наряду со скачкообразным изменением электрических свойств качественно меняются

его магнитные и тепловые свойства. Так, в отсутствие магнитного поля переход в сверхпроводящее состояние сопровождается скачкообразным изменением теплоемкости, а при переходе в сверхпроводящее состояние во внешнем магнитном поле скачком изменяются и теплопроводность, и теплоемкость (такие явления характерны для фазовых переходов II рода). Достаточно сильное магнитное поле (следовательно, и сильный электрический ток, протекающий по сверхпроводнику) разрушает сверхпроводящее состояние.

Как показал немецкий физик Мейсснер, в сверхпроводящем состоянии магнитное поле в толще сверхпроводника отсутствует. Это означает, что при охлаждении сверхпроводника ниже критической температуры магнитное поле из него вытесняется (эффект Мейсснера).

Общность эффектов, наблюдаемых в сверхпроводящем состоянии различных металлов, их соединений и сплавов, указывает на то, что явление сверхпроводимости обусловлено физическими причинами, общими для различных веществ, т. е. должен существовать единый для всех сверхпроводников механизм этого явления.

Физическая природа сверхпроводимости была понята лишь в 1957 г. на основе теории (создана Ландау в 1941 г.) сверхтекучести гелия. Теория сверх-проводимости создана американскими физиками Бардином, Купером и Шрифферо и усовершенствована Боголюбовым.

Оказалось, что помимо внешнего сходства между сверхтекучестью (сверхтекучая жидкость протекает по узким капиллярам без трения, т. е. без сопротивления течению) и сверхпроводимостью (ток в сверхпроводнике течет без сопротивления по проводу) существует глубокая физическая аналогия: и сверхтекучесть, и сверхпроводимость — это макроскопический квантовый эффект.

Качественно явление сверхпроводимости можно объяснить так. Между электронами металла помимо кулоновского отталкивания, в достаточной степени ослабляемого экранирующим действием положительных ионов решетки, в результате электрон-фононного взаимодействия (взаимодействия электронов с колебаниями решетки) возникает слабое взаимное притяжение. Это взаимное притяжение при определенных условиях может преобладать над отталкиванием. В результате электроны проводимости, притягиваясь, образуют своеобразное связанное состояние, называемое куперовской парой. «Размеры» пары много больше (примерно на четыре порядка) среднего межатомного расстояния, т. е. между электронами, «связанными» в пару, находится много «обычных» электронов.

Чтобы куперовскую пару разрушить (оторвать один из ее электронов), надо затратить некоторую энергию, которая пойдет на преодоление сил притяжения электронов пары. Такая энергия может быть в принципе получена в результате взаимодействия с фононами. Однако

пары сопротивляются своему разрушению. Это объясняется тем, что существует не одна пара, а целый ансамбль взаимодействующих друг с другом куперовских пар.

Электроны, входящие в куперовскую пару, имеют противоположно направленные спины. Поэтому спин такой пары равен нулю и она представляет собой бозон. К бозонам принцип Паули неприменим, и число бозе-частиц, находящихся в одном состоянии, не ограничено. Поэтому при сверхнизких температурах бозоны скапливаются в основном состоянии, из которого их довольно трудно перевести в возбужденное. Система бозе-частиц — куперовских пар, обладая устойчивостью относительно возможности отрыва электрона, может под действием внешнего электрического поля двигаться без сопротивления со стороны проводника, что и приводит к сверхпроводимости.

На основе теории сверхпроводимости Джозефсон предсказал эффект, названный его именем (Нобелевская премия 1973 г.). Эффект Джозефсона (1963 г.) — протекание сверхпроводящего тока сквозь тонкий слой диэлектрика (пленка оксида металла толщиной ~=1 нм), разделяющий два сверхпроводника (так называемый контакт Джозефсона). Электроны проводимости проходят сквозь диэлектрик благодаря туннельному эффекту. Если ток через контакт Джозефсона не превышает некоторое критическое значение, то падения напряжения на нем нет (стационарный эффект), если превышает — возникает падение напряжения U и контакт излучает электромагнитные волны (нестационарный эффект). Частота v излучения связана с U на контакте соотношением $v = 2eU/h$ (e — заряд электрона). Возникновение излучения объясняется тем, что куперовские пары (они создают сверхпроводящий ток), проходя сквозь контакт, приобретают относительно основного состояния сверхпроводника избыточную энергию. Возвращаясь в основное состояние, они излучают квант электромагнитной энергии $hv=2eU$.

Эффект Джозефсона используется для точного измерения очень слабых магнитных полей (до 10^{-18}Тл), токов (до 10^{-10} А) и напряжений (до 10^{-15}В), а также для создания быстродействующих элементов логических устройств ЭВМ, усилителей и т. д.

ПОНЯТИЕ О ЗОННОЙ ТЕОРИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Используя уравнение Шредингера — основное уравнение динамики в нерелятивистской квантовой механике,— в принципе можно рассмотреть задачу о кристалле, например найти возможные значения его энергии, а также соответствующие энергетические состояния. Однако как в классической, так и в квантовой механике отсутствуют методы точного решения динамической задачи для системы многих частиц. Поэтому эта задача решается приближенно сведением задачи многих частиц к

одноэлектронной задаче — задаче об одном электроне, движущемся в заданном внешнем поле. Подобный путь приводит к зонной теории твердого тела.

В основе зонной теории лежит так называемое адиабатическое приближение. Квантово-механическая система разделяется на тяжелые и легкие частицы — ядра и электроны. Поскольку массы и скорости этих частиц значительно различаются, можно считать, что движение электронов происходит в поле неподвижных ядер, а медленно движущиеся ядра находятся в усредненном поле всех электронов. Считая, что ядра в узлах кристаллической решетки неподвижны, движение электрона рассматривается в постоянном периодическом поле ядер.

Далее используется приближение самосогласованного поля. Взаимодействие данного электрона со всеми другими электронами заменяется действием на него стационарного электрического поля, обладающего периодичностью кристаллической решетки. Это поле создается усредненным в пространстве зарядом всех других электронов и всех ядер. Таким образом, в рамках зонной теории многоэлектронная задача сводится к задаче о движении одного электрона во внешнем периодическом поле — усредненном и согласованном поле всех ядер и электронов.

Рассмотрим мысленно процесс образования твердого тела из изолированных атомов. Пока атомы изолированы, т. е. находятся друг от друга на макроскопических расстояниях, они имеют совпадающие схемы энергетических уровней. По мере «сжатия» нашей модели до кристаллической решетки, т. е. когда расстояния между атомами станут равными межатомным расстояниям в твердых телах, взаимодействие между атомами приводит к тому, что энергетические уровни атомов смещаются, расщепляются и расширяются в зоны, образуется так называемый зонный энергетический спектр.

Заметно расщепляются и расширяются лишь уровни внешних, валентных электронов, наиболее слабо связанных с ядром и имеющих наибольшую энергию, а также более высокие уровни, которые в основном состоянии атома вообще электронами не заняты. Уровни же внутренних электронов либо совсем не расщепляются, либо расщепляются слабо. Таким образом, в твердых телах внутренние электроны ведут себя так же, как в изолированных атомах, валентные же электроны «коллективизированы» — принадлежат всему твердому телу.

