

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**  
**Государственное образовательное учреждение**  
**высшего профессионального образования**  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Утверждено

На заседании кафедры ТиЭФ

" \_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2007 г.

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ Е.А.Ванина

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС**  
**дисциплины “Общая физика”**  
**ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ**

**Составители:**

Козачкова О.В. (общая редакция), Ульянычева В.Ф., Копылова И.Б., Ванина Е.А., Сетейкин А.Ю., Польшин В.И.

г. Благовещенск

2007 г.

## СОДЕРЖАНИЕ УМКД

<b>ЧАСТЬ 1: СОДЕРЖАНИЕ СТАНДАРТА И РАБОЧИЕ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ «ОБЩАЯ ФИЗИКА» ПО СПЕЦИАЛЬНОСТЯМ</b>	<b>3 стр.</b>
<b>ЧАСТЬ 2: МЕТОДИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ КУРСА «ОБЩАЯ ФИЗИКА». КОНТРОЛИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ.</b>	
ТЕМАТИКА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ	<b>65 стр.</b>
СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА	<b>67 стр.</b>
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОФЕССОРСКО-ПРЕПОДАВАТЕЛЬСКОМУ СОСТАВУ ПО ОРГАНИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ	<b>69 стр.</b>
МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ	
Содержание самостоятельной работы студентов.	<b>71 стр.</b>
Вопросы для самопроверки.	<b>72 стр.</b>
Методические рекомендации для подготовки к практическим и семинарским занятиям.	<b>95 стр.</b>
Метод. рекомендации для подготовки к лаборат. работам.	<b>96 стр.</b>
ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ	<b>97 стр.</b>
Коллоквиум, экзамен, программа-минимум	
ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ БИЛЕТЫ	<b>106 стр.</b>
КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ	<b>129 стр.</b>
КОНТРОЛИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ	<b>130 стр.</b>
Контрольная работа № 1	
Контрольная работа № 2	
Контрольная работа № 3	
ТЕСЫ КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ ЗНАНИЙ	<b>138 стр.</b>
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	<b>215стр.</b>
<b>ЧАСТЬ 3: ПЛАН-КОНСПЕКТ ЛЕКЦИОННОГО КУРСА</b>	<b>217стр.</b>

Федеральное агентство по образованию Российской Федерации  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(ГОУ ВПО «АмГУ»)

"УТВЕРЖДАЮ"

Проректор по Учебной работе

\_\_\_\_\_ Е.С. Астапова

" \_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2007г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по **ФИЗИКЕ** для специальностей

220301 "Автоматизация технологических процессов и производств".  
140204 "Электрические станции"  
140205 "Электроэнергетические сети и системы"  
140211 "Электроснабжение"  
140101 "Тепловые электрические станции"  
140203 "Релейная защита и автоматизация энергетических систем"

**Курсы I, II Семестры 1,2,3.**

**Лекции** 126 час. **Экзамен** 1, 2, 3 семестры.

**Зачет** (специальность 220301) - 1,3 семестры

**Практические (семинарские) занятия:**

для специальностей – 140204, 140205, 140211, 140101, 140203 - 36 час.

для специальности 220301 - 90 час.

**Лабораторные занятия:**

для специальностей - 140204, 140205, 140211, 140101, 140203 - 90 час.

для специальности 220301 - 90 час.

**Самостоятельная работа:**

для специальностей

140204, 140205, 140211, 140101, 140203 - 256 час.

для специальности 220301 - 244 час.

**Всего часов:**

для специальности 140204, 140205, 140211, 140101, 140203 - 508 час.

для специальности 220301 - 550 час.

Составитель Козачкова О.В.

Благовещенск 2007

Рабочая программа составлена на основании Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению (специальности) 220301, 140204, 140205, 142011, 140101, 140203.

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ " 2007 г. протокол N \_\_\_\_

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ Ванина Е.А.

Рабочая программа одобрена на заседании учебно-методического совета специальностей 220301, 140204, 140205, 140211, 140101, 140203.

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ " 2007 г. протокол N \_\_\_\_

СОГЛАСОВАНО

Начальник УМУ

\_\_\_\_\_ Г.Н. Торопчина

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2007 г.

СОГЛАСОВАНО

Председатель УМС факультета

\_\_\_\_\_

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2007 г.

СОГЛАСОВАНО

Зав. выпускающей кафедры АППиЭ \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_)

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2007 г.

Зав. кафедрой Энергетики \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_)

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2007 г.

## Цели и задачи дисциплины, её место в учебном процессе.

Курс физики совместно с курсами высшей математики теоретической механики составляет основу теоретической подготовки инженеров и играет роль фундаментальной физико-математической базы, без которой невозможна успешная деятельность инженера любого профиля. Курс физики представляет собой единое целое. Изучение целостного курса физики способствует формированию у студентов научного мировоззрения и современного физического мышления.

Инженер должен: иметь представление: - о Вселенной в целом как физическом объекте и ее эволюции;

- о фундаментальном единстве естественных наук, незавершенности естествознания и возможности его дальнейшего развития;

- о дискретности и непрерывности в природе;

- о соотношении порядка и беспорядка в природе, упорядоченности строения объектов, переходах в неупорядоченное состояние и наоборот;

- о динамических и статистических закономерностях в природе;

- о вероятности как объективной характеристике природных систем;

- об измерениях и их специфичности в различных разделах естествознания;

- о фундаментальных константах естествознания;

- о принципах симметрии и законах сохранения;

- о соотношениях эмпирического и теоретического в познании;

- о состояниях в природе и их изменениях со временем;

- об индивидуальном и коллективном поведении объектов в природе;

- о времени в естествознании;

Задачи, которые ставятся при изучении физики во втузах, многообразны. Важнейшие из них состоят в

- изучении основных физических явлений;

- овладении фундаментальными понятиями, законами и теоремами классической и современной физики, а также методами физического исследования.

- овладении приемами и методами решения конкретных задач из различных областей физики.

- ознакомлении с современной научной аппаратурой, формировании навыков проведения физического эксперимента,

- умении выделить конкретное физическое содержание в прикладных задачах будущей специальности.

## СТАНДАРТ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ

Физические основы механики; понятие состояния в классической механике, уравнения движения, законы сохранения, основы релятивистской механики, принцип относительности в механике, кинематика и динамика твердого тела, жидкостей и газов; электричество и магнетизм; электростатика и магнитостатика в вакууме и веществе, уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной форме, материальные уравнения, квазистационарные токи, принцип относительности в электродинамике; явления сверхпроводимости, полупроводники, туннельный эффект, физика колебаний и волн; гармонический и ангармонический осциллятор, физический смысл спектрального разложения, кинематика волновых процессов, нормальные моды, интерференция и дифракция волн, элементы Фурье-оптики; квантовая физика; корпускулярно-волновой дуализм, принцип неопределенности, квантовые состояния, принцип суперпозиции, квантовые уравнения движения, операторы физических величин, энергетический спектр атомов и молекул, природа химической связи; статистическая физика и термодинамика; три начала термодинамики, термодинамические функции состояния, фазовые равновесия и фазовые превращения, элементы неравновесной термодинамики, классическая и квантовая статистики, кинетические явления, системы заряженных частиц, конденсированное состояние; физический практикум.

Перечень дисциплин с указанием разделов (тем), усвоение которых студентам необходимо для изучения дисциплины "Физика".

1. Курс физики средней школы.
2. Математическая подготовка:

### **1-й семестр:**

- векторная алгебра;
- производная, частная производная, градиент;
- неопределенный и определенный интегралы;
- понятие о вероятности, плотность распределения вероятности;
- дифференциальные уравнения (общие представления);

## **2-й семестр:**

- элементы теории поля: поток, циркуляция, теоремы Остроградского и Стокса;
- комплексные числа;
- дифференциальные уравнения;
- понятие о рядах Фурье;
- волновое уравнение;

## **3-й семестр:**

- интеграл Фурье.

## Содержание дисциплины "Физика".

Наименование тем, их содержание, объём в часах лекционных занятий (темы в фигурных скобках рекомендуются для самостоятельного изучения).

### 1 семестр (36 час.):

#### Введение (1 ч.)

Предмет физики. Метод физического исследования: опыт, гипотеза, эксперимент, теория. Математика и физика. Роль физики в развитии техники. Физика и инженерные науки. Физические модели и ЭВМ. Общая структура и задачи курса физики. Размерность физических величин. Основные единицы СИ. Предлагаемая литература.

#### 1. Физические основы механики (всего 17 ч.).

##### 1.1. Элементы кинематики (2 ч.).

Физические модели: материальная точка (частица), система материальных точек, абсолютно твёрдое тело, сплошная среда. Пространство и время. Элементы векторной алгебры.

Кинематическое описание движения. Скорость и ускорение при криволинейном движении. Нормальное и тангенциальное ускорение.

Степени свободы и обобщенные координаты. Движение точки по окружности. Угловая скорость и угловое ускорение. Вектор угловой скорости и углового ускорения.

О смысле производной и интеграла в физике.

##### 1.2. Динамика частиц (3 ч.).

Основная задача динамики. Понятие состояния в классической механике. Уравнение движения. Общие представления о дифференциальных уравнениях. Масса и импульс. Эталон массы в СИ. Границы применимости классического способа описания движения частиц.

Современная трактовка законов Ньютона. Первый закон Ньютона и понятие инерциальной системы отсчёта. Второй закон Ньютона как уравнение движения. Сила как производная импульса. Виды сил в механике.

Третий закон Ньютона и закон сохранения импульса.

##### 1.3. Система материальных точек (4 ч.).

Внутренние и внешние силы. Импульс системы материальных точек. Закон сохранения импульса как фундаментальный закон природы. Основное уравнение динамики системы материальных точек.

Аддитивность массы. Центр масс (центр инерции). Теорема о движении центра масс. Система центра инерции.

Момент импульса. Закон сохранения момента импульса. Момент силы. Уравнение моментов.

Твёрдое тело в механике. Момент импульса вращающегося тела. Момент инерции твёрдого тела. Уравнение динамики и равновесия твёрдого тела.

#### 1.4. Закон сохранения энергии (4 ч.).

Работа и кинетическая энергия. Работа переменной силы. Примеры. Мощность. Кинетическая энергия в различных системах отсчёта. Полная кинетическая энергия движения тела как целого.

Консервативные и неконсервативные силы. Потенциальная энергия. Связь между консервативной силой и потенциальной энергией. Закон сохранения энергии в механике. Общефизический закон сохранения энергии.

#### 1.5. Элементы механики сплошных сред (2 ч.).

Общие свойства жидкостей и газов. Идеальная и вязкая жидкости. Уравнения равновесия и движения жидкости. Гидростатика несжимаемой жидкости. Стационарное течение. Линии и трубка тока. Уравнение неразрывности. Стационарное движение идеальной жидкости. Уравнение Бернулли. Вязкая жидкость. {Формула Пуазейля.}

{Напряжения в упругодеформированном теле. Закон Гука. Растяжение и сжатие стержней.}

#### 1.6 Принцип относительности в механике (2 ч.).

Принцип относительности Галилея. Преобразования Галилея. Инварианты преобразования. Преобразования Лоренца. Следствия из преобразований Лоренца: относительность длин и промежутков времени. Релятивистский закон сложения скоростей.

Элементы релятивистской динамики. Релятивистская масса, импульс и энергия. Уравнение движения релятивистской частицы.

## **2. Молекулярная физика и термодинамика (всего 18 ч.).**

### 2.1. Микроскопические состояния (2 ч.).

Тепловое движение. Макроскопические параметры. Уравнение состояния. Внутренняя энергия. Уравнение состояния идеального газа. Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Средняя кинетическая энергия молекул. Молекулярно-кинетический смысл абсолютной температуры. Число степеней свободы. Закон распределения энергии по степеням свободы.

### 2.2. Статистические распределения (6 ч.).

Вероятность и флуктуация. Распределение Максвелла. Распределение частиц по абсолютным значениям скорости. Средняя кинетическая энергия частиц. Скорость теплового движения частиц. {Опыт Штерна.}

Распределение Больцмана. Барометрическая формула. Теплоёмкость многоатомных газов. Недостаточность классической теории теплоёмкости.

Классическая и квантовые статистики. Энтропия и статистический вес состояния. Принцип возрастания энтропии.

### 2.3. Основы термодинамики (4 ч.)

Обратимые и необратимые тепловые процессы. Внутренняя энергия. Работа газа при изменении объёма. Количество теплоты. Теплоёмкость. Первое начало термодинамики. Применение к изопроцессам.

Круговые процессы. Цикл Карно и его КПД. Тепловой двигатель и холодильная машина.