Образование зонного энергетического спектра в кристалле является квантово-механическим эффектом и вытекает из соотношения неопределенностей. В кристалле валентные электроны атомов, связанные слабее с ядрами, чем внутренние электроны, могут переходить от атома к атому сквозь потенциальные барьеры, разделяющие атомы, т. е. перемещаться без изменений полной энергии (туннельный эффект). Это приводит к тому, что среднее время жизни т валентного электрона в

данном атоме по сравнению с изолированным атомом существенно уменьшается и составляет примерно 10^{-15}с (для изолированного атома оно примерно 10^{-8}с). Время же жизни электрона в каком-либо состоянии связано с неопределенностью его энергии (шириной уровня) соотношением неопределенностей $\Delta E \sim h/\tau$. Следовательно, если естественная ширина спектральных линий составляет примерно 10^{-7}эВ, то в кристаллах $\Delta E \approx 1$ — 10 эВ, т. е. энергетические уровни валентных электронов расширяются в зону дозволенных значений энергии.

Энергия внешних электронов может принимать значения в пределах областей, называемых разрешенными энергетическими зонами. Каждая разрешенная зона «вмещает» в себя столько близлежащих дискретных уровней, сколько атомов содержит кристалл: чем больше в кристалле атомов, тем теснее расположены уровни в зоне. Расстояние между соседними энергетическими уровнями в зоне составляет приблизительно 10^{-22}эВ. Так как оно столь ничтожно, то зоны можно считать практически непрерывными, однако факт конечного числа уровней в зоне играет важную роль для распределения электронов по состояниям.

Разрешенные энергетические зоны разделены зонами запрещенных значений энергии, называемыми запрещенными энергетическими зонами. В запрещенных зонах электроны находиться не могут. Ширина зон (разрешенных и запрещенных) не зависит от размера кристалла. Разрешенные зоны тем шире, чем слабее связь валентных электронов с ядрами.

Металлы, диэлектрики и полупроводники по зонной теории

Зонная теория твердых тел позволила с единой точки зрения истолковать существование металлов, диэлектриков и полупроводников, объясняя различие в их электрических свойствах, во-первых, неодинаковым заполнением электронами разрешенных зон и, во-вторых, шириной запрещенных зон.

Степень заполнения электронами энергетических уровней в зоне определяется заполнением соответствующего атомного уровня. Если, например, какой-то уровень атома полностью заполнен электронами в соответствии с принципом Паули, то образующаяся из него зона также полностью заполнена. В общем случае можно говорить о валентной зоне, которая полностью заполнена электронами и образована из энергетических уровней внутренних электронов свободных атомов, и о зоне проводимости (свободной зоне), которая либо частично заполнена электронами, либо свободна и образована из энергетических уровней внешних «коллективизированных» электронов изолированных атомов.

ПРИМЕРЫ ВОПРОСОВ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ

Модуль 1

КИНЕМАТИКА

1. Для чего вводятся физические модели? Что называется материальной точкой? Почему в механике вводят модель материальной точки? Что такое абсолютно твердое тело?
2. Что такое система отсчета? Что такое вектор перемещения? Всегда ли модуль вектора перемещения равен отрезку пути, пройденному точкой?
3. Какое движение называется поступательным? вращательным? Напишите кинематические уравнения движения точки.
4. Что такое траектория? От чего зависит вид траектории?
5. Дать определение и запишите формулу вектора средней скорости; вектора среднего ускорения. Как они направлены?
6. Дать определение и запишите формулу вектора мгновенной скорости. Как он направлен?
7. Дать определение и запишите формулу вектора мгновенного ускорения.
8. Что характеризует, чему равна и как направлена тангенциальная составляющая ускорения? Нормальная составляющая?
9. Запишите формулы, описывающие движение тела в одной плоскости; в пространстве.
10. Угловая скорость, угловое ускорение (определение, формула, единица измерения, направление). Кинематические уравнения для поступательного и вращательного движения.

ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

1. Почему система отсчета, связанная с Землей, неинерциальна?
2. Законы Ньютона (формулировка и формула, физический смысл, граница применения).
3. Масса. Сила. Импульс (определения, единицы измерения).
4. Какими тремя моментами характеризуется сила?
5. Какова физическая сущность трения? В чем отличие сухого трения от жидкого? Какие виды внешнего (сухого) трения Вы знаете?
6. Как можно экспериментально определить коэффициент трения скольжения?
7. Какова особенность сил тяготения? В чем заключается физический смысл гравитационной постоянной? Как и кто ее определил?

8. Закон всемирного тяготения (формулировка, формула, границы применения). Как меняется сила тяжести при удалении от Земли?
9. Сравните силу тяжести и вес тела. В чем сходство и в чем различие?

ДИНАМИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

1. Почему необходимо рассматривать силы инерции? В чем особенность сил инерции? Подчиняются ли силы инерции третьему закону Ньютона? Чем силы инерции отличаются от сил, действующих в инерциальных системах отсчета?
2. Назовите три возможных проявления сил инерции. Приведите примеры.
3. Центробежная сила инерции: определение, формула, направление. Когда проявляется центробежная сила инерции? От чего зависит центробежная сила инерции? Примеры проявления центробежных сил инерции.
4. Когда проявляется сила Кориолиса? Сила Кориолиса: определение, формула, направление. От чего зависит сила Кориолиса? Примеры проявления сил Кориолиса.
5. Что такое абсолютно твердое тело?
6. Момент инерции тела: определение, формула, единицы измерения.
7. Какова роль момента инерции во вращательном движении? Формула для расчета момента инерции полого тонкостенного цилиндра радиуса R, сплошного цилиндра или диска радиуса R, шара радиуса R.
8. Теорема Штейнера: формулировка, формула, обозначения в формуле.
9. Момент силы (определение, формулы).
10. Уравнение динамики вращательного движения твердого тела: формула и обозначения.

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

1. Закон сохранения импульса: формулировка, формула.
2. В каких системах выполняется закон сохранения импульса? Почему он является фундаментальным законом природы?
3. Определения: внешние и внутренние силы.
4. Каким свойством пространства обусловливается справедливость закона сохранения импульса?
5. Центр масс системы материальных точек: определение, формула радиус-вектора центра масс.
6. Закон движения центра масс замкнутой системы: формулировка, формула.
7. В чем различие между понятиями энергии и работы?

8. Работа: определение, единицы измерения в СИ.
9. Как найти работу постоянной силы?
10. Как найти работу переменной силы?
11. Какую работу совершает равнодействующая всех сил, приложенных к телу, равномерно движущемуся по окружности? Поясните.
12. Мощность: определение, формула, единицы измерения в СИ.
13. Определения, формулы, единица измерения (СИ) для кинетической энергии.
14. Особенности кинетической энергии.
15. Определения, формулы, единица измерения (СИ) для потенциальной энергии.
16. Особенности потенциальной энергии.
17. Как связаны потенциальная энергия материальной точки во внешнем силовом поле и сила?
18. Почему изменение потенциальной энергии обусловлено только работой консервативных сил?
19. Определение и примеры консервативных и неконсервативных сил.
20. Закон сохранения механической энергии: формулировка, формула.
21. Для каких систем выполняется закон сохранения механической энергии?
22. В чем физическая сущность закона сохранения и превращения энергии? Почему он является фундаментальным законом природы?
23. Каким свойством времени обусловливается закон сохранения механической энергии?
24. Потенциальная кривая: определение, предназначение.
25. Что такое потенциальная яма?
26. Что такое потенциальный барьер?
27. Какие заключения о характере движения тел можно сделать из анализа потенциальных кривых?
28. Как охарактеризовать положения устойчивого и неустойчивого равновесия? В чем их различие?
29. Чем отличается абсолютно упругий удар от абсолютно неупругого?
30. Как определить скорости тел после центрального абсолютно упругого удара?
31. Момент импульса твердого тела относительно оси: формула, определение
32. Закон динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси
33. Закон сохранения момента импульса: формулировка, формула, примеры
34. Что означает изотропность пространства?

ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД. УПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

1. Давление - величина векторная или скалярная? Какова размерность давления?
2. Уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости: формула и физический смысл.
3. Уравнение Бернулли для идеальной несжимаемой жидкости: формула и ее компоненты. Какой закон выражает уравнение Бернулли?
4. Как в потоке жидкости измерить статическое, динамическое и полное давление?
5. Каков физический смысл коэффициента динамической вязкости?
6. Что характеризует число Рейнольдса? Приведите примеры.
7. Поясните практическое применение метода Стокса и Пуазейля.
8. Закон Гука: формулировка, формулы, применение, границы применимости.
9. Механическое напряжение: определение, формула, единицы измерения.
10. От чего зависит диаграмма напряжений?

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

1. Амплитуда и частота колебаний: определение, обозначение.
2. В чем заключается метод вращающегося вектора амплитуды?
3. Формулы для кинетической, потенциальной и полной энергии при гармонических колебаниях.
4. Как можно сравнить между собой массы тел, измеряя частоты колебаний при подвешивании этих тел к пружине?
5. Пружинный, математический и физический маятник: определение, формула для периодов колебаний.
6. Вынужденные колебания: определение, рисунок, дифференциальное уравнение, его решение, механический резонанс.
7. Затухающие колебания: определение, рисунок, формулы (амплитуда, время релаксации, декремент затухания, логарифмический декремент затухания, добротность).
8. Что называется поперечной волной? продольной? Когда они возникают?
9. Какова связь между длиной волны, скоростью и периодом?
10. Уравнения бегущей, гармонической, плоской, сферической волны.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

1. Почему термодинамический и статистический методы исследования макроскопических систем качественно различны и взаимно дополняют друг друга?
2. Как объяснить закон Бойля-Мариотта с точки зрения молекулярно-кинетической теории?
3. Какими законами описываются изобарные и изохорные процессы?
4. Каков физический смысл постоянной Авогадро? числа Лошмидта?
5. В чем заключается молекулярно-кинетическое толкование давления газа? термодинамической температуры?
6. В чем содержание и какова цель вывода основного уравнения молекулярно кинетической теории газов?
7. Каков физический смысл функции распределения молекул по скоростям? по энергиям?
8. Как, зная функцию распределения молекул по скоростям, перейти к функции распределения по энергиям?
9. Во сколько раз и как изменится средняя скорость движения молекул при переходе от кислорода к водороду?
10. В чем суть распределения Больцмана?

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

1. Что такое внутренняя энергия идеального газа?
2. Какими параметрами она определяется?
3. В результате каких процессов может изменяться внутренняя энергия системы?
4. Какая из теплоемкостей — C_v или C_p — больше и почему?
5. Почему адиабата более крута, чем изотерма?
6. Чем отличаются обратимые и необратимые процессы?
7. Почему все реальные процессы необратимы?
8. В каком направлении может изменяться энтропия замкнутой системы? незамкнутой системы?
9. Возможен ли процесс, при котором теплота, взятая от нагревателя, полностью преобразуется в работу?

ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

1. Зависит ли средняя длина свободного пробега молекул от температуры газа? Почему?
2. В чем сущность явлений переноса?
3. При каких условиях возникают?
4. Объяснить физическую сущность закона Фурье.

5. Объяснить физическую сущность закона Фика
6. Объяснить физическую сущность закона Ньютона
7. Чем отличаются реальные газы от идеальных? Каков смысл поправок при выводе уравнения Ван-дер-Ваальса?
8. Почему перегретая жидкость и пересыщенный пар являются метастабильными состояниями?
9. При адиабатическом расширении газа в вакуум его внутренняя энергия не меняется. Как изменится температура, если газ идеальный? реальный?
10. Что можно «вычитать» из диаграммы состояния, используемой для изображения фазовых превращений?

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

1. В чем заключается закон сохранения заряда? Приведите примеры проявления этого закона.
2. Запишите, сформулируйте и объясните закон Кулона.
3. Какие поля называются электростатическими?
4. Что такое напряженность электростатического поля? Каково направление вектора напряженности? Единица напряженности в СИ?
5. Что такое электрический диполь?
6. Как направлено плечо диполя?
7. Что называется циркуляцией вектора напряженности?
8. Дайте определения потенциала данной точки поля и разности потенциалов двух точек поля. Каковы их единицы?
9. Чему равна работа по перемещению заряда вдоль эквипотенциальной поверхности?

ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ

1. В чем различие поляризации диэлектриков с полярными и неполярными молекулами?
2. Как определяется вектор электрического смещения?
3. Что он характеризует?
4. Выведите и прокомментируйте условия для векторов напряженности и электрического смещения на границе раздела двух диэлектрических сред.
5. Каковы напряженность и потенциал поля, а также распределение зарядов внутри и на поверхности заряженного проводника?
6. На чем основана электростатическая защита?
7. Три одинаковых конденсатора один раз соединены последовательно, другой — параллельно. Во сколько раз и когда емкость батареи будет больше?

8. Формулы для энергии заряженного конденсатора, выражаемые через заряд на обкладках конденсатора и через напряженность поля.

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

1. Что называется силой тока? плотностью тока? Каковы их единицы?
2. В чем заключается физический смысл электродвижущей силы, действующей в цепи? напряжения? разности потенциалов?
3. В чем заключается явление сверхпроводимости?
4. На чем основано действие термометров сопротивления?
5. В чем физический смысл удельной тепловой мощности тока?
6. Как формулируются правила Кирхгофа? На чем они основаны?
7. Сравните порядок средних скоростей теплового и упорядоченного движения электронов в металлах.
8. Почему тепловое движение электронов не может привести к возникновению электрического тока?
9. Как классическая теория электропроводности металлов объясняет зависимость сопротивления металлов от температуры?
10. В чем заключаются трудности элементарной классической теории электропроводности металлов? Каковы границы ее применения?

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

1. Как определяют направление вектора магнитной индукции?
2. Что такое линии магнитной индукции? Как определяется их направление? Чем они отличаются от линий напряженности электростатического поля?
3. Назовите единицы магнитной индукции и напряженности магнитного поля. Дайте их определения.
4. Чему равна работа силы Лоренца при движении протона в магнитном поле?
5. В чем заключается эффект Холла?
6. Какой вывод можно сделать, сравнивая циркуляцию векторов **E** и **B**?
7. Что называют потоком вектора магнитной индукции? Запишите теорему Гаусса для магнитного поля, объяснив ее физический смысл.
8. Что такое диамагнетики? парамагнетики? В чем различие их магнитных свойств?
9. Объясните петлю гистерезиса ферромагнетика.
10. Какую температуру для ферромагнетика называют точкой Кюри?

ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

1. Что является причиной возникновения э.д.с. индукции в замкнутом проводящем контуре? От чего и как зависит э.д.с. индукции, возникающая в контуре?
2. Сформулируйте правило Ленца, проиллюстрировав его примерами.
3. Всегда ли при изменении потока магнитной индукции в проводящем контуре в нем возникает э.д.с. индукции? индукционный ток?
4. Возникает ли индукционный ток в проводящей рамке, поступательно движущейся в однородном магнитном поле?
5. Закон Фарадея. Какова природа э.д.с. электромагнитной индукции?
6. Напишите формулу для э.д.с. индукции в плоской рамке, равномерно вращающейся в однородном магнитном поле. За счет чего можно увеличить ЭДС?
7. Почему сердечники трансформаторов не делают сплошными?
8. В чем заключаются явления самоиндукции и взаимной индукции?
9. В чем заключается физический смысл индуктивности контура? взаимной индуктивности двух контуров? От чего они зависят?
10. Чему равна циркуляция вихревого электрического поля?