Приведённое количество теплоты. Энтропия в термодинамике. Обратимые и необратимые процессы. Второе начало термодинамики. Тепловые машины. Цикл Карно, термический КПД тепловой машины. Термодинамические функции состояния. Фазовые равновесия и фазовые превращения.

### 2.4. Явления переноса (2 ч.)

Понятие о физической кинетике. Время релаксации. Эффективное сечение рассеяния. Число столкновений и длина свободного пробега молекул в газе.

Явления переноса. Диффузия, теплопроводность, вязкость. Динамическая и кинематическая вязкость.

### 2.5. Реальные газы. (2 ч.)

Учёт молекулярного взаимодействия. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Критическая точка. Сравнение теоретических и экспериментальных изотерм.

### 2.6. Конденсированное состояние (2 ч.)

Жидкости. Поверхностное натяжение, формула Лапласа. Смачивание. Строение и свойства кристаллических и аморфных тел. Элементы кристаллографии. Влияние типа связи на структуру и свойства кристаллов. {Дефекты структуры.}

{Жидкие кристаллы. Типы жидких кристаллов.}

**2-й семестр (54 час.):**

**3. Электричество и магнетизм (всего 40 ч.).**

### 3.1. Элементы теории поля (4 ч.)

Скалярные и векторные поля. Действия над векторами. Основные интегралы теории поля (поток, циркуляция), дивергенция и ротор. Теорема Остроградского-Гаусса, теорема Стокса.

### 3.2. Электростатика (8 ч.).

Закон Кулона. Напряжённость электрического поля. Принцип суперпозиции. Электрический диполь. Работа электростатического поля. Циркуляция электростатического поля. Потенциал. Связь напряжённости с потенциалом. Поток вектора. Теорема Гаусса. Густота силовых линий. Проводник в электростатическом поле. Граничные условия на границе "проводник-вакуум". Коэффициенты электростатической ёмкости и электростатической индукции. Ёмкость конденсаторов различной геометрической конфигурации.

Энергия взаимодействия электрических зарядов. Энергия системы заряженных проводников. Энергия конденсатора. Плотность энергии электростатического поля.

### 3.3. Постоянный электрический ток (4 ч.).

Сила и плотность тока. Условия существования тока. Источники тока. Сторонние силы. ЭДС. Электрический ток в сплошной среде. Электрическое сопротивление, удельное сопротивление проводника, удельная проводимость. Явление сверхпроводимости.

Законы Ома и Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной форме.

Электропроводность металлов. Носители тока. Электронный газ. Подвижность носителей. Недостаточность классической электронной теории.

### 3.4. Элементы физической электроники (2 ч.).

Электрический ток в вакууме. Термоэлектронная эмиссия. Виртуальный катод. Электрический ток в газе. Процессы ионизации и рекомбинации.

Понятие о плазме.

### 3.5. Магнитное поле (8 ч.).

Закон Био-Савара-Лапласа. Принцип суперпозиции. Магнитное поле кругового и прямолинейного тока. Понятие о циркуляции вектора  $\mathbf{B}$ . Закон полного тока для тока проводимости.

Сила Лоренца и сила Ампера. Вектор магнитной индукции. Единица силы тока - Ампер.

Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях. Виток с током в магнитном поле. Момент сил, действующий на рамку. {Потенциальная энергия витка с током во внешнем магнитном поле.}

Явление электромагнитной индукции. Правило Ленца. Самоиндукция. Индуктивность.

### 3.6. Статическое поле в веществе (8 ч.).

Понятие о дипольном моменте. Энергия диполя в электростатическом поле. Полярные и неполярные молекулы и диэлектрики. Поляризация

диэлектриков. Поляризованность. Диэлектрическая восприимчивость диэлектрика.

Поляризационные заряды. Электрическое поле внутри диэлектрика. Диэлектрическая проницаемость диэлектрика. Вектор электрического смещения (индукции).

Сегнетоэлектрики. Граничные условия для электростатического поля на границе "диэлектрик-диэлектрик" и "проводник-диэлектрик".

Понятие о магнитном моменте тока. Механический и магнитный момент атома. Процесс намагничивания магнетиков. Намагниченность. Магнитная восприимчивость.

Молекулярные токи. Магнитное поле в магнетиках. Напряженность магнитного поля. Магнитная проницаемость.

Граничные условия для магнитного поля на границе магнетиков. Применения (магнитные цепи).

Диамагнетики и парамагнетики. Объяснение намагничивания. Зависимость намагничивания от напряжённости внешнего поля. Ферромагнетики. Домены. Кривая намагничивания. Явление насыщения. Основные свойства ферромагнетиков.

### 3.7. Уравнения Максвелла (6 ч.).

Фарадеевская и Максвелловская трактовка явлений электромагнитной индукции. Вихревое электрическое поле. Ток смещения. Система уравнений Максвелла в интегральной форме.

Принцип относительности в электродинамике. Скорость распространения электромагнитных возмущений.

## **4. Колебания и волны (всего 26 ч.).**

### 4.1. Гармонический осциллятор (12 ч.).

Понятие о колебательных процессах. Единый подход к колебаниям различной физической природы. Виды колебаний.

Груз на пружине, физический маятник, крутильный маятник, колебательный контур. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний, его решение. Амплитуда, круговая частота, фаза.

Затухающие колебания. Коэффициент затухания, логарифмический декремент, добротность.

Резонанс. Резонансные кривые. Вынужденные колебания в электрических цепях. Резонанс токов, резонанс напряжений.

Метод комплексных амплитуд. Комплексная форма представления колебаний. Векторные диаграммы. Сложение колебаний.

Фурье-разложение ангармонических колебаний. Физический смысл спектрального разложения.

#### 4.2. Волновые процессы (2 ч.).

Волны. Плоская и сферическая стационарные волны. Уравнение плоской волны. Волновое уравнение. Продольные и поперечные волны. Интерференция синусоидальных волн. Условия усиления и ослабления. Стоячие волны. Звуковые волны.

Электромагнитные волны. Шкала электромагнитных колебаний.

### **3 семестр (36 час.).**

#### 4.3. Интерференция световых волн. (4 ч.).

Интерференция монохроматических волн. Квазимонохроматические волны. Когерентность. Основные интерференционные схемы. Интерферометры.

Временное и спектральное рассмотрение интерференционных явлений.

#### 4.4. Дифракция волн (4 ч.).

Принцип Гюйгенса-Френеля. Приближение Френеля. Интеграл в дифракции Френеля. Простые задачи дифракции (дифракция на круглом отверстии, дифракция на щели). Зонная пластинка.

Дифракционная решётка. Исследование кристаллических структур, уравнение Вульфа-Брэггов.

Принцип голографии.

#### 4.5. Поляризация света. (2 ч.).

Поперечность световых волн. Поляризация света. Виды поляризации: плоско-поляризованный свет, круговая, эллиптическая поляризация. Закон Малюса. Поляризация света при отражении от поверхности диэлектрика. Закон Брюстера. Двухлучепреломление.

#### 4.6. Электромагнитные волны в веществе (2 ч.).

Распространение света в веществе. Дисперсия диэлектрической проницаемости. Поглощение света. Элементы кристаллооптики. Элементы нелинейной оптики: самофокусировка света, генерация оптических гармоник.

### **5. Квантовая физика (всего 22 ч.).**

#### 5.1. Экспериментальное обоснование основных идей квантовой теории (4 ч.).

Противоречия классической физики. Проблемы теплового излучения. Абсолютно чёрное тело. Законы теплового излучения (закон Стефана-Больцмана, закон смещения Вина). Гипотеза Планка. Световые кванты.

Фотоэффект. Эффект Комптона. Давление света.

Правило частот Бора. Опыт Франка и Герца.

Гипотеза де Бройля. Дифракция электронов (опыт Девиссона и Джермера). Микрочастица в двухщелевом интерферометре. Соотношение неопределённостей Гейзенберга. Границы применимости классической механики.

#### 5.2. Квантовое состояние (2 ч.).

Состояние микрочастицы в квантовой механике: волновая функция и её статистический смысл. Суперпозиция состояний. Объяснение поведения микрочастиц в интерферометре.

### 5.3. Уравнение Шрёдингера (6 ч.).

Временное уравнение Шрёдингера. Стационарное уравнение Шрёдингера. Простейшие задачи квантовой механики: свободная частица, частица в одномерной прямоугольной, бесконечно глубокой "яме", туннельный эффект. Гармонический осциллятор.

Объяснение устойчивости атома, туннельного эффекта. Энергия нулевых колебаний осциллятора.

### 5.4. Физика атома (4 ч.).

Атом водорода в квантовой механике.

Частица в сферически симметричном поле. Водородоподобный атом. Энергетические уровни. Потенциалы возбуждения и ионизации. Спектры водородоподобных атомов. Пространственное распределение электронов в атоме водорода.

Структура электронных уровней в сложных атомах. Типы связей электронов в атомах. (Принцип Паули. Периодическая система элементов Д.И. Менделеева.)

### 5.5. Физика молекул (2 ч.).

Молекула водорода. Обменное взаимодействие. Физическая природа химической связи. Ионная и ковалентная связь. Электронные термы двухатомной молекулы. Колебательная и вращательная структура термов.

### 5.6. Физика атомного ядра (2 ч.).

Строение атомных ядер. Феноменологические модели ядра: газовая, капельная, оболочечная. Ядерная реакция. Порог реакции. Механизмы ядерных реакций.

Радиоактивные превращения ядер. Реакция ядерного деления. (Ядерный реактор.)

Проблемы источников энергии. (Термоядерные реакции.) Методы регистрации ядерных частиц.

### 5.7. Основы физики твердого тела (2 ч.).

Электропроводность в металлах. Носители тока в металлах. Недостаточность классической электронной теории. Зонная структура энергетического спектра твердых тел. Заполнение зон. Металлы, полупроводники, диэлектрики. Понятие дырочной проводимости. Собственные и примесные полупроводники.

## **6. Современная физическая картина мира (2 ч.).**

Вещество и поле. Атомно-молекулярное строение вещества. Кварки. Элементарные частицы: лептоны, адроны. Взаимопревращение частиц.

О единых теориях материи. Физическая картина мира как философская категория.

## **Темы практических занятий.**

(для специальностей 140204, 140205, 140211, 140101, 140203)

### **1 семестр (18 ч).**

#### **Механика и молекулярная физика**

1. Кинематика поступательного и вращательного движения (2 ч.).
2. Динамика поступательного и вращательного движения твёрдого тела и системы тел (4 ч.).
3. Законы сохранения (6 ч.).
4. Первое начало термодинамики в применении к идеальному газу (2 ч.).
5. 2 начало термодинамики. Цикл Карно. Расчёт энтропии (4 ч.).

### **2 семестр (18 ч.)**

#### **Электричество и магнетизм. Колебания.**

1. Напряжённость и потенциал электрического поля. Принцип суперпозиции. Теорема Гаусса (4 ч.).
2. Постоянный ток. (4 ч.).
3. Основные законы магнитостатики. Расчёт магнитного поля (2ч.).
4. Силы Ампера и Лоренца (2 ч.).
5. Явления электромагнитной индукции (2 ч.).
6. Колебания (4 ч.).

Итого по дисциплине: практических занятий 36 часов.

#### **Темы практических занятий. (для специальности 220301)**

##### **1 семестр (36 ч). Механика и молекулярная физика.**

1. Кинематика поступательного и вращательного движения (6 ч.).
2. Динамика поступательного и вращательного движения твёрдого тела и системы тел (8 ч.).
3. Законы сохранения (8 ч.).
4. Первое начало термодинамики в применении к идеальному газу (4 ч.).
5. Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса (2 .).
6. Циклические процессы. Цикл Карно. Тепловые машины. (2 ч.).
7. 2 начало термодинамики. Энтропия. Расчёт изменения энтропии в различных процессах (4 ч.).
8. Жидкое состояние вещества. Поверхностное натяжение. Контактные явления. Капиллярные явления (2).

##### **2 семестр (36 ч.) Электричество и магнетизм. Колебания и волны.**

1. Напряжённость и потенциал электрического поля. Принцип суперпозиции. Теорема Остроградского-Гаусса (8 ч.).
2. Электрическое поле в диэлектриках. Вектор электрического смещения. Поляризация диэлектриков (2 ч.).
3. Законы постоянного тока (4 ч.).
4. Закон Био-Савара-Лапласа. Принцип суперпозиции магнитных полей. Расчет индукции магнитного поля (6).
5. Закон полного тока (2 ч.).
6. Движение заряженных частиц в магнитном поле. Сила Лоренца. Сила Ампера (4 ч.).
7. Явления электромагнитной индукции (6 ч.).
8. Колебания и волны (4 ч.).