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

1. Опишите процессы при свободных гармонических колебаниях в колебательном контуре.
2. Период и частота свободных гармонических колебаний в контуре.
3. Дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний в контуре.
4. По какому закону изменяется амплитуда затухающих колебаний?
5. Коэффициент и декремент затухания.
6. Что такое вынужденные электромагнитные колебания? Дифференциальное уравнение вынужденных электромагнитных колебаний, его решение.
7. Что называется резонансом?
8. Какова его роль?
9. Реактивное индуктивное и емкостное сопротивление: формула, единица измерения.
10. Как вычислить мгновенную и среднюю мощность в цепи переменного тока?

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И ДИФРАКЦИЯ ВОЛН

1. Какую величину называют временем когерентности? длиной когерентности? Какова связь между ними? Для чего вводятся понятия временной и пространственной когерентностей?
2. Разность фаз двух когерентных волн: формула, обозначения в формуле, единица измерения.
3. Что такое интерференция света? Условие интерференционных максимумов и минимумов. Ширина интерференционной полосы: формула, обозначения в формуле.
4. Как можно создать условия, необходимые для возникновения интерференции световых волн? Почему интерференцию можно наблюдать от двух лазеров и нельзя от двух электроламп?
5. Будут ли отличаться интерференционные картины от двух узких близколежащих параллельных щелей при освещении их монохроматическим и белым светом? Почему?
6. Что такое полосы равной толщины? равного наклона? В чем заключается просветление оптики? Для чего предназначен интерференционный рефрактометр?
7. Какие дополнения выполнил Френель к принципу Гюйгенса?
8. В чем заключается метод зон Френеля? В чем заключается принцип действия зонных пластинок? Когда наблюдается дифракция Френеля? Когда наблюдается дифракция Фраунгофера?
9. Почему штрихи на дифракционной решетке должны быть тесно расположены друг к другу? Почему их должно быть большое число?
10. Почему на кристаллах не наблюдается дифракция видимого света, но наблюдается дифракция рентгеновского излучения?

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ВЕЩЕСТВЕ

1. Что такое «дисперсия света»? Чем отличается нормальная дисперсия от аномальной? Каковы различия спектров, полученных с помощью призмы и дифракционной решетки? В чем заключаются выводы электронной теории дисперсии света?
2. Закон Бугера. Почему металлы сильно поглощают свет? Чем объясняется окрашенность поглощающих свет тел? Как располагаются цвета спектра в призме? в дифракционной решетке?
3. Что представляет собой дисперсия света с точки зрения классических представлений? В чем заключается основная задача дисперсии?
4. Что называется естественным светом? плоскополяризованным светом? эллиптически поляризованным светом?Как на опыте можно отличить плоскополяризованный свет от естественного?

5. Что характеризует закон Малюса. Что такое угол Брюстера?
6. Чем обусловлено двойное лучепреломление в оптически анизотропном одноосном кристалле?
7. Какие поляризационные приборы вы знаете? В чем заключается принцип их действия?
8. Можно ли с помощью только поляризатора отличить эллиптически поляризованный свет от частично поляризованного? Почему?
9. Что такое эффект Керра? Какова физическая причина его возникновения?
10. Какие вещества называются оптически активными?

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

1. Что такое тепловое излучение? За счет чего оно возникает?
2. Является ли тепловое излучение равновесным?
3. Запишите и объясните формулу для расчета энергетической светимости тела.
4. Опишите модель абсолютно черного тела.
5. На фарфоровой тарелке на светлом фоне имеется темный рисунок. Почему, если ее быстро вынуть из печи, где она нагревалась до высокой температуры, и рассматривать в темноте, наблюдается светлый рисунок на темном фоне?
6. Как читается закон Стефана-Больцмана? Запишите и поясните формулу закона. Чему равна постоянная Стефана-Больцмана?
7. Как читается закон смещения Вина? Запишите и поясните формулу закона. Чему равна постоянная Вина?
8. От чего зависит энергетическая светимость черного тела?
9. Квантовая гипотеза Планка. Чему равна постоянная Планка?
10. Что такое фотон? По каким формулам можно найти энергию и импульс фотона?

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ИДЕЙ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

1. Что такое внешний фотоэффект?
2. В каких веществах наблюдается фотоэффект?
3. Кем и когда обнаружено явление фотоэффекта?
4. Кем выполнены фундаментальные исследования фотоэффекта?
5. Начертите принципиальную схему для наблюдения фотоэффекта.
6. Чем определяется фототок насыщения? Какое напряжение нужно приложить, чтобы фототок стал равен нулю? Как при заданной частоте света изменится фототок насыщения с уменьшением освещенности катода?

7. Законы фотоэффекта.
8. Объяснение законов фотоэффекта на основе квантовой теории.
9. Запишите формулу Эйнштейна для фотоэффекта. Как с помощью уравнения Эйнштейна объяснить законы фотоэффекта?
10. От чего зависит красная граница фотоэффекта? Напишите формулу.

АТОМНОЕ ЯДРО. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

1. Чем отличаются изобары и изотопы?
2. Почему прочность ядер уменьшается при переходе к тяжелым элементам?
3. Как изменяется со временем активность нуклида?
4. Как изменится положение химического элемента в таблице Менделеева после двух α-распадов ядер его атомов? после последовательных одного α-распада и двух β^--распадов?
5. По каким признакам можно классифицировать ядерные реакции?
6. Под действием каких частиц (α-частиц, нейтронов) ядерные реакции более эффективны? Почему?
7. Что представляет собой реакция деления ядер? Приведите примеры.
8. Охарактеризуйте нейтроны деления. Какие они бывают?
9. Почему деление тяжелых ядер и синтез атомных ядер сопровождаются выделением большого количества энергии?
10. Какие фундаментальные типы взаимодействий осуществляются в природе и как их можно охарактеризовать? Какой из них является универсальным?

ПРИМЕРЫ ВОПРОСОВ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

ПИСЬМЕННЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Тема: Механика

ВАРИАНТ 1

1. Какое движение называется поступательным? вращательным?
2. Первый закон Ньютона (формулировка, формула, граница применения).
3. Второй закон Ньютона для неинерциальных систем отсчета (формула, обозначение в формуле).
4. Что обозначает термин «аддитивность»?
5. Закон Паскаля.
6. Что такое вектор? Что такое орт-вектор?
7. Укажите единицу измерения динамической вязкости в СИ.
8. Правила сложения векторов.
9. Поясните формулы $\boxed{\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}}$ $\vec{\omega} = \dfrac{d\vec{\varphi}}{dt}$ $\boxed{\vec{F} = \dfrac{d\vec{p}}{dt}}$ $\sigma = E\varepsilon$ $\boxed{\vec{L} = const}$

$\boxed{\vec{F}_и = -m\vec{a}_o}$ $T = \dfrac{m\upsilon_c^{\,2}}{2} + \dfrac{J_c\omega^2}{2}$ $\boxed{\dfrac{d\vec{p}}{dt} = 0}$ $F = \rho g V$ $\boxed{\nu = \eta / \rho}$

ВАРИАНТ 2

1. Дайте определение скорости; ускорения.
2. Второй закон Ньютона (формулировка, формула, граница применения).
3. Что обозначает термин *однородность*?
4. Что такое *работа силы*?
5. Закон Архимеда (формулировка, формула, обозначения в формуле).
6. Что такое проекция вектора? Покажите на рисунке.
7. Правила вычитания векторов.
8. Каков физический смысл *диэлектрической проницаемости*?
9. Формулы $\boxed{\vec{\upsilon} = \lim \dfrac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \dfrac{d\vec{r}}{dt}}$ $\vec{\varepsilon} = \dfrac{d\vec{\omega}}{dt}$ $\boxed{\vec{p} = m\vec{\upsilon}}$ $\varepsilon = \dfrac{\Delta l}{l}$

$\boxed{\boldsymbol{F}_ц = -m\omega^2\boldsymbol{R}}$ $T_{вр} = \dfrac{J_z\omega^2}{2}$ $\boxed{A = \int_1^2 F ds\cos\alpha = \int_1^2 F_s ds}$

$T + П = E = const$ $\boxed{S_1\upsilon_1 = S_2\upsilon_2 = const}$ $\mathrm{Re} = \dfrac{\rho\langle\upsilon\rangle d}{\eta} = \dfrac{\langle\upsilon\rangle d}{\nu}$

ТЕМА: КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Вариант 1

1. За счет чего возникает тепловое излучение?
2. Внешний фотоэффект (определение, в каких веществах наблюдается)
3. Какая формула выражает эффект Комптона?
4. Опишите модель абсолютно черного тела.
5. Какие три закономерности выявлены с помощью опыта Столетова?
6. Опишите модель атома Томсона.

Вариант 2

1. Является ли тепловое излучение равновесным?
2. Внутренний фотоэффект (определение, в каких веществах наблюдается)
3. По какой формуле находят комптоновскую длину волны?
4. От каких величин зависит энергетическая светимость черного тела?
5. Что такое вольт-амперная характеристика фотоэффекта?
6. Опишите модель атома Резерфорда.

Вариант 3

1. Объясните формулу для расчета энергетической светимости тела.
2. Вентильный фотоэффект (определение, в каких веществах наблюдается)
3. Чему равна комптоновская длина волны для электрона?
4. Как изменится энергетическая светимость черного тела, если его термодинамическая температура уменьшится вдвое?
5. Нарисуйте и объясните вольт-амперные характеристики, соответствующие двум различным освещенностям катода.
6. Каковы недостатки модели атома Томсона?

Вариант 4

1. Что характеризует спектральная поглощательная способность?
2. Кем и когда обнаружено явление фотоэффекта?
3. Чем определяется разность длин волн $\Delta\lambda$ (комптоновский сдвиг)?
4. Дайте определение абсолютно черного тела
5. Чем определяется фототок насыщения?
6. Каковы недостатки модели атома Резерфорда?

ПРИМЕРЫ ВОПРОСОВ РУБЕЖНОГО КОНТРОЛЯ

РУБЕЖНЫЙ КОНТРОЛЬ № 1

Вопросы 1 уровня (1 правильный ответ)

1 Функция распределения молекул идеального газа по скоростям найдена:
A) Максвеллом
B) Карно
C) Клаузисом
D) Больцманом
E) Эйнштейном
F) Планком
G) Резерфордом

2 Ускорение, придаваемое телу движущей силой:
A) прямо пропорционально силе и обратно пропорционально массе
B) обратно пропорционально силе и прямо пропорционально массе
C) прямо пропорционально силе и массе
D) обратно пропорционально силе и массе
E) прямо пропорционально силе и скорости
F) не может быть найдено
G) всегда равно нулю

3 Точка равномерно движется по окружности. При этом:
A) угловая скорость является постоянной
B) ускорение равно нулю
C) угловое ускорение увеличивается
D) тангенциальная составляющая скорости равна нулю
E) нормальная составляющая ускорения равна нулю

4 Первый закон Ньютона – это закон:
A) инерции
B) сохранения энергии
C) сохранения импульса
D) сохранения момента импульса
E) сохранения заряда
F) сохранения массы
G) всемирного тяготения

5 Теплота не может переходить от тел с более низкой температурой к телам с более высокой температурой без одновременных изменений в системе. Так можно сформулировать:

A) Второе начало термодинамики
B) Первое начало термодинамики
C) Закон сохранения импульса
D) Закон сохранения момента импульса
E) Закон всемирного тяготения
F) Закон Кулона
G) Закон Гука

6 Какая сила определяет движение Земли вокруг Солнца?

A) Гравитационное взаимодействие с Солнцем
B) Электромагнитная
C) Гравитационное взаимодействие с Луной
D) Гравитационное взаимодействие с планетами
E) Движение происходит по инерции

7 Моли идеальных газов при одинаковых температуре и давлении занимают одинаковые объемы. Это формулировка закона:

A) Авогадро
B) Дальтона
C) Бойля-Мариотта
D) Максвелла
E) Гей-Люссака
F) Кирхгофа

8 Фазовые переходы первого рода описываются уравнением:

A) Клапейрона - Клаузиуса
B) Клапейрона – Менделеева
C) Больцмана
D) Максвелла
E) Эйнштейна
F) Ома
G) Кулона

9 Какая из величин является инвариантом в классической механике?

A) Масса
B) Скорость
C) Ускорение
D) Перемещение
E) Координата

10 Физический процесс, при котором при подведении теплоты вещество переходит из жидкого состояния в газообразное:

A) Парообразование
B) Испарение
C) Конденсация
D) Плавление
E) Кристаллизация
F) Электризация

11 Из барометрической формулы следует, что давление газа в поле тяготения Земли:

A) Убывает с высотой по экспоненциальному закону
B) Убывает пропорционально высоте
C) Практически не изменяется
D) Растет с высотой по экспоненциальному закону
E) Растет пропорционально высоте
F) Всегда постоянная величина

12 Тело массой 3 кг движется со скоростью 2 м/с и ударяется о неподвижное тело такой же массы. Количество теплоты, выделившееся при центральном и неупругом ударе, равно:

A) 3 Дж
B) 0,4 Дж
C) 16 Дж
D) 0,84 Дж
E) 287 Дж
F) 178 Дж
G) 178 кДж

13 Какая из сил не является консервативной?

A) Сила трения
B) Сила Кулона
C) Сила упругости
D) Гравитационная сила
E) Сила тяжести
F) Сила Ампера
G) Сила Лоренца

Вопросы 2 уровня (2 правильных ответа)

1 Колесо радиусом 0,1 м вращается так, что зависимость угла поворота радиуса колеса от времени дается уравнением $\varphi = A + Bt + Ct^3$, где B=2, C=1.

Найти линейную скорость (в м/с) точек на ободе колеса через 2 секунды после начала движения.

A) 1,2+0,2
B) 1,1+0,3
C) $16 \cdot 10^{-1}$
D) 1,09
E) 110
F) 1+0,43

2 В неподвижном лифте на пружине висит гиря массой 1 кг. Пружина растянулась на 2 см. Найти, как растянется пружина, если лифт будет подниматься с ускорением 2 $м/с^2$.

A) (2,1+0,3) см
B) (2,2+0,2) см
C) 1,6 см
D) (1+0,6) см
E) 5,6 см
F) (5+0,6) см
G) 112 см

3 Диск радиусом 20 см и массой 5 кг вращается с частотой 5 Гц. Определите работу, которую надо совершить, чтобы частота вращения диска стала равной 15 Гц.