### **3 семестр (18 ч.). Оптика. Квантовая физика.**

1. Интерференция света (2 ч.).
2. Дифракция света (2 ч.).
3. Поляризация света (2 ч.).
4. Квантовые свойства света (2 ч.).
5. Атом Резерфорда-Бора. Спектры (2 ч.).
6. Элементы квантовой механики (2 ч.).
7. Радиоактивность (2 ч.).
8. Семинар: "Физика на пороге III тысячелетия (проблемы современной физики)" (4 ч.).

Итого по дисциплине: практических занятий 90 часов.

### **Темы лабораторных работ.**

(для специальностей 140204, 140205, 140211, 140101, 140203)

### **1 семестр (36 ч.) Механика. Молекулярная физика.**

1. Обработка результатов измерений (4 ч.).
2. Измерение линейных размеров и определение плотности твёрдых тел (2 ч.).
3. Проверка второго закона Ньютона на машине Атвуда (2 ч.).
4. Изучение законов сохранения при ударе шаров (2 ч.).
5. Изучение основного закона динамики вращательного движения на маятнике Обербека (2 ч.).
6. Изучение законов сохранения момента импульса и энергии при помощи крутильного маятника (2 ч.).
7. Определение момента импульса гироскопа (2 ч.).

8. Проверка закона сохранения энергии на маятнике Максвелла (2 ч.).
9. Определение момента инерции тел при помощи крутильного маятника (2 ч.).
10. Определение ускорения свободного падения при помощи обратного маятника (2 ч.).
11. Определение коэффициента вязкости методом Стокса (2 ч.).
12. Определение показателя адиабаты (2 ч.).
13. Определение модуля Юнга методом Лермантова (2 ч.).
14. Прием лабораторных работ, зачетные занятия (до 8 ч.)

## **2-й семестр (18 ч.) Электричество и магнетизм.**

1. Элементы электрических цепей и электроизмерительные приборы (2 ч.).
2. Изучение электронного осциллографа (2 ч.).
3. Определение удельного сопротивления металлического проводника (2 ч.).
4. Исследование электростатического поля (2 ч.).
5. Исследование КПД источника тока (2 ч.).
6. Проверка закона Ома для неоднородного участка цепи (2 ч.).
7. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли (2 ч.).
8. Определение удельного заряда электрона методом магнитной фокусировки электронных пучков (2 ч.).
9. Прием лабораторных работ, зачетное занятие (2 ч.)

## **3-й семестр (18 ч.) Квантовая физика. Оптика.**

1. Определение показателя преломления прозрачной пластинки с помощью микроскопа (2 ч.).
2. Изучение закона Малюса (2 ч.).
3. Определение радиуса кривизны линзы по кольцам Ньютона (2 ч.).
4. Определение длины волны света при помощи дифракционной решетки (2 ч.).
5. Определение потенциала возбуждения атомов криптона (2 ч.).
6. Изучение серийных закономерностей в спектре водорода и определение постоянной Ридберга (2 ч.).
7. Определение линейного коэффициента ослабления гамма-излучения в свинце методом поглощения (2 ч.).
8. Определение максимальной энергии бета-спектра по толщине слоя половинного ослабления (2 ч.).
9. Прием лабораторных работ, зачетное занятие (2 ч.)

Итого по дисциплине: лабораторных занятий 54 часа.

## Темы лабораторных работ. (для специальности 220301)

### 1 семестр (36 ч.) Механика. Молекулярная физика.

1. Обработка результатов измерений (4 ч.).
2. Измерение линейных размеров и определение плотности твёрдых тел (2 ч.).
3. Проверка второго закона Ньютона на машине Атвуда (2 ч.).
4. Изучение законов сохранения при ударе шаров (2 ч.).
5. Изучение основного закона динамики вращательного движения на маятнике Обербека (2 ч.).
6. Изучение законов сохранения момента импульса и энергии при помощи крутильного маятника (2 ч.).
7. Определение момента импульса гироскопа (2 ч.).
8. Проверка закона сохранения энергии на маятнике Максвелла (2ч.).
9. Определение момента инерции тел при помощи крутильного маятника (2 ч.).
10. Определение ускорения свободного падения при помощи обратного маятника (2 ч.).
11. Определение коэффициента вязкости методом Стокса (2 ч.).
12. Определение показателя адиабаты (2 ч.).
13. Определение модуля Юнга методом Лермантова (2 ч.)
14. Прием лабораторных работ, зачетные занятия (до 8 ч.)

### 2-й семестр (36 ч.) Электричество и магнетизм.

1. Элементы электрических цепей и электроизмерительные приборы (2 ч.).
2. Изучение электронного осциллографа (2 ч.).
3. Определение удельного сопротивления металлического проводника (2 ч.).
4. Исследование электростатического поля (2 ч.).
5. Исследование КПД источника тока (2 ч.).
6. Проверка закона Ома для неоднородного участка цепи (2 ч.).
7. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли (2 ч.).
8. Определение удельного заряда электрона методом магнитной фокусировки электронных пучков (2 ч.).
9. Прием лабораторных работ, зачетное занятие ( 2 ч.)

### 3-й семестр (18 ч.). Квантовая физика. Оптика.

1. Определение показателя преломления прозрачной пластинки с помощью микроскопа (2 ч.).

2. Изучение закона Малюса (2 ч.).
3. Определение радиуса кривизны линзы по кольцам Ньютона (2ч.).
4. Определение длины волны света при помощи дифракционной решётки (2 ч.).
5. Определение потенциала возбуждения атомов криптона (2 ч.).
6. Изучение серийных закономерностей в спектре водорода и определение постоянной Ридберга (2 ч.).
7. Определение линейного коэффициента ослабления гамма-излучения в свинце методом поглощения (2 ч.).
8. Определение максимальной энергии бета-спектра по толщине слоя половинного ослабления (2 ч.).
9. Прием лабораторных работ, зачетное занятие ( 2 ч.)

Итого по дисциплине: лабораторных занятий 90 часов.

## СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ И ЗАДАНИЙ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

### 1 часть

№	Тема	Аудиторные занятия	Домашнее задание	Число часов
1.	Кинематика	1.2, 1.15, 1.30	1.8, 1.12, 1.30	2
2.	Динамика частиц	2.5, 2.12, 2.32	2.6, 2.11, 2.35	2
3.	Динамика вращательного движения	1.44, 1.49, 1.55	1.46, 1.50, 1.57	2
4.	Закон сохранения импульса Закон сохранения энергии	2.56, 2.82, 2.89 2.44, 2.121, 2.84	2.81, 2.83, 2.87 2.45, 2.122, 2.76	2
5.	Закон сохранения момента импульса	3.41, 3.40, 3.44	3.43, 3.47, 3.42	2
6.	I начало термодинамики	5.174, 5.82, 5.90	5.175, 5.91, 5.88	2
7.	II начало термодинамики	5.195, 5.197, 5.200	5.196, 5.198, 5.206	2
8.	Энтропия т/д систем	5.216, 5.218, 5.222	5.217, 5.224, 5.226	2
9.	Контрольная работа	-	-	2

## 2 часть

№	Тема	Аудиторные занятия	Домашнее задание	Число часов
1.	Напряженность и потенциал электр. поля	9.11, 9.2, 9 9.38, 9.49, 9.64	9.13, 9.3, 9 9.52, 9.38, 9.66	4
2.	Теорема Гаусса	9.20, 9.25, 9.33	9.21, 9.26, 9.32	2
3.	Постоянный ток	10.11, 10.19, 10.89	10.12, 10.21, 10.90	2
4.	Магнитное поле	11.3, 11.11, 11.19	11.7, 11.8, 11.22	2
5.	Сила Ампера и Лоренца	11.55, 11.61, 11.72	11.56, 11.71, 11.62	2
6.	Явление эл/магнитной индукции	11.98, 11.95, 11.114	11.99, 11.96, 11.115	2
7.	Колебания	12.33, 12.35, 12.41	12.34, 12.36, 12.40	2
8.	Контрольная работа	-	-	2

## 3 часть

№	Тема	Аудиторные занятия	Домашнее задание	Число часов
1.	Интерференция	16.23, 16.21, 16.24	16.26, 16.22, 16.27	2
2.	Дифракция	16.28, 16.29, 16.34	16.31, 16.28, 16.33	2
3.	Поляризация	16.59, 16.61, 16.67	16.58, 16.60, 16.66	2
4.	Квантовые свойства света	19.13, 19.17, 19.20	19.14, 19.16, 19.18	2
5.	Тепловое излучение	18.21, 18.7, 18.12	18.19, 18.11, 18.17	2
6.	Атомная теория Бора	20.4, 20.3, 20.9	20.2, 20.10, 20.6	2
7.	Элементы квант. механики	19.30, 19.32, 19.38	19.33, 19.31, 19.40	2
8.	Ядерная физика	21.6, 21.10, 21.13	21.7, 21.4, 21.14	2
9.	Контрольная работа	-	-	2

№№ задач в таблице указаны по [6].

В качестве учебного пособия по освоению методики решения физических задач рекомендуются следующие издания:

1. Сборник задач по общему курсу физики. Часть II: Электричество и магнетизм. Колебания и волны./Составители: Добросельский К.Г., Сетейкин А.Ю., Изд-во АмГУ, Благовещенск, 2003.
2. Сборник задач по общему курсу физики. Часть III: Оптика. /Составители: Добросельский К.Г., Сетейкин А.Ю., Изд-во АмГУ, Благовещенск, 2003.

Указанные пособия так же рекомендуется использовать в качестве дидактических источников для индивидуальных расчетно-графических заданий по курсу общей физики.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Амурский государственный университет

“УТВЕРЖДАЮ”  
Проректор по учебной работе  
Астапова Е.С.  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2006

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по ФИЗИКЕ  
для специальностей

23.01.02 –автоматизированные системы обработки информации и управления  
23.02.01 – информационные системы и технологии  
01.05.01 – прикладная математика

Курс 1,2

Семестр 2, 3, 4

Лекции 108 (час) для специальностей 23.01.02 и 23.02.01

Лекции 126 (час) для специальности 01.05.01

**Зачет для специальности 01.05.01 – прикладная математика - 3 семестр,**  
экзамен – 2, 4 семестр

Экзамен- 2, 3, 4 семестр для специальностей 23.01.02 и 23.02.01

Практические (семинарские) занятия 54 (час)

Лабораторные занятия - 54 (час.) для специальностей 23.01.02 и 23.02.01,  
36(час.) для специальности 01.05.01

Самостоятельная работа 192 (час.) для специальности 23.02.01

191 (час.) для специальности 23.01.02

90 (час.) для специальности 01.05.01

Всего часов

408 (час.) для специальности 23.02.01

407 (час.) для специальности 23.01.02

306 (час.) для специальности 01.05.01

Составитель Копылова И.Б. канд. физ.-мат.наук  
2006 г.

Рабочая программа составлена на основании Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования и авторских разработок по направлению специальности) \_\_\_\_\_

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 200\_ протокол № \_\_\_\_

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_)

Рабочая программа одобрена на заседании УМС (наименование специальности)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 200\_ протокол № \_\_\_\_

Председатель УМС \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_)

СОГЛАСОВАНО  
Начальник УМУ  
\_\_\_\_\_ Г.Н.Торопчина

СОГЛАСОВАНО  
Председатель УМС факультета  
\_\_\_\_\_

СОГЛАСОВАНО  
Заведующий выпускающей кафедры  
\_\_\_\_\_ “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 200\_ г.

## **Цели и задачи дисциплины, её место в учебном процессе.**

Курс физики совместно с курсами высшей математики теоретической механики составляет основу теоретической подготовки инженеров и играет роль фундаментальной физико-математической базы, без которой невозможна успешная деятельность инженера любого профиля. Курс физики представляет собой единое целое. Изучение целостного курса физики способствует формированию у студентов научного мировоззрения и современного физического мышления.

Инженер должен: иметь представление:

- о Вселенной в целом как физическом объекте и ее эволюции;
- о фундаментальном единстве естественных наук, незавершенности естествознания и возможности его дальнейшего развития;
- о дискретности и непрерывности в природе;
- о соотношении порядка и беспорядка в природе, упорядоченности строения объектов, переходах в неупорядоченное состояние и наоборот;
- о динамических и статистических закономерностях в природе;
- о вероятности как объективной характеристике природных систем;
- об измерениях и их специфичности в различных разделах естествознания;
- о фундаментальных константах естествознания;
- о принципах симметрии и законах сохранения;
- о соотношениях эмпирического и теоретического в познании;
- о состояниях в природе и их изменениях со временем;
- об индивидуальном и коллективном поведении объектов в природе;
- о времени в естествознании;

Задачи, которые ставятся при изучении физики во втузах, многообразны. Важнейшие из них:

- изучение основных физических явлений;
- овладение фундаментальными понятиями, законами и теоремами классической и современной физики, а также методами физического исследования.
- овладение приёмами и методами решения конкретных задач из различных областей физики.
- ознакомление с современной научной аппаратурой, формирование навыков проведения физического эксперимента,
- умение выделить конкретное физическое содержание в прикладных задачах будущей специальности.