A) $(30+10)\pi^2$ Дж
B) $(20+20)\pi^2$ Дж
C) 180 мДж
D) (110+70) мДж
E) $500\pi^2$ нДж
F) $1000\pi^2$ мкДж
G) $(20+6)\pi^2$ Дж

4 Уравнение движения пружинного маятника:

A) $J\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$
B) $\ddot{x} + \frac{k}{m} x = 0$
C) $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$
D) $S = \omega_0 t + \varphi + at^2$
E) $S = A\cos(\omega_0 t + \varphi)$
F) $J\ddot{\alpha} + mgl\alpha = 0$

5 Диск массой 3 кг катится без скольжения по горизонтальной плоскости со скоростью 4 м/с. Кинетическая энергия диска равна (в Дж):

A) 31+5
B) 33+3
C) $3{,}6 \cdot 10$
D) $200 \cdot 10^{-3}$
E) $200 \cdot 10^{-4}$
F) $1{,}9 \cdot 10^{-3}$
G) 48

6 Жидкость течет по трубе с переменным сечением без трения. В каком сечении трубы давление в жидкости минимально?

A) в сечении с минимальным диаметром
B) в сечении с минимальным радиусом
C) ответ зависит от плотности или массы жидкости
D) жидкость или газ в трубе во время течения давления не создают
E) там, где сечение трубы всегда самое большое

7 Момент инерции однородного тела:

A) $\int R^2 dm$
B) $\sum m_i r_i^2$
C) 0
D) $\int R dm$
E) $mv^2/2$
F) $\int dm$

8 Совершив работу, равную 20 Дж, удается сжать пружину на 2 см. Определите работу, которую надо выполнить, чтобы сжать пружину на 4 см:

A) 80 Дж
B) 0,08 кДж
C) 120 мДж
D) 125 кДж
E) (120+5) кДж
F) 16 МДж
G) 29,5 Дж

9 Колебания источника волн описываются уравнением $x = 0{,}08\cos \pi t$ м. Скорость распространения колебаний 3 $м/с$. Смещение точки среды, находящейся на расстоянии 0,75 м от источника в момент времени 0,5 с, равно (м):

A) 0,058
B) $58 \cdot 10^{-3}$
C) 500
D) 117
E) 0,04
F) 0,004
G) 158

10 Кинетическая энергия вращения:

A) $T = \frac{J\omega^2}{2}$

B) $T = \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i \omega_i^{\ 2}}{2} r_i^{\ 2}$

C) $dA = dE_k$

D) $T = \frac{m\upsilon_c^2}{2} + \frac{J_c\omega^2}{2}$

E) $T = m(g - a)$

F) $dA = -dE_p$

G) $T = m(g + a)$

11 Определить период колебания (в секундах) пружинного маятника массой 40 г, если жесткость пружины равна 2 Н/м.

A) $0{,}2\pi\sqrt{2}$
B) $(0{,}1+0{,}1)\pi\sqrt{2}$
C) 108π
D) $0{,}47\pi$
E) $108^2\pi$

12 Уравнение колебаний источника волн $x = 2\sin 100\pi t$ м. Модуль скорости распространения колебаний в среде 400 $м/с$. Чему равна длина волны (м)?

A) 8
B) 5+3
C) 107
D) 102+5
E) 1,148
F) 105

G) 102+3

13 К ободу однородного диска радиусом 0,2 м приложена касательная сила 5 Н. Определить угловое ускорение, с которым вращается диск, если его момент инерции 0,1 $кг \cdot м^2$.

A) 10
B) $1 \cdot 10$
C) $250 \cdot 10^2$
D) 25000
E) $1{,}65$
F) 1+0,65
G) $150 \cdot 10^{-3}$

Вопросы 3 уровня (3 правильных ответа)

1 Сила трения скольжения:

A) $F = \mu N$
B) $F_{mp} = \mu N$
C) $F_{mp} = \frac{N}{\mu^{-1}}$
D) $F = -kx$
E) $F = ma$
F) $F = mg$

2 Тело массой 0,8 кг бросили вертикально вверх. Кинетическая энергия тела в момент бросания равна 200 Дж. Тело может подняться на высоту (м):

A) 25
B) 20+5
C) 5^2
D) 24,5
E) 24+0,5
F) 150,9
G) 113

3 Путь, пройденный телом при равномерном движении:

A) $S = \upsilon \cdot t$
B) $S = \dot{x}t$
C) $S = \frac{\upsilon}{t^{-1}}$

D) $S = \frac{\upsilon}{t}$

E) $S = 0$

4 Потенциальная энергия любого упруго деформированного тела:

A) $E_p = \int_0^x kxdx$

B) $E_p = \frac{kx^2}{2}$

C) $E_p = k\int_0^x xdx$

D) $E_p = GMm\int_0^r \frac{dr}{r^2}$

E) $E_p = mgh$

F) $E_p = gh$

5 Зависимость пройденного телом пути от времени имеет вид $S = 6t^3 + 3t + 2$ Ускорение тела в момент времени 2 с численно равно:

A) 72

B) 70+2

C) 50+22

D) 54

E) 50+4

F) 16

G) 10+6

6 Момент инерции однородного тела:

A) $\int R^2 dm$

B) $\sum m_i r_i^2$

C) $\int \frac{dm}{R^{-2}}$

D) $\int Rdm$

E) $mv^2/2$

7 Дифференциальное уравнение гармонического колебания.

A) $\ddot{x} + \omega^2 x = 0$

B) $a + \omega^2 x = 0$

C) $\dot{\vartheta} + \omega^2 x = 0$

D) $\dot{x} + \dot{\omega}^2 \ddot{x} = \mathrm{e}$

E) $\ddot{x} + \dot{\omega}^2 = \mathrm{T}$

F) $\frac{\omega^2}{x} = g$

G) $\ddot{x} + \frac{1^2}{x} = a$

8 Длина пути, пройденного точкой, в случае равнопеременного движения:

A) $S = \int_0^t v dt$

B) $S = \int_0^t (\upsilon_0 \pm at) dt$

C) $S = \upsilon_0 t \pm \frac{at^2}{2}$

D) $S = \frac{at^2}{2}$

E) $S = vt$

F) $S = at$

9 Материальная точка совершает гармонические колебания с амплитудой 5 см и периодом 2 с. Если движение точки начинается из положения 2 см, то уравнение движения точки запишется в виде:

A) $x(t) = 0{,}05cos\,(\pi t + \frac{\pi}{3})$м

B) $x(t) = 5cos\,(\pi t + \frac{\pi}{3})$см

C) $x(t) = 0{,}05cos\,(\pi t + \frac{\pi}{3})$м

D) $x(t) = 0{,}04cos\,(\pi t + \frac{\pi}{3})$м

E) $x(t) = 6cos\,(\pi t + \frac{\pi}{3})$см

F) $x(t) = 115cos\,(\pi t + 60^0)$м

G) $x(t) = 0{,}06cos\,(\pi t + \frac{\pi}{3})$м

10 Полное ускорение точки при криволинейном движении:

A) $\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n$

B) $a = \sqrt{\left(\frac{d\upsilon}{dt}\right)^2 + \left(\frac{\upsilon^2}{R}\right)^2}$

C) $\vec{a} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt}$

D) $a_n = \frac{\upsilon^2}{R}$

E) $a = \frac{d^2 s}{dt^2}$

11 Период при равномерном вращении:

A) $T = \frac{2\pi}{\omega}$

B) $T = \frac{1}{n}$

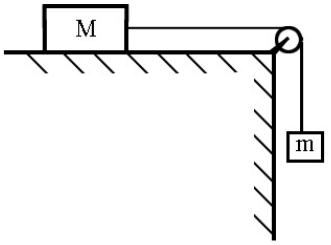
C) $T = \frac{2\pi R}{\upsilon}$

D) $T = \varphi t$

E) $T = \omega_0 t$

F) $T = \frac{1}{c}$

12 Тело массой m висит на нити, переброшенной через блок и привязанной к телу массой M. Уравнение движения для тела массой M, если вся система движется с ускорением a:



A) $T - F_{mp} = Ma$

B) $T - \mu N = Ma$

C) $mg - T = ma$

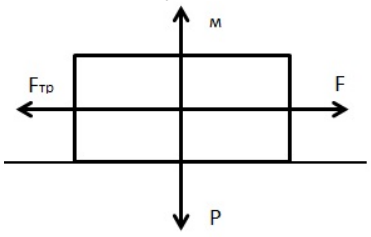
D) $mg - T = Ma$

E) $mg - N = ma$

F) $Mg - N = 0$

G) $Mg + N = 0$

13 Действующая сила трения на тело, которое приведено на рисунке:



A) $\vec{F}_{mp} = \mu \vec{N}$

B) $\vec{F}_{mp} = \mu \vec{P}$

C) $\vec{F}_{тр} = \mu m\vec{g}$

D) $\vec{F}_{тр} = \vec{P}$

E) $\vec{F}_{тр} = \mu\vec{g}$

РУБЕЖНЫЙ КОНТРОЛЬ № 2

1.Единица напряженности магнитного поля:

A) $А/м$
B) $В \cdot с/А$
C) $Н/А$
D) Тл
E) Вб

2.Емкость и индуктивность контура заменили другими, вдвое большими. Как изменится период колебаний контура?

A) Увеличится в 2 раза
B) Увеличится в 4 раза
C) Уменьшится в 4 раза
D) Не изменится
E) Уменьшится в 2 раза

3.При каких условиях ферромагнетик превращается в парамагнетик?

A) При нагревании до точки Кюри
B) При изменении направления вектора напряженности внешнего магнитного поля
C) При уменьшении напряженности внешнего магнитного поля
D) Ни при каких условиях
E) При увеличении напряженности внешнего магнитного поля

4.Магнитный поток внутри контура площадью 30 $см^2$, расположенного перпендикулярно полю, равен 0,6 мВб. Индукция поля внутри контура равна:

A) 0,2 Тл
B) 5 Тл
C) 0,5 Тл
D) 0,02 Тл
E) 2 Тл

5.Плоский контур площадью 50 $см^2$ пронизывает магнитный поток 2 мВб при индукции поля 0,4 Тл. Угол между плоскостью контура и направлением поля равен:

A) 90^0
B) 0°
C) 30°
D) 60°

E) 45°

6.Чтобы при неизменном значении силы тока в контуре энергия магнитного поля в нем уменьшилась в 2 раза, нужно:

A) уменьшить индуктивность в 2 раза
B) увеличить индуктивность в 16 раз
C) уменьшить индуктивность в 4 раза
D) уменьшить индуктивность в 16 раза
E) увеличить индуктивность в 2 раза

7.В однородной изотропной среде с $\varepsilon = 2$ и $\mu = 1$ распространяется плоская электромагнитная волна. Определите её фазовую скорость.

A) $2{,}1\times10^8$ м/с
B) $1{,}0\times10^8$ м/с
C) 3×10^8 м/с
D) $1{,}73\times10^8$ м/с
E) $3{,}46\times10^8$ м/с

8.По круговому витку радиусом 40 см циркулирует ток 4 А. Магнитная индукция в центре витка равна:

A) $62{,}8\cdot10^{-7}$ Тл
B) $40\cdot10^{-7}$ Тл
C) $3{,}14\cdot10^{-7}$ Тл
D) $20\cdot10^{-7}$ Тл
E) $133{,}6\cdot10^{-7}$ Тл

9.Сила Лоренца

A) $\vec{F} = q\left[\vec{v}\vec{B}\right]$
B) $\vec{F} = q\left[\vec{B}\vec{v}\right]$
C) $d\vec{F} = I\left[d\vec{l}, \vec{B}\right]$
D) $d\vec{F} = I\left[\vec{B}, d\vec{l}\right]$
E) $d\vec{F} = \left[\vec{j}, \vec{B}\right]$

10. В формуле закона Малюса $\mathrm{I} = \mathrm{I}_0 \cos^2\varphi$, I_0 – это:

A) интенсивность падающего света
B) интенсивность света после анализатора
C) угол между плоскостями поляризации поляризатора и анализатора
D) угол поворота плоскости поляризации
E) интенсивность естественного света

ПРИМЕРЫ ВОПРОСОВ ВОУД ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1 уровень

1 Недостающий элемент в ядерной реакции $^{93}_{41}\mathrm{Nb} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} = ? + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

A) $^{90}_{39}\mathrm{Y}$
B) $^{98}_{32}\mathrm{Mo}$
C) $^{98}_{43}\mathrm{Tc}$
D) $^{86}_{37}\mathrm{Rb}$
E) $^{90}_{38}\mathrm{Sr}$

2 Уравнение волны имеет вид $\xi = 5 \cdot 10^{-3}\cos(628t - 2x)$. Согласно уравнению, длина волны

A) 3,14 м
B) 3,5 м
C) 0,5 пм
D) 700 см
E) 62,8 м
F) 62,8 см

3 Сила тока в контуре изменяется по закону $\mathrm{I} = 0{,}1\cos 6 \cdot 10^{5}\pi t$. Амплитуда колебаний

A) 0,1 А
B) 6 А
C) 600 мА
D) $6 \cdot 10^{2}$ мА
E) 10 А
F) 10 кА
G) 12 кА

4 Элемент, который получается в результате бета-распада элемента с порядковым номером Z, имеет по таблице Менделеева порядковый номер

A) Z+1
B) Z+2
C) Z
D) Z-1
E) Z-2
F) Z+3
G) Z-3

5 В результате захвата альфа-частицы ядром изотопа азота $^{14}_{7}N$ образуются протон и неизвестный изотоп

A) $^{17}_{8}X$
B) $^{16}_{7}X$
C) $^{4}_{2}X$
D) $^{18}_{8}X$
E) $^{16}_{8}X$

6 Чтобы энергетическая светимость черного тела возросла в 9 раз, абсолютную температуру нужно увеличить

A) в $\sqrt{3}$ раз
B) в 4 раза
C) в 9 раз
D) в $3\sqrt{3}$ раз
E) в 14 раз
F) в 18 раз

7 Известно, что некоторый радиоактивный изотоп имеет постоянную распада $\Delta\lambda = 4 \cdot 10^{-7} с^{-1}$. Величина, равная 75% первоначальной массы атомов, распадется за промежуток времени

A) $3{,}5 \cdot 10^{6}$ с
B) $347 \cdot 10^{6}$ с
C) 1,4 суток
D) 9664 час
E) $3{,}9 \cdot 10^{6}$ с
F) 188 с
G) 188000 с

8 По соленоиду индуктивностью L течет ток силой I. При увеличении числа витков соленоида в 3 раза

A) $B_2 = 3B_1$
B) $B_2 = 6B_1$
C) $B_2 = 9B_1$
D) $\Phi_2 = 9\Phi_1$
E) $\Phi_2 = 4\Phi_1$
F) $B_2 = B_1$
G) $\Phi_2 = \Phi_1$