**Перечень дисциплин с указанием разделов (тем), усвоение которых студентам необходимо для изучения дисциплины "Физика".**

1. Курс физики средней школы.
2. Математическая подготовка:  
2-й семестр:

- векторная алгебра;
- производная, частная производная, градиент;
- неопределенный и определенные интегралы;
- понятие о вероятности, плотность распределения;
- дифференциальные уравнения (общие представления);
- 3-й семестр:
  - элементы теории поля: поток, циркуляция, теоремы Остроградского и Стокса; - комплексные числа;
  - дифференциальные уравнения;
  - понятие о рядах Фурье;
  - волновое уравнение;
- 4-й семестр:
  - интеграл Фурье.

### **Содержание дисциплины "Физика".**

#### **Содержание стандарта для специальностей 23.02.0, 23.01.02**

Физические основы механики; колебания и волны; молекулярная физика и термодинамика; электричество и магнетизм; оптика; атомная и ядерная физика; физический практикум.

#### **Содержание стандарта для специальности 01.05.01**

Классическая механика; термодинамика; молекулярная и статистическая физика; физические основы построения ЭВМ.

#### **Лекционный курс (108 час)**

Наименование тем, их содержание, объём в часах лекционных занятий. (Темы в фигурных скобках рекомендуются для самостоятельного изучения)

#### **2 семестр (36 час.):**

Введение (1 ч.)

Предмет физики. Метод физического исследования: опыт, гипотеза, эксперимент, теория. Математика и физика. Роль физики в развитии техники. Физика и инженерные науки. Физические модели и ЭВМ. Общая структура и задачи курса физики. Размерность физических величин. Основные единицы СИ. Предлагаемая литература.

## **1. Физические основы механики (всего 17 ч.).**

Предмет механики. Кинематика и динамика. Классическая механика. Квантовая механика. Релятивистская механика.

1.1. Элементы кинематики (2 ч.). Физические модели: материальная точка (частица), система материальных точек, абсолютно твёрдое тело, сплошная среда. Пространство и время. Элементы векторной алгебры.

Кинематическое описание движения. Скорость и ускорение при криволинейном движении. Нормальное и касательное ускорение.

Степени свободы и обобщенные координаты. Движение точки по окружности. Угловая скорость и угловое ускорение. Вектор угловой скорости и углового ускорения.

О смысле производной и интеграла в физике.

### 1.2. Динамика частиц (3 ч.).

Основная задача динамики. Понятие состояния в классической механике. Уравнение движения. Общие представления о дифференциальных уравнениях. Масса и импульс. Эталон массы в СИ. Границы применимости классического способа описания движения частиц.

Современная трактовка законов Ньютона. Первый закон Ньютона и понятие инерциальной системы отсчёта. Второй закон Ньютона как уравнение движения. Сила как производная импульса. Виды сил в механике.

Третий закон Ньютона и закон сохранения импульса.

### 1.3. Система материальных точек (4 ч.).

Внутренние и внешние силы. Центр масс (центр инерции). Импульс системы материальных точек. Закон сохранения импульса как фундаментальный закон природы.

Аддитивность массы и закон сохранения центра инерции. Теорема о движении центра инерции (Основное уравнение динамики системы материальных точек). Система центра инерции.

Момент импульса. Закон сохранения момента импульса. Момент силы.

Твёрдое тело в механике. Момент импульса вращающегося тела. Момент инерции твёрдого тела. Уравнение динамики и равновесия твёрдого тела.

### 1.4. Закон сохранения энергии (2 ч.).

Работа и кинетическая энергия. Работа переменной силы. Примеры. Мощность. Кинетическая энергия в различных системах отсчёта. Энергия движения тела как целого. Внутренняя энергия.

Консервативные и неконсервативные силы. Потенциальная энергия. Связь между консервативной силой и потенциальной энергией. Закон сохранения энергии в механике. Общефизический закон сохранения энергии.

### 1.5. Элементы механики сплошных сред (2 ч.).

Общие свойства жидкостей и газов. Идеальная и вязкая жидкости. Уравнения равновесия и движения жидкости. Гидростатика несжимаемой жидкости. Стационарное течение. Линии и трубка тока. Уравнение неразрывности. Стационарное движение идеальной жидкости. Уравнение Бернулли. Вязкая жидкость. Формула Пуазейля.

{Напряжения в упругодеформированном теле. Закон Гука. Растяжение и сжатие стержней.}

### 1.6 Принцип относительности в механике (4 ч.).

Принцип относительности Галилея. Преобразования Галилея.

Инварианты преобразования. Преобразования Лоренца. Следствия из преобразований Лоренца:

относительность длин и промежутков времени. Релятивистский закон сложения скоростей.

Элементы релятивистской динамики. Релятивистская масса, импульс и энергия. Уравнение движения релятивистской частицы.

## **2. Молекулярная физика и термодинамика (всего 18 ч.).**

Три начала термодинамики;

Динамические и статистические закономерности в физике. Статистический и термодинамический методы.

### 2.1. Микроскопические состояния ( 2 ч.).

Тепловое движение. Макроскопические параметры. Уравнение состояния. Внутренняя энергия. Уравнение состояния идеального газа. Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Средняя кинетическая энергия молекул. Молекулярно-кинетический смысл абсолютной температуры. Число степеней свободы. Закон распределения энергии по степеням свободы.

### 2.2. Статистические распределения (6 ч.).

Вероятность и флуктуация. Распределение Максвелла. Распределение частиц по абсолютным значениям скорости. Средняя кинетическая энергия частиц. Скорость теплового движения частиц. {Опыт Штерна.}

Распределение Больцмана. Барометрическая формула. Теплоёмкость многоатомных газов. Недостаточность классической теории теплоёмкости.

Классическая и квантовая статистики. Энтропия и статистический вес состояния. Принцип возрастания энтропии.

### 2.3. Основы термодинамики (4 ч.).

Обратимые и необратимые тепловые процессы. Внутренняя энергия. Работа газа при изменении объёма. Количество теплоты. Теплоёмкость. Первое начало термодинамики. Применение к изопроцессам.

Круговые процессы. Цикл Карно и его КПД. Тепловой двигатель и холодильная машина.

Приведённое количество теплоты. Энтропия в термодинамике. Обратимые и необратимые процессы. Второе начало термодинамики. Максимальный КПД тепловой машины. Термодинамические функции состояния. Фазовые равновесия и фазовые превращения. Элементы неравновесной термодинамики;

#### 2.4. Явления переноса (2 ч.).

Понятие о физической кинетике. Время релаксации. Эффективное сечение рассеяния. Число столкновений и длина свободного пробега молекул в газе. Явления переноса. Диффузия, теплопроводность, вязкость. Динамическая и кинематическая вязкость.

2.5. Реальные газы. (2 ч.) Учёт молекулярного взаимодействия. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Критическая точка. Сравнение теоретических и экспериментальных изотерм.

#### 2.6. Конденсированное состояние (2 ч.).

Жидкости. Поверхностное натяжение, формула Лапласа. Смачивание. Строение и свойства кристаллических и аморфных тел. Элементы кристаллографии. Влияние типа связи на структуру и свойства кристаллов. {Дефекты структуры.}

{Жидкие кристаллы. Типы жидких кристаллов.}

### **3-й семестр (36 час.):**

#### **3. Электричество и магнетизм (всего 26 ч.).**

##### 3.1. Электростатика (6 ч.).

Предмет классической электродинамики. Идея близкодействия. Электрический заряд и его свойства. Плотность заряда.

Закон Кулона. Напряжённость электрического поля. Принцип суперпозиции. Электрический диполь.

Работа электростатического поля. Циркуляция электростатического поля. Потенциал. Связь напряжённости с потенциалом.

Поток вектора. Теорема Гаусса. Густота силовых линий.

Проводник в электростатическом поле. Граничные условия на границе "проводник-вакуум".

Коэффициенты электростатической ёмкости и электростатической индукции. Ёмкость конденсаторов различной геометрической конфигурации.

{Энергия взаимодействия электрических зарядов.} Энергия системы заряженных проводников. Энергия конденсатора. Плотность энергии электростатического поля.

### 3.2. Постоянный электрический ток (2 ч.).

Сила и плотность тока. Условия существования тока. Закон Ома и Джоуля-Ленца в дифференциальной форме. Сторонние силы. ЭДС. Электрический ток в сплошной среде.

Электропроводность металлов. Носители тока. Электронный газ. Подвижность носителей. Недостаточность классической электронной теории.

### 3.3. Элементы физической электроники (2 ч.).

Электрический ток в вакууме. Термоэлектронная эмиссия. Виртуальный катод.

Электрический ток в газе. Процессы ионизации и рекомбинации. Понятие о плазме.

### 3.4. Магнитное поле (6 ч.).

Закон Био-Савара-Лапласа. Принцип суперпозиции. Магнитное поле кругового и прямолинейного тока. Понятие о циркуляции вектора  $\mathbf{B}$ . Закон полного тока для тока проводимости.

Сила Лоренца и сила Ампера. Вектор магнитной индукции. Единица силы тока - Ампер.

Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях. Виток с током в магнитном поле. Момент сил, действующий на рамку. {Потенциальная энергия витка с током во внешнем магнитном поле.}

Явление электромагнитной индукции. Правило Ленца. Самоиндукция. Индуктивность.

### 3.5. Статическое поле в веществе (6 ч.).

Понятие о дипольном моменте. Энергия диполя в электростатическом поле. Полярные и неполярные молекулы и диэлектрики. Поляризация диэлектриков. Поляризованность. Диэлектрическая восприимчивость диэлектрика.

Поляризационные заряды. Электрическое поле внутри диэлектрика. Диэлектрическая проницаемость диэлектрика. Вектор электрического смещения (индукции).

{Сегнетоэлектрики.}

Граничные условия для электростатического поля на границе "диэлектрик-диэлектрик" и "проводник-диэлектрик".

Понятие о магнитном моменте тока. Механический и магнитный момент атома. Процесс намагничивания магнетиков. Намагниченность. Магнитная восприимчивость.

Молекулярные токи. Магнитное поле в магнетиках. Напряженность магнитного поля. Магнитная проницаемость.

Граничные условия для магнитного поля на границе магнетиков. Применения (магнитные цепи).

Диамagnetики и парамагнетики. Объяснение намагничивания. Зависимость намагничивания от напряжённости внешнего поля. {Ферромагнетики. Домены. Кривая намагничивания. Явление насыщения. Основные свойства ферромагнетиков.}

### 3.6. Уравнения Максвелла (4 ч.).

Фарадеевская и Максвелловская трактовка явлений электромагнитной индукции. Вихревое электрическое поле. Ток смещения. Система уравнений Максвелла в интегральной форме.

Принцип относительности в электродинамике.

Скорость распространения электромагнитных возмущений. Волновое уравнение. Плотность энергии. Плотность потока энергии.

## **4. Колебания и волны (всего 12 ч.).**

### 4.1. Гармонический осциллятор (10 ч.).

Понятие о колебательных процессах. Единый подход к колебаниям различной физической природы. Виды колебаний.

Груз на пружине, физический маятник, крутильный маятник, колебательный контур. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний, его решение. Амплитуда, круговая частота, фаза.

Затухающие колебания. Коэффициент затухания, логарифмический декремент, добротность.

Резонанс. Резонансные кривые. Вынужденные колебания в электрических цепях.

### 4.2. Представление сложных колебаний (2 ч.).

Метод комплексных амплитуд. Комплексная форма представления колебаний. Векторные диаграммы. Сложение колебаний.

Фурье-разложение ангармонических колебаний. Физический смысл спектрального разложения.

## **4-й семестр (36 час):**

### 4.2. Волновые процессы (2 ч.).

Волны. Плоская и сферическая стационарные волны. Поляризация волн. Виды поляризации. Интерференция синусоидальных волн. Условия усиления и ослабления.

### 4.3. Интерферометрия (2 ч.).

Интерференция монохроматических волн. Квазимонохроматические волны. Когерентность. Основные интерференционные схемы. Интерферометры.

Временное и спектральное рассмотрение интерференционных явлений.

#### 4.4. Дифракция волн (4 ч.).

Принцип Гюйгенса-Френеля. Приближение Френеля. Интеграл в дифракции Френеля. Простые задачи дифракции (дифракция на круглом отверстии, дифракция на щели).

Дифракционная решётка. {Исследование кристаллических структур.} Зонная пластинка. Принцип голографии.

#### 4.5. Электромагнитные волны в веществе (2 ч.).

Распространение света в веществе. Дисперсия диэлектрической проницаемости. Поглощение света. Элементы кристаллооптики. Элементы нелинейной оптики: самофокусировка света, генерация оптических гармоник.

### **5. Квантовая физика (всего 24 ч.).**

Принцип суперпозиции; квантовые уравнения движения; операторы физических величин; энергетический спектр атомов и молекул; природа химической связи;

Противоречия классической физики. Проблемы изучения чёрного тела. Фотоэлектрический эффект, стабильность и размеры атома. Открытие постоянной Планка.

#### 5.1. Экспериментальное обоснование основных идей квантовой теории (4 ч.).

Световые кванты. Фотоэффект. Эффект Комптона. Правило частот Бора. Опыт Франка и Герца.

Гипотеза де Бройля. Дифракция электронов (опыт).

Микрочастица в двух-щелевом интерферометре. Соотношение неопределённостей. Граница применимости классической механики.

#### 5.2. Квантовое состояние (1 ч.).

Задание состояния микрочастиц: волновая функция, статистический смысл. Суперпозиция состояний. Объяснение поведения микрочастиц в интерферометре.

#### 5.3. Уравнение Шрёдингера (5 ч.).

Временное уравнение Шрёдингера. Стационарное уравнение Шрёдингера. Простейшие задачи квантовой механики: свободная частица, частица в одномерной прямоугольной "яме", туннельный эффект. Гармонический осциллятор.

Объяснение устойчивости атома, туннельного эффекта. Энергия нулевых колебаний осциллятора.

#### 5.4. Атом (4 ч.).

Частица в сферически симметричном поле. Водородоподобный атом. Энергетические уровни. Потенциалы возбуждения и ионизации. Спектры

водородоподобных атомов. Пространственное распределение электронов в атоме водорода.

Структура электронных уровней в сложных атомах. Типы связей электронов в атомах. Принцип Паули. {Периодическая система элементов Д.И. Менделеева.}

#### 5.5. Молекула (2 ч.).

Молекула водорода. Обменное взаимодействие. Физическая природа химической связи. Ионная и ковалентная связь. Электронные термы двухатомной молекулы. Колебательная и вращательная структура термов.

#### 5.6. Атомное ядро (2 ч.).

Строение атомных ядер. Феноменологические модели ядра: газовая, капельная, оболочечная.

Ядерная реакция. Порог реакции. Механизмы ядерных реакций. Радиоактивные превращения ядер. Реакция ядерного деления. {Ядерный реактор.}

Проблемы источников энергии. {Термоядерные реакции.} {Методы регистрации ядерных частиц.}

### 6. Современная физическая картина мира (2 ч.).

Вещество и поле. Атомно-молекулярное строение вещества. Кварки. Элементарные частицы: лептоны, адроны. Взаимопревращение частиц.

О единых теориях материи. Физическая картина мира как философская категория.

### 7. Физические основы ЭВМ (18 ч.).

#### **для специальности 01.05.01**

#### 7.1 Основы работы полупроводниковых приборов.(10 час)

Полупроводники. Собственная и примесная проводимость полупроводников. Энергия активации. Фотопроводимость. Современные полупроводники и их свойства.(2 час)

Физические процессы на границе двух полупроводников. Работа р-п перехода. Вентильный фотоэффект. Полупроводниковый диод. Применение диодов. Свето- и фотодиоды. Транзистор. Биполярный транзистор. Работа транзисторов р-п-р и п-р-п типов. Полевой транзистор, классификация полевых транзисторов. Принципы работы полевых транзисторов. (6 час)

Контактные явления. Явления на границе двух металлов: явление Зеебека, явление Пельтье, явление Томсона. Явления на границе полупроводник-металл. (2 час)

## 7.2 Основы цифровой техники. (8 час)

Понятие о цифровых сигналах. Цифровая электроника. Базовые логические элементы. Схемы. Принцип действия. Таблицы истинности. (2 час)

Элементы цифровых схем. Классификация. Назначение. Простейшие схемы и таблицы истинности. (2 час)

Понятие о современной микроэлектронике. Цифровые микросхемы. Основные понятия и характеристики. Принципы построения базовых элементов. МОП и КМОП технологии. (2 час.)

Нанотехнологии. Принципы создания микроминиатюрных устройств. (2 час.)

### Темы практических занятий.

**2 семестр (18 ч).** Механика и молекулярная физика.

1. Кинематика поступательного и вращательного движения (2 ч.).
2. Динамика поступательного и вращательного движения твёрдого тела и системы тел (4 ч.).
3. Законы сохранения (4 ч.).
4. Первое начало термодинамики в применении к идеальному газу (4 ч.).
5. II начало термодинамики. Цикл Карно. Расчёт энтропии (4 ч.).

№	Тема	Аудиторные занятия	Д/З
1.	Кинематика	1.2, 1.15, 1.30	1.8, 1.12, 1.30
2.	Динамика поступательного движения	2.5, 2.12, 2.32	2.6, 2.11, 2.35
3.	вращательного движения	1.44, 1.49, 1.55	1.46, 1.50, 1.57
4.	Закон сохранения импульса	2.56, 2.82, 2.89	2.81, 2.83, 2.87
5.	энергии	2.44, 2.121, 2.84	2.45, 2.122, 2.76
6.	момента импульса	3.41, 3.40, 3.44	3.43, 3.47, 3.42
7.	I начало термодинамики	5.174, 5.82, 5.90	5.175, 5.91, 5.88
8.	II начало термодинамики	5.195, 5.197, 5.200	5.196, 5.198, 5.206
9.		5.216, 5.218, 5.222	5.217, 5.224, 5.226

**6 семестр (18 ч.)** Электричество и магнетизм. Колебания.

1. Напряжённость и потенциал электрического поля. Принцип суперпозиции. Теорема Гаусса (6 ч.).
2. Постоянный ток. (2 ч.).
3. Основные законы магнитостатики. Расчёт магнитного поля (2 ч.).
4. Силы Ампера и Лоренца (2 ч.).

5. Явления электромагнитной индукции (2 ч.).

6. Колебания (4 ч.).

№	Тема	Аудиторные занятия	Д/З
1.	Напряженность Потенциал электр. поля	9.11, 9.2, 9 9.38, 9.49, 9.64	9.13, 9.3, 9 9.52, 9.38, 9.66
2.	Теорема Гаусса	9.20, 9.25, 9.33	9.21, 9.26, 9.32
3.	Постоянный ток	10.11, 10.19, 10.89	10.12, 10.21, 10.90
4.	Магнитное поле	11.3, 11.11, 11.19	11.7, 11.8, 11.22
5.	Сила Ампера и Лоренца	11.55, 11.61, 11.72	11.56, 11.71, 11.62
6.	Явление электромагнитной индукции	11.98, 11.95, 11.114	11.99, 11.96, 11.115
7.	Колебания	12.33, 12.35, 12.41	12.34, 12.36, 12.40

**7 семестр (18 ч.).** Оптика. Квантовая физика.

1. Интерференция света (2 ч.).

2. Дифракция света (2 ч.).

3. Поляризация света (2 ч.).

4. Квантовые свойства света (2 ч.).

5. Атом Резерфорда-Бора. Спектры (2 ч.).

6. Элементы квантовой механики (2 ч.).

7. Радиоактивность (2 ч.).

№	Тема	Аудиторные занятия	Д/З
1.	Интерференция	16.23, 16.21, 16.24	16.26, 16.22, 16.27
2.	Дифракция	16.28, 16.29, 16.34	16.31, 16.28, 16.33
3.	Поляризация	16.59, 16.61, 16.67	16.58, 16.60, 16.66
4.	Квантовые свойства света	19.13, 19.17, 19.20	19.14, 19.16, 19.18
5.	Тепловое излучение	18.21, 18.7, 18.12	18.19, 18.11, 18.17
6.	Атомная теория Бора	20.4, 20.3, 20.9	20.2, 20.10, 20.6
7.	Элементы квант. механики	19.30, 19.32, 19.38	19.33, 19.31, 19.40
8.	Ядерная физика	21.6, 21.10, 21.13	21.7, 21.4, 21.14

Итого по дисциплине: практических занятий 54 часа.

### **Темы лабораторных работ.**

**1 семестр (18 ч.)** Механика. Молекулярная физика.

1. Обработка результатов измерений (4 ч.).
2. Измерение линейных размеров и определение плотности твёрдых тел (2 ч.).
3. Проверка второго закона Ньютона на машине Атвуда (2 ч.).
4. Изучение законов сохранения при ударе шаров (2 ч.).
5. Изучение основного закона динамики вращательного движения на маятнике Обербека (2 ч.).
6. Изучение законов сохранения момента импульса и энергии при помощи крутильного маятника (2 ч.).
7. Определение момента импульса гироскопа (2 ч.).
8. Проверка закона сохранения энергии на маятнике Максвелла (2 ч.).
9. Определение момента инерции тел при помощи крутильного маятника (2 ч.).
10. Определение ускорения свободного падения при помощи оборотного маятника (2 ч.).
11. Определение коэффициента вязкости методом Стокса (2 ч.).
12. Определение показателя адиабаты (2 ч.).
13. Определение модуля Юнга методом Лермантова (2 ч.).
14. Прием лабораторных работ, зачетные занятия (до 8 ч.)

#### **6-й семестр (18 ч.) Электричество и магнетизм.**

1. Элементы электрических цепей и электроизмерительные приборы (2 ч.).
2. Изучение электронного осциллографа (2 ч.).
3. Определение удельного сопротивления металлического проводника (2 ч.).
4. Исследование электростатического поля (2 ч.).
5. Исследование КПД источника тока (2 ч.).
6. Проверка закона Ома для неоднородного участка цепи (2 ч.).
7. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли (2 ч.).
8. Определение удельного заряда электрона методом магнитной фокусировки электронных пучков (2 ч.).
9. Прием лабораторных работ, зачетное занятие (2 ч.)

#### **7-й семестр (18 ч.). Квантовая физика. Оптика.**

1. Определение показателя преломления прозрачной пластинки с помощью микроскопа (2 ч.).
2. Изучение закона Малюса (2 ч.).
3. Определение радиуса кривизны линзы по кольцам Ньютона (2 ч.).
4. Определение длины волны света при помощи дифракционной решётки (2 ч.).
5. Определение потенциала возбуждения атомов криптона (2 ч.).
6. Изучение серийных закономерностей в спектре водорода и определение постоянной Ридберга (2 ч.).

7. Определение линейного коэффициента ослабления гамма-излучения в свинце методом поглощения (2 ч.).
  8. Определение максимальной энергии бета-спектра по толщине слоя половинного ослабления (2 ч.).
  9. Прием лабораторных работ, зачетное занятие ( 2 ч.)
- Итого по дисциплине: лабораторных занятий 72 часа.

### **Самостоятельная работа студентов (56 час.)**

1. Подготовка и оформление лабораторного практикума – 10 час..
2. Подготовка к практическим занятиям – 12 час.
3. Выполнение домашних (типовых) заданий – 12 час.
4. Изучение теоретических вопросов (подготовка к семинарам, коллоквиумам, самостоятельное изучение отдельных разделов) – 22 час.

(ГОУ ВПО «АмГУ»)

"УТВЕРЖДАЮ"  
Проректор по Учебной работе  
\_\_\_\_\_ Е.С. Астапова  
"\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2007г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по предмету “Физика”  
для специальности 28.01.01 - безопасность жизнедеятельности  
в техносфере

курс I, II семестр 2, 3, 4  
Лекции 108 (час) Экзамен 2, 3, 4  
Практические (семинарские) занятия 54 (час) Зачет  
Лабораторные занятия 54 (час.)  
Самостоятельная работа 124 (час.)  
Всего часов 340

Составитель Ульянычева В.Ф.. канд. ф.-м.н

2007 г.

Рабочая программа составлена на основании Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования и авторских разработок по направлению специальности) \_\_\_\_\_

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 200\_ \_ протокол № \_\_\_

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ Е.А.Ванина

Рабочая программа одобрена на заседании УМС

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 200\_ \_ протокол № \_\_\_

Председатель УМС \_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ )

СОГЛАСОВАНО  
Начальник УМУ  
\_\_\_\_\_ Г.Н.Торопчина

СОГЛАСОВАНО  
Председатель УМС факультета  
\_\_\_\_\_ В.И.Митрофанова

СОГЛАСОВАНО  
Заведующий выпускающей кафедры  
\_\_\_\_\_ А.Б.Булгаков  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 200\_ \_ г.