9 Абсолютный показатель преломления среды

A) $\sqrt{\varepsilon\mu}$
B) $n_2 S_2 - n_1 S_1$
C) $2n_1 S_1 - n_2 S_2$

D) $\frac{l}{d}\lambda$

E) $\frac{4\pi}{\lambda}(n_1 S_1 - n_2 S_2)$

10 Плотность энергии магнитной части электромагнитной волны

A) $\frac{1}{2}\mu_0 \mu H^2$

B) $\varepsilon_0 \varepsilon E^2$

C) $\mu_0 \mu H^2$

D) $\frac{1}{2}(\varepsilon_0 \varepsilon E^2 + \mu_0 \mu H^2)$

E) $\frac{1}{4}\varepsilon_0 \varepsilon E^2$

F) $\frac{1}{8}\varepsilon_0 \varepsilon E^2$

2 уровень

1 Ширина интерференционной полосы при увеличении длины волны в 2 раза:

A) увеличится в 2 раза

B) возрастет вдвое

C) увеличится в 14 раз

D) уменьшится в 14 раз

E) не изменится

2 Зонные пластинки применяют для того, чтобы:

A) увеличить освещенность

B) повысить качество изображения

C) уменьшить изображение предметов

D) получить тень

E) контролировать скорость света

F) изучить полосы равного наклона

G) измерить период решетки

3 В ходе реакции ${}_1^2H + {}_1^3H \rightarrow {}_2^4He + X$ образуется альфа-частица и вторая частица:

A) n

B) нейтрон

C) альфа-частица

D) гамма-квант

E) электрон

F) позитрон

G) мюон

4 Колебательный контур содержит конденсатор электроёмкостью 50 нФ и катушку индуктивностью $5/(4\pi^2)$ мкГн. Длина волны излучения равна:

A) 150 м
B) 0,15 км
C) 30 м
D) 3000 см
E) 1,6 м

5 Под альфа-распадом понимается:

A) выброс ядер атомов гелия
B) поток альфа-частиц
C) выброс электронов
D) выброс позитронов
E) поток протонов
F) поток фотонов

6 Экспериментальные факты, доказывающие квантовую природу света:

A) фотоэффект, эффект Комптона
B) тепловое излучение
C) интерференция и дифракция света
D) опыты Джермера и Дэвисона
E) опыт Боте, Франка – Герца
F) опыты Штерна – Герлаха
G) поляризация света при отражении

7 В формулу условия главных максимумов дифракционной решетки входит величина m:

A) порядок спектра
B) безразмерная величина
C) волновое число
D) длина волны
E) постоянная Вина
F) жесткость системы
G) плотность

8 В формулу условия главных минимумов дифракционной решетки входит величина d:

A) период решетки
B) величина, измеряемая в метрах
C) волновое число
D) длина волны
E) постоянная Вина

9 В формуле $2d\sin\theta = \pm m\lambda$, d – это:

A) расстояние между атомными слоями
B) величина, измеряемая в метрах
C) угол скольжения
D) угол дифракции
E) безразмерная величина
F) разность фаз

10 В колебательном контуре емкость и индуктивность заменили другими, в 3 раза больше. Период колебаний:

A) увеличится в 3 раза
B) возрастет в 3 раза
C) не изменится
D) уменьшится в 4 раза
E) увеличится в 4 раза
F) уменьшится в 9 раз
G) возрастет в 20 раз

3 уровень

1 Определить работу выхода (в эВ) электронов из вещества, если красная граница фотоэффекта 310 нм.

A) 4 эВ
B) $\sqrt{16}$ эВ
C) 2^2 эВ
D) 2 эВ
E) $\sqrt{4}$ эВ

2 Красная граница фотоэффекта для металла 500 нм. Найти минимальное значение энергии фотона, вызывающего фотоэффект.

A) 2,48 эВ
B) (2+0,48) эВ
C) $2 \cdot 1{,}24$ эВ
D) 148 эВ
E) (2-0,48) эВ
F) 145 эВ

3 Сила тока в контуре изменяется по закону $I = 0{,}3\cos 2 \cdot 10^5 \pi t$, тогда амплитуда колебаний:

A) 0,3 А
B) 300 мА
C) $3 \cdot 10^{-1}$ А
D) 0,2 А

E) 200 мА
F) $2 \cdot 10^2$ мА
G) 4 А

4 В магнитном поле с индукцией 0,05 Тл вращается стержень длиной 1 м с угловой скоростью 20 рад/с. Если ось вращения проходит через конец стержня и параллельна магнитному полю, то ЭДС индукции, возникающая на концах стержня:
A) $5 \cdot 10^{-1}$ В
B) $0{,}5$ В
C) $5 \cdot 10^2$ мВ
D) 4 В
E) $\sqrt{16}$ В

5 Уравнение волны имеет вид $\xi = 5 \cdot 10^{-3} \cos(628t - 2x)$, тогда длина волны:
A) 3,14 м
B) пм
C) 314 см
D) 2 м
E) $0{,}2$пм
F) 500 см

6 Необходимо изготовить плосковыпуклую линзу с оптической силой 6 дптр. Радиус кривизны выпуклой поверхности линзы, если показатель преломления материала линзы 1,6:
A) 10 см
B) 0,1 м
C) 100 мм
D) 16 см
E) 0,16 м
F) 1600 мм
G) 600 см

7 На грань стеклянной призмы с показателем преломления 1,5 нормально падает луч света. Угол отклонения луча призмой (в градусах), если ее преломляющий угол составляет 30 градусов:
A) 18
B) $\sqrt{324}$
C) $36/2$
D) 10
E) $\sqrt{100}$

8 Минимальная длина волны рентгеновских лучей, полученных от трубки при напряжении 60 кВ, составляет 20,7 пм. Тогда постоянная Планка:

A) $6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
B) $66{,}3 \cdot 10^{-35}$ Дж · с
C) $663 \cdot 10^{-36}$ Дж · с
D) $7{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
E) $76{,}3 \cdot 10^{-35}$ Дж · с
F) $763 \cdot 10^{-34}$ Дж · с

9 В опыте Юнга расстояние между щелями 0,8 мм. Длина волны 0,64 мкм. Если ширина интерференционной полосы 2 мм, то экран расположен от щелей на расстоянии:

A) 2,5 м
B) 250 см
C) 2500 мм
D) 3,5 м
E) 350 см
F) 3500 мм
G) 4,5 м

10 Найти фокусное расстояние линзы, если известно, что действительное изображение предмета, находящегося на расстоянии 30 см от линзы, получается на таком же расстоянии от нее:

A) 0,15 м
B) 15 см
C) 150 мм
D) 0,020 м
E) 2,0 см
F) 20 мм
G) 0,6 м

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики: в 5 кн.; Астрель: АСТ, 2005. – М., 1 кн, 2 кн, 3 кн.
2. Детлаф А.А. Курс физики. – М.: ACADEMIA, 2008. – 720 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: ACADEMIA, 2007. – 558 с.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. Теория, задачи, решения. – М.: ACADEMIA, 2004. – 250 с.
5. Трофимова Т.И. Физика в таблицах и формулах. – М.: Дрофа, 2004. – 430 с.
6. Иродов И.Е. Задачи по общей физике. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2007 – 416 с.

Елена Валерьевна Пономаренко

Методические указания
по организации и выполнению
самостоятельной работы студентов
по дисциплине «Физика»
для студентов специальности
5В073200 – Стандартизация и сертификация

Подписано в печать _____

Формат бумаги $X^{x}Y$ 1/16

Бумага типографская. Печать офсетная. Объем 7,5 п.л.
Тираж 50 экз. Заказ №_____

© Издание Южно-Казахстанского государственного университета
им. М.Ауэзова

Издательский центр ЮКГУ им. М.Ауэзова, г. Шымкент, пр. Тауке хана, 5