**Цели и задачи дисциплины, её место в учебном процессе.**

Курс физики совместно с курсами высшей математики, теоретической механики составляет основу теоретической подготовки инженеров и играет роль фундаментальной физико-математической базы, без которой невозможна успешная деятельность инженера любого профиля. Курс физики представляет собой единое целое. Изучение целостного курса физики способствует формированию у студентов научного мировоззрения и современного физического мышления.

Инженер должен: иметь представление:

- о Вселенной в целом как физическом объекте и ее эволюции;
- о фундаментальном единстве естественных наук, незавершенности естествознания и возможности его дальнейшего развития;
- о дискретности и непрерывности в природе;
- о соотношении порядка и беспорядка в природе, упорядоченности строения объектов, переходах в неупорядоченное состояние и наоборот;
- о динамических и статистических закономерностях в природе;
- о вероятности как объективной характеристике природных систем;
- об измерениях и их специфичности в различных разделах естествознания;
- о фундаментальных константах естествознания;
- о принципах симметрии и законах сохранения;
- о соотношениях эмпирического и теоретического в познании;
- о состояниях в природе и их изменениях со временем;
- об индивидуальном и коллективном поведении объектов в природе;
- о времени в естествознании;

Задачи, которые ставятся при изучении физики в Вузах, многообразны. Важнейшие задачи:

- изучение основных физических явлений;
- овладение фундаментальными понятиями, законами и теоремами классической и современной физики, а также методами физического исследования.
- овладение приёмами и методами решения конкретных задач из различных областей физики.
- ознакомление с современной научной аппаратурой, формирование навыков проведения физического эксперимента,
- умение выделить конкретное физическое содержание в прикладных задачах будущей специальности.

**Перечень дисциплин с указанием разделов (тем), усвоение которых студентам необходимо для изучения дисциплины "Физика".**

1. Курс физики средней школы.
2. Математическая подготовка:
  - 1-й семестр:
    - векторная алгебра;
    - дифференциальное и интегральное исчисление;
    - теория вероятностей;
    - решение дифференциальных уравнений.
  - 2-й семестр:
    - элементы теории поля: поток, циркуляция, теоремы Остроградского и Стокса;
    - комплексные числа;
    - дифференциальные уравнения;
    - понятие о рядах Фурье;
    - волновое уравнение.
  - 3-й семестр:
    - интеграл Фурье.

## **Содержание дисциплины "Физика".**

### **Содержание стандарта**

Физические основы механики: понятие состояния в классической механике, уравнения движения, законы сохранения, основы релятивистской механики, принцип относительности в механике, кинематика и динамика твердого тела, жидкостей и газов.

Электричество и магнетизм: электростатика и магнитостатика в вакууме и веществе, уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной форме, материальные уравнения, квазистационарные токи, принцип относительности в электродинамике; физика колебаний и волн: гармонический и ангармонический осциллятор, физический смысл спектрального разложения, кинетика волновых процессов, нормальные волны, интерференция и дифракция волн, элементы Фурье оптики.

Молекулярная физика и термодинамика: молекулярно-кинетическая теория газов, основы термодинамики, реальные газы.

Квантовая физика: корпускулярно-волновой дуализм, принцип неопределенности, квантовые состояния, принцип суперпозиции, квантовые уравнения движения, операторы физических величин, энергетический спектр атомов и молекул, природа химической связи.

Статистическая физика и термодинамика: три начала термодинамики, фазовые равновесия и фазовые превращения, элементы неравновесной термодинамики, классическая и квантовая статистики, кинетические явления, системы заряженных частиц, конденсированное состояние.

Ядерная физика: основные характеристики ядра, протоново-нейтронная структура ядра, прохождение тяжелых частиц, бета-излучения и гамма-излучения через вещество, общая характеристика радиоактивности, ядерные

реакции, нейтроны, искусственная радиоактивность, деление ядер, цепная ядерная реакция, управление реакцией деления, понятие о ядерной энергетике, термоядерные реакции.

### **Лекционный курс (108 час)**

Наименование тем, их содержание, объём в часах лекционных занятий.  
(Темы в фигурных скобках рекомендуются для самостоятельного изучения)

#### **2 семестр (36 час.):**

Введение (1 ч.)

Предмет физики. Метод физического исследования: опыт, гипотеза, эксперимент, теория. Математика и физика. Роль физики в развитии техники. Физика и инженерные науки. Физические модели и ЭВМ. Общая структура и задачи курса физики. Размерность физических величин. Основные единицы СИ. Предлагаемая литература.

#### **1. Физические основы механики (всего 17 ч.).**

Предмет механики. Кинематика и динамика. Классическая механика. Квантовая механика. Релятивистская механика.

1.1. Элементы кинематики ( 2 ч.). Физические модели: материальная точка (частица), система материальных точек, абсолютно твёрдое тело, сплошная среда. Пространство и время.

Кинематическое описание движения. Скорость и ускорение при прямолинейном и криволинейном движении. Нормальное и тангенциальное ускорение.

Степени свободы и обобщенные координаты. Движение точки по окружности. Угловая скорость и угловое ускорение. Вектор угловой скорости и углового ускорения.

#### 1.2. Динамика частиц (3 ч.).

Основная задача динамики. Понятие состояния в классической механике. Уравнение движения. Масса и импульс. Эталон массы в СИ. Границы применимости классического способа описания движения частиц.

Современная трактовка законов Ньютона. Первый закон Ньютона и понятие инерциальной системы отсчёта. Второй закон Ньютона как уравнение движения. Дифференциальная форма записи второго закона Ньютона. Виды сил в механике.

Третий закон Ньютона.

#### 1.3. Система материальных точек (4 ч.).

Внутренние и внешние силы. Центр масс (центр инерции). Импульс системы материальных точек. Закон сохранения импульса как фундаментальный закон природы.

Аддитивность массы и закон сохранения центра инерции. Теорема о движении центра инерции (Основное уравнение динамики системы материальных точек). Система центра инерции.

Момент импульса. Закон сохранения момента импульса. Момент силы.

Твёрдое тело в механике. Момент импульса вращающегося тела. Момент инерции твёрдого тела. Основное уравнение динамики вращающегося тела.

#### 1.4. Закон сохранения энергии (2 ч.).

Работа и кинетическая энергия. Работа переменной силы. Мощность. Кинетическая энергия в различных системах отсчёта. Энергия движения тела как целого. Внутренняя энергия.

Консервативные и неконсервативные силы. Потенциальная энергия. Связь между консервативной силой и потенциальной энергией. Закон сохранения энергии в механике. Общефизический закон сохранения энергии.

#### 1.5. Элементы механики сплошных сред (2 ч.).

Общие свойства жидкостей и газов. Идеальная и вязкая жидкости. Уравнения равновесия и движения жидкости. Гидростатика несжимаемой жидкости. Стационарное течение. Линии и трубка тока. Уравнение неразрывности. Стационарное движение идеальной жидкости. Уравнение Бернулли. Вязкая жидкость. {Формула Пуазейля}.

#### 1.6 Принцип относительности в механике (4 ч.).

Принцип относительности Галилея. Преобразования Галилея. Основные положения специальной теории относительности. Инварианты преобразования. Преобразования Лоренца. Следствия из преобразований Лоренца:

относительность длин и промежутков времени. Релятивистский закон сложения скоростей.

Элементы релятивистской динамики. Релятивистская масса, импульс и энергия. Уравнение движения релятивистской частицы.

### **2. Молекулярная физика и термодинамика (всего 18 ч.).**

Три начала термодинамики. Динамические и статистические закономерности в физике. Статистический и термодинамический методы.

#### 2.1. Микроскопические состояния (2 ч.).

Тепловое движение. Макроскопические параметры. Уравнение состояния. Внутренняя энергия. Уравнение состояния идеального газа. Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Средняя кинетическая энергия молекул. Молекулярно-кинетический смысл

абсолютной температуры. Число степеней свободы. Закон распределения энергии по степеням свободы.

### 2.2. Статистические распределения (6 ч.).

Вероятность и флуктуация. Распределение Максвелла. Распределение частиц по абсолютным значениям скорости. Средняя кинетическая энергия частиц. Скорость теплового движения частиц. {Опыт Штерна.}

Распределение Больцмана. Барометрическая формула. Теплоёмкость многоатомных газов. Недостаточность классической теории теплоёмкости.

Классическая и квантовые статистики. Энтропия и статистический вес состояния. Принцип возрастания энтропии.

### 2.3. Основы термодинамики (4 ч.).

Обратимые и необратимые тепловые процессы. Внутренняя энергия. Работа газа при изменении объёма. Количество теплоты. Теплоёмкость. Первое начало термодинамики. Применение к изопроцессам.

Круговые процессы. Цикл Карно и его КПД. Тепловой двигатель и холодильная машина.

Приведённое количество теплоты. Энтропия в термодинамике. Обратимые и необратимые процессы. Второе начало термодинамики. Максимальный КПД тепловой машины. Термодинамические функции состояния. Фазовые равновесия и фазовые превращения. Элементы неравновесной термодинамики;

### 2.4. Явления переноса (2 ч.).

Понятие о физической кинетике. Время релаксации. Эффективное сечение рассеяния. Число столкновений и длина свободного пробега молекул в газе. Явления переноса. Диффузия, теплопроводность, вязкость. Динамическая и кинематическая вязкость.

### 2.5. Реальные газы. (2 ч.)

Учёт молекулярного взаимодействия. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Критическая точка. Сравнение теоретических и экспериментальных изотерм.

### 2.6. Конденсированное состояние (2 ч.).

Жидкости. Поверхностное натяжение, формула Лапласа. Смачивание. Строение и свойства кристаллических и аморфных тел. Элементы кристаллографии. Влияние типа связи на структуру и свойства кристаллов. {Дефекты структуры.}

{Жидкие кристаллы. Типы жидких кристаллов.}

**3-й семестр (36 час.):**

### **3. Электричество и магнетизм (всего 26 ч.).**

Уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной форме; материальные уравнения; квазистационарные токи;

Предмет классической электродинамики. Идея близкодействия. Электрический заряд и его свойства. Плотность заряда.

#### 3.1. Электростатика (6 ч.).

Закон Кулона. Напряжённость электрического поля. Принцип суперпозиции. Электрический диполь.

Работа электростатического поля. Циркуляция электростатического поля. Потенциал. Связь напряжённости с потенциалом.

Поток вектора. Теорема Гаусса. Густота силовых линий.

Проводник в электростатическом поле. Граничные условия на границе "проводник-вакуум".

Коэффициенты электростатической ёмкости и электростатической индукции. Ёмкость конденсаторов различной геометрической конфигурации.

Энергия взаимодействия электрических зарядов. Энергия системы заряженных проводников. Энергия конденсатора. Плотность энергии электростатического поля.

#### 3.2. Постоянный электрический ток (2 ч.).

Сила и плотность тока. Условия существования тока. Закон Ома и Джоуля-Ленца в дифференциальной форме. Сторонние силы. ЭДС. Электрический ток в сплошной среде.

Электропроводность металлов. Носители тока. Электронный газ. Подвижность носителей. Недостаточность классической электронной теории.

#### 3.3. Элементы физической электроники (2 ч.).

Электрический ток в вакууме. Термоэлектронная эмиссия. Виртуальный катод.

Электрический ток в газе. Процессы ионизации и рекомбинации. Понятие о плазме.

#### 3.4. Магнитное поле (6 ч.).

Закон Био-Савара-Лапласа. Принцип суперпозиции. Магнитное поле кругового и прямолинейного тока. Понятие о циркуляции вектора магнитной индукции. Закон полного тока для тока проводимости.

Сила Лоренца и сила Ампера. Вектор магнитной индукции. Единица силы тока - Ампер.

Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях. Виток с током в магнитном поле. Момент сил, действующий на рамку. Потенциальная энергия витка с током во внешнем магнитном поле.

Явление электромагнитной индукции. Правило Ленца. Самоиндукция. Индуктивность.

### 3.5. Статическое поле в веществе (6 ч.).

Понятие о дипольном моменте. Энергия диполя в электростатическом поле. Полярные и неполярные молекулы и диэлектрики. Поляризация диэлектриков. Поляризованность. Диэлектрическая восприимчивость диэлектрика.

Поляризационные заряды. Электрическое поле внутри диэлектрика. Диэлектрическая проницаемость диэлектрика. Вектор электрического смещения (индукции). { Сегнетоэлектрики }.

Граничные условия для электростатического поля на границе "диэлектрик-диэлектрик" и "проводник-диэлектрик".

Понятие о магнитном моменте тока. Механический и магнитный момент атома. Процесс намагничивания магнетиков. Намагниченность. Магнитная восприимчивость.

Молекулярные токи. Магнитное поле в магнетиках. Напряженность магнитного поля. Магнитная проницаемость.

Граничные условия для магнитного поля на границе магнетиков.

Диамагнетики и парамагнетики. Объяснение намагничивания. Зависимость намагничивания от напряжённости внешнего поля. Ферромагнетики. Домены. Кривая намагничивания. Явление насыщения. Основные свойства ферромагнетиков.

### 3.6. Уравнения Максвелла (4 ч.).

Трактовка явлений электромагнитной индукции Фарадеем и Максвеллом. Вихревое электрическое поле. Ток смещения. Система уравнений Максвелла в интегральной форме. Уравнения Максвелла в дифференциальной форме.

Принцип относительности в электродинамике.

Скорость распространения электромагнитных возмущений. Волновое уравнение. Плотность энергии. Плотность потока энергии.

## **4. Колебания и волны (всего 20 ч.).**

Нормальные моды; элементы Фурье-оптики; понятие о колебательных процессах. Единый подход к колебаниям различной физической природы. Виды колебаний.

### 4.1. Гармонический осциллятор (10 ч.).

Груз на пружине, физический маятник, крутильный маятник, колебательный контур. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний, его решение. Амплитуда, круговая частота, фаза.

Затухающие колебания. Коэффициент затухания, логарифмический декремент, добротность.

Резонанс. Резонансные кривые. Вынужденные колебания в электрических цепях.

Метод комплексных амплитуд. Комплексная форма представления колебаний. Векторные диаграммы. Сложение колебаний.

Фурье-разложение ангармонических колебаний. Физический смысл спектрального разложения.

#### **4-й семестр (36 час):**

##### 4.2. Волновые процессы (2 ч.).

Волны. Плоская и сферическая стационарные волны. Интерференция синусоидальных волн. Условия усиления и ослабления. Электромагнитные волны. Волновое уравнение. Уравнение электромагнитной волны.

##### 4.3. Интерферометрия (2 ч.).

Интерференция монохроматических волн. Квазимонохроматические волны. Когерентность. Основные интерференционные схемы. Интерферометры.

Временное и спектральное рассмотрение интерференционных явлений.

##### 4.4. Дифракция волн (4 ч.).

Принцип Гюйгенса-Френеля. Приближение Френеля. Интеграл в дифракции Френеля. Простые задачи дифракции: дифракция на круглом отверстии, дифракция на щели. {Дифракция на круглом диске, от края полуплоскости}.

Дифракционная решётка. Исследование кристаллических структур. Зонная пластинка. Принцип голографии.

##### 4.5. Поляризация волн (2 ч.).

Явление поляризации световых волн. Виды поляризации. Способы получения поляризованных волн. Закон Малюса.

##### 4.6. Электромагнитные волны в веществе (4 ч.).

Распространение света в веществе. Дисперсия диэлектрической проницаемости. Поглощение света. Элементы кристаллооптики. Вынужденное излучение. Лазеры. Элементы нелинейной оптики: самофокусировка света, генерация оптических гармоник.

#### **5. Квантовая физика (всего 20 ч.).**

Принцип суперпозиции; квантовые уравнения движения; операторы физических величин; энергетический спектр атомов и молекул; природа химической связи;

Противоречия классической физики. Проблемы изучения чёрного тела. Фотоэлектрический эффект, стабильность и размеры атома. Открытие постоянной Планка.

### 5.1. Экспериментальное обоснование основных идей квантовой теории (4 ч.).

Световые кванты. Фотоэффект. Эффект Комптона. Правило частот Бора. Опыт Франка и Герца.

Гипотеза де Бройля. Дифракция электронов (опыт).

Микрочастица в двухщелевом интерферометре. Соотношение неопределённостей Гейзенберга. Граница применимости классической механики.

### 5.2. Квантовое состояние (1 ч.).

Задание состояния микрочастиц: волновая функция и её статистический смысл. Суперпозиция состояний. Объяснение поведения микрочастиц в интерферометре.

### 5.3. Уравнение Шрёдингера (5 ч.).

Временное уравнение Шрёдингера. Стационарное уравнение Шрёдингера. Простейшие задачи квантовой механики: свободная частица, частица в одномерной прямоугольной "яме", туннельный эффект. Гармонический осциллятор.

Объяснение устойчивости атома, туннельного эффекта. Энергия нулевых колебаний осциллятора.

### 5.4. Атом (4 ч.).

Частица в сферически симметричном поле. Водородоподобный атом. Энергетические уровни. Потенциалы возбуждения и ионизации. Спектры водородоподобных атомов. Пространственное распределение электронов в атоме водорода.

Структура электронных уровней в сложных атомах. Типы связей электронов в атомах. Принцип Паули. Периодическая система элементов Д.И. Менделеева.

### 5.5. Молекула (2 ч.).

Молекула водорода. Обменное взаимодействие. Физическая природа химической связи. Ионная и ковалентная связь. Электронные термы двухатомной молекулы. Колебательная и вращательная структура термов.

### 5.6. Атомное ядро (4ч.).

Строение атомных ядер. Феноменологические модели ядра: газовая, капельная, оболочечная.

Радиоактивность. Основной закон радиоактивного распада. Альфа-излучение. Бета-излучение. Гамма-излучение. Взаимодействие излучения с веществом.

Ядерная реакция. Порог реакции. Механизмы ядерных реакций. Радиоактивные превращения ядер. Реакция ядерного деления. Ядерный реактор.

Проблемы источников энергии. Термоядерные реакции. Методы регистрации ядерных частиц.

#### 6. Современная физическая картина мира (2 ч.).

Вещество и поле. Атомно-молекулярное строение вещества. Кварки. Элементарные частицы: лептоны, адроны. Взаимопревращение частиц.

О единых теориях материи. Физическая картина мира как философская категория.

### **Темы практических занятий.**

**2 семестр (18 ч).** Механика и молекулярная физика.

1. Кинематика поступательного и вращательного движения (2 ч.).
2. Динамика поступательного и вращательного движения твёрдого тела и системы тел (4 ч.).
3. Законы сохранения (6 ч.).
4. Первое начало термодинамики и его применение к идеальному газу (2 ч.).
5. 2 начало термодинамики. Цикл Карно. Расчёт энтропии (4 ч.).

№	Тема	Аудиторные занятия	Д/З
1.	Кинематика	1.2, 1.15, 1.30	1.8, 1.12, 1.30
2.	Динамика поступательного движения	2.5, 2.12, 2.32	2.6, 2.11, 2.35
3.	вращательного движения	1.44, 1.49, 1.55	1.46, 1.50, 1.57
4.	Закон сохранения импульса	2.56, 2.82, 2.89	2.81, 2.83, 2.87
5.	энергии	2.44, 2.121, 2.84	2.45, 2.122, 2.76
6.	момента импульса	3.41, 3.40, 3.44	3.43, 3.47, 3.42
7.	I начало термодинамики	5.174, 5.82, 5.90	5.175, 5.91, 5.88
8.	II начало термодинамики	5.195, 5.197, 5.200	5.196, 5.198, 5.206
		5.216, 5.218, 5.222	5.217, 5.224, 5.226

### 3 семестр (18 ч.) Электричество и магнетизм. Колебания.

1. Напряжённость и потенциал электрического поля. Принцип суперпозиции. Теорема Гаусса (4 ч.).
2. Постоянный ток. (4 ч.).
3. Основные законы магнитостатики. Расчёт магнитного поля (2 ч.).
4. Силы Ампера и Лоренца (2 ч.).
5. Явления электромагнитной индукции (2 ч.).
6. Колебания (4 ч.).

№	Тема	Аудиторные занятия	Д/З
1.	Напряженность Потенциал электр. поля	9.11, 9.2, 9 9.38, 9.49, 9.64	9.13, 9.3, 9 9.52, 9.38, 9.66
2.	Теорема Гаусса	9.20, 9.25, 9.33	9.21, 9.26, 9.32
3.	Постоянный ток	10.11, 10.19, 10.89	10.12, 10.21, 10.90
4.	Магнитное поле	11.3, 11.11, 11.19	11.7, 11.8, 11.22
5.	Сила Ампера и Лоренца	11.55, 11.61, 11.72	11.56, 11.71, 11.62
6.	Явление электромагнитной индукции	11.98, 11.95, 11.114	11.99, 11.96, 11.115
7.	Колебания	12.33, 12.35, 12.41	12.34, 12.36, 12.40

### 4 семестр (18 ч.). Оптика. Квантовая физика.

1. Интерференция света (2 ч.).
2. Дифракция света (2 ч.).
3. Поляризация света (2 ч.).
4. Квантовые свойства света (2 ч.).
5. Атом Резерфорда-Бора. Спектры (2 ч.).
6. Элементы квантовой механики (2 ч.).
7. Радиоактивность (2 ч.).

№	Тема	Аудиторные занятия	Д/З
1.	Интерференция	16.23, 16.21, 16.24	16.26, 16.22, 16.27
2.	Дифракция	16.28, 16.29, 16.34	16.31, 16.28, 16.33
3.	Поляризация	16.59, 16.61, 16.67	16.58, 16.60, 16.66
4.	Квантовые свойства света	19.13, 19.17, 19.20	19.14, 19.16, 19.18
5.	Тепловое излучение	18.21, 18.7, 18.12	18.19, 18.11, 18.17
6.	Атомная теория Бора	20.4, 20.3, 20.9	20.2, 20.10, 20.6
7.	Элементы квант. механики	19.30, 19.32, 19.38	19.33, 19.31, 19.40
8.	Ядерная физика	21.6, 21.10, 21.13	21.7, 21.4, 21.14

Итого по дисциплине: практических занятий 54 часа.

## Темы лабораторных работ.

### 2 семестр (18 ч.) Механика. Молекулярная физика.

1. Обработка результатов измерений (4 ч.).
2. Измерение линейных размеров и определение плотности твёрдых тел (2 ч.).
3. Проверка второго закона Ньютона на машине Атвуда (2 ч.).
4. Изучение законов сохранения при ударе шаров (2 ч.).
5. Изучение основного закона динамики вращательного движения на маятнике Обербека (2 ч.).
6. Изучение законов сохранения момента импульса и энергии при помощи крутильного маятника (2 ч.).
7. Определение момента импульса гироскопа (2 ч.).
8. Проверка закона сохранения энергии на маятнике Максвелла (2 ч.).
9. Определение момента инерции тел при помощи крутильного маятника (2 ч.).
10. Определение ускорения свободного падения при помощи оборотного маятника (2 ч.).
11. Определение коэффициента вязкости методом Стокса (2 ч.).
12. Определение показателя адиабаты (2 ч.).
13. Определение модуля Юнга методом Лермантова (2 ч.).
14. Прием лабораторных работ, зачетные занятия (до 8 ч.)

### 3-й семестр (18 ч.) Электричество и магнетизм.

1. Элементы электрических цепей и электроизмерительные приборы (2 ч.).
2. Изучение электронного осциллографа (2 ч.).
3. Определение удельного сопротивления металлического проводника (2 ч.).
4. Исследование электростатического поля (2 ч.).
5. Исследование КПД источника тока (2 ч.).
6. Проверка закона Ома для неоднородного участка цепи (2 ч.).
7. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли (2 ч.).
8. Определение удельного заряда электрона методом магнитной фокусировки электронных пучков (2 ч.).
9. Прием лабораторных работ, зачетное занятие (2 ч.)

### 4-й семестр (18 ч.). Квантовая физика. Оптика.

1. Определение показателя преломления прозрачной пластинки с помощью микроскопа (2 ч.).
2. Изучение закона Малюса (2 ч.). 3. Определение радиуса кривизны линзы по кольцам Ньютона (2 ч.).

3. Определение длины волны света при помощи дифракционной решётки (2 ч.).
4. Определение потенциала возбуждения атомов криптона (2 ч.).
5. Изучение сериальных закономерностей в спектре водорода и определение постоянной Ридберга (2 ч.).
6. Определение линейного коэффициента ослабления гамма-излучения в свинце методом поглощения (2 ч.).
7. Определение максимальной энергии бета-спектра по толщине слоя половинного ослабления (2 ч.).
8. Прием лабораторных работ, зачетное занятие (2 ч.)

Итого по дисциплине: лабораторных занятий 54 час.

### **Самостоятельная работа студентов (124 час.)**

1. Подготовка и оформление лабораторного практикума:  
В каждом семестре по 18 часов.  
Всего: 54 часа.
  2. Подготовка к семинарским занятиям:  
2-й семестр – 18 часов, 3-й – 14 часов, 4-й – 16 часов,  
Всего: 48 часов.
  3. Выполнение домашних (типовых) заданий: 48 часов.
  4. Изучение теоретических вопросов:  
подготовка к коллоквиумам: 14 часов,  
самостоятельное изучение отдельных разделов: 8 часов.  
Всего: 22 часа.
- По всем разделам: 124 часа.

Федеральное агентство по образования Российской Федерации  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(ГОУ ВПО «АмГУ»)

"УТВЕРЖДАЮ"  
Проректор по Учебной работе  
\_\_\_\_\_ Е.С. Астапова

" \_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2007г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по дисциплине "Физика" для специальностей:

260704 "Технология текстильных изделий".

260901 "Технология швейных изделий"

260902 "Конструирование швейных изделий"

Курсы I, II

Семестры 2,3,4.

Лекции 104 час.

Экзамен 2,3 (семестр)

Практические занятия - 52 час. (спец. 260704, 260901)  
69 час. (спец. 260704)

Зачет 4 (семестр)

Лабораторные работы - 52 час.

Самостоятельная работа - 192 ч. (спец. 260704, 260901)  
225 ч. (спец. 260704)

Всего часов - 400 (спец. 260704, 260901)  
450 (спец. 260704)

Составитель Ульянычева В.Ф. доцент, кандидат физ.-мат. наук.

2006 г.

Рабочая программа составлена на основании Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению (специальности) 260704, 260704, 260901.

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры  
" \_\_\_ " \_\_\_\_\_ " 200\_\_ г. протокол N \_\_\_

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_

Рабочая программа одобрена на заседании учебно-методического совета специальностей 260704, 260704, 260901.

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ “ 2006 г. протокол N \_\_\_\_\_

Председатель УМС \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_.)

СОГЛАСОВАНО

СОГЛАСОВАНО

Председатель УМС факультета  
\_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_)

Начальник УМУ  
\_\_\_\_\_ (Торопчина Г.Н.)

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2006 г.

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2006 г.

СОГЛАСОВАНО

Зав. кафедрой конструирования и технологии одежды

\_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_)

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2006 г.

### **ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ.**

- Изучение основных физических явлений, овладение фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики, а также методами физического исследования.

- Формирование научного мировоззрения и современного физического мышления, умение выделять конкретное физическое содержание в прикладных задачах специальности.

- Овладение приемами и методами решения конкретных задач из различных областей физики.
- Ознакомление с различной научной аппаратурой, формирования навыков проведения физического эксперимента.

### ОСНОВНЫЕ ЗНАНИЯ И УМЕНИЯ, ПРИОБРЕТЕННЫЕ СТУДЕНТАМИ.

- Предмет физики. Основные явления и законы физики /в рамках программы/. Определение основных понятий и величин. Примеры.
- Принципы работы важнейших физических приборов.
- Общие представления о структуре и взаимосвязи основных теорий и законов. Общие представления о физической структуре мира.
- Использовать основные законы физики для решения типовых задач: выделять конкретное физическое содержание, обосновать применимость законов.
- При проведении эксперимента обосновать методику измерений: указать связи между искомыми и непосредственно измеряемыми величинами. Пользоваться основными измерительными приборами.
- Оценить погрешность.

### СТАНДАРТ ПО ПРЕДМЕТУ СПЕЦИАЛЬНОСТИ 28.03

Физические основы механики (понятие состояния в классической механике, уравнения движения, законы сохранения, основы релятивистской механики, принцип относительности в механике, кинематика и динамика твердого тела, жидкостей и газов); электричество и магнетизм (электростатика и магнитостатика в вакууме и веществе, уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной форме, материальные уравнения, квазистационарные токи, принцип относительности в электродинамике); физика колебаний и волн (гармонический и ангармонический осциллятор? физический смысл спектрального разложения, кинематика волновых процессов, нормальные моды, интерференция и дифракция волн, элементы Фурье-оптика); квантовая физика (корпускулярно-волновой дуализм, принцип неопределенности, квантовые состояния, принцип суперпозиции, квантовые уравнения движения, операторы физических величин, энергетический спектр атомов и молекул, природа химической связи); статистическая физика и термодинамика ( три начала термодинамики? термодинамические функции состояния, фазовые равновесия и фазовые превращения, элементы неравновесной термодинамики, классическая и квантовая статистики, кинетические явления, системы заряженных частиц, конденсированное состояние), физический практикум.

### СТАНДАРТ ПО ПРЕДМЕТУ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ 28.08, 28.09

Физические основы механики; колебания и волны; молекулярная физика и термодинамика; электричество и магнетизм; оптика; атомная и ядерная физика; физический практикум.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ "ФИЗИКА"

Наименование тем, их содержание, объем в часах лекционных занятий.

### 2-й семестр - 36 час.

Введение (1 час.)

Предмет физики. Метод физического исследования: опыт, гипотеза, эксперимент, теория. Математика и физика. Диалектический материализм и физика. Роль физики в развитии техники. Физика и инженерные науки. Физические модели и ЭВМ.

Общая структура и задачи курса физики. Размерность физических величин. Основные единицы СИ.

### 1. Физические основы механики.(19 час.)

Предмет механики. Кинематика и динамика. Классическая механика. Квантовая механика. Релятивистская механика.

#### 1.1. Элементы кинематики. /2 час./

Физические модели: материальная точка, система материальных точек, абсолютно твердое тело, сплошная среда.

Пространство и время. Кинематическое описание движения. Уравнения движения. Элементы векторной алгебры. Скорость и ускорение при криволинейном движении. Нормальное и касательное ускорение. Движение точки по окружности. Угловая скорость и угловое ускорение.

О смысле производной и интеграла в физике. Степени свободы и обобщенные координаты. Число степеней свободы абсолютно твердого тела.

Кинематическое описание движения жидкости.

#### 1.2. Динамика частиц. /3 час./

Основные задачи динамики. Понятие состояния в классической механике. Уравнение движения. Масса и импульс. Эталон массы в СИ. Границы применимости классической механики.

Современная трактовка законов Ньютона. Первый закон Ньютона и понятие инерциальной системы отсчета. Второй закон Ньютона как уравнение движения. Сила как производная импульса. Виды сил в механике. Примеры решения основной задачи динамики: тело в поле тяжести. Третий закон Ньютона.

#### 1.3. Система материальных точек. /2 час./

Внутренние и внешние силы. Центр масс (центр инерции). Им

пульс системы материальных точек. Закон сохранения импульса как фундаментальный закон природы. Аддитивность массы и закон сохранения центра инерции. Теорема о движении центра инерции. Основное уравнение динамики системы материальных точек.

#### 1.4. Кинематика и динамика твердого тела. /2 час./

Момент силы. Момент импульса. Момент инерции твердого тела. Закон сохранения момента импульса.

Твердое тело в механике. Уравнение динамики и равновесия твердого тела.

#### 1.5. Закон сохранения энергии. /4 час./

Работа и кинетическая энергия. Работа переменной силы. Примеры. Мощность. Кинетическая энергия в различных системах отсчета. Энергия движения тела как целого. Внутренняя энергия.

Консервативные и неконсервативные силы. Потенциальная энергия. Связь между консервативной силой и потенциальной энергией. Закон сохранения энергии в механике. Общефизический закон сохранения энергии.

#### 1.6. Принцип относительности в механике. /2 час./

Принцип относительности в механике Галилея. Преобразования Галилея. Инварианты преобразования.

Постулаты специальной теории относительности. Преобразования Лоренца. Следствия из преобразований Лоренца: относительность длин и промежутков времени. Закон сложения скоростей.

#### 1.7. Элементы релятивистской динамики /2 час/

Релятивистская масса, импульс, энергия. Уравнение движения релятивистской частицы.

#### 1.8. Элементы механики сплошных сред /2 час./

Общие свойства жидкостей и газов. Уравнение равновесия и движения жидкости. Идеальная и вязкая жидкости. Гидростатика несжимаемой жидкости. Стационарное движение идеальной жидкости. Уравнение Бернулли. Вязкая жидкость.

Упругие напряжения в упруго- деформированном теле. Закон Гука. Растяжение и сжатие стержней.

### **2. Молекулярная физика / 16 час./**

Динамические и статистические закономерности в физике. Статистический и термодинамический методы.

#### 2.1. Макроскопические состояния /2час./

Тепловое движение. Макроскопические параметры. Уравнение состояния. Внутренняя энергия. Интенсивные и экстенсивные параметры.

Уравнение состояния идеального газа. Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Молекулярно - кинетический смысл температуры. Число степеней свободы. Закон распределения энергии по степеням свободы.

### 2.2. Статистические распределения. /4 час./

Вероятность и флуктуация. Распределение Максвелла. Распределение частиц по абсолютным значениям скорости. Средняя кинетическая энергия частицы. Скорость теплового движения частиц. Опыт Штерна.

Распределение Больцмана. Барометрическая формула. Теплоемкость многоатомных газов. Недостаточность классической теории теплоемкости.

Энтропия и статистический вес состояния. Принцип возрастания энтропии.

### 2.3. Основы термодинамики. /4 час./

Внутренняя энергия. Работа газа при изменении объема. Количество теплоты. Теплоемкость. Первое начало термодинамики. Применение к изопроцессам. Обратимые и необратимые процессы. Круговые процессы. Цикл Карно и его КПД. Тепловой двигатель и холодильная машина.

Второе начало термодинамики. Третье начало термодинамики. Термодинамические функции состояния. Фазовые равновесия и фазовые состояния. Энтропия. Термодинамические функции состояния. Цикл Карно. Максимальный к.п.д. тепловой машины. Третье начало термодинамики.

### 2.4. Элементы неравновесной термодинамики. Явления переноса. /2 час./

Понятия о физической кинетике. Время релаксации. Эффективное сечение рассеяния. Длина свободного пробега и число столкновений молекул газа. Явление переноса. Диффузия, теплопроводность, вязкость. Динамическая и кинетическая вязкости. Теплопроводность текстильных материалов.

### 2.5. Реальные газы. /2 час./

Взаимодействие молекул. Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса, изотермы Ван-дер-Ваальса. Критическая точка. Фазовые равновесия и фазовые превращения.

### 2.6. Конденсированное состояние. /2 час./

Жидкости. Поверхностное натяжение. Смачивание. Строение и свойства кристаллических и аморфных тел. Элементы кристаллографии. Точечные дефекты в кристаллах: вакансии, примеси внедрения, примеси замещения. Краевые и винтовые дислокации. Дислокации и пластичность.

Жидкие кристаллы. Типы жидких кристаллов: нематики, холестерики, смектики. Применение жидких кристаллов.

### 3 семестр. - 36 час

#### 3. Электричество и магнетизм.

Предмет классической электродинамики. Идея близкодействия. электрический заряд и его свойства. Плотность заряда.

Скалярное и векторное поле. Поток, циркуляция, градиент, дивергенция, ротор. Теорема Гаусса, теорема Стокса.

##### 3.1. Электростатика. /8 час./

Закон Кулона. Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции. Электрический диполь.

Поток вектора. Теорема Гаусса. Густота силовых линий. Работа электростатического поля. Циркуляция, ротор. электростатического поля. Потенциал. Связь напряженности с потенциалом. Проводник в электростатическом поле. Граничные условия на границе "проводник-вакуум". Энергия взаимодействия электрических зарядов. Энергия системы заряженных проводников. Энергия конденсатора. Плотность энергии электростатического поля.

##### 3.2. Постоянный электрический ток. /4 час./

Сила и плотность тока. Условия существования тока. Законы Ома и Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной форме. Сторонние силы. Э.Д.С. Электрический ток в сплошной среде.

Электропроводность металлов. Носители тока. Электронный газ. Подвижность носителей. Недостаточность классической электронной теории.

##### 3.3. Элементы физической электроники /2 час./

Электрический ток в вакууме. Термоэлектронная эмиссия. Виртуальный катод.

Электрический ток в газе. Процессы ионизации и рекомбинации. Понятие о плазме.

##### 3.4. Магнитное поле. /8 час./

Закон Био-Савара-Лапласа. Принцип суперпозиции. Магнитное поле кругового и прямолинейного тока. Закон полного тока. Циркуляция, ротор В.

Сила Лоренца и сила Ампера. Вектор магнитной индукции. Единица силы тока - ампер.

Движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях.

Виток с током в магнитном поле. Момент сил, действующих на рамку с током. Потенциальная энергия витка с током во внешнем магнитном поле.

Явление электромагнитной индукции. Правило Ленца. Самоиндукция. Индуктивность.

##### 3.5. Статическое поле в веществе /4 часа/

Плоский конденсатор с диэлектриком. Энергия диполя в электростатическом поле. Поляризационные заряды. Поляризованность. Электрическое смещение. Основные уравнения электростатики диэлектриков. Длинный соленоид с магнетиком. Молекулярные токи. Намагниченность. Напряженность магнитного поля. Типы магнетиков.

### 3.6. Уравнения Максвелла /2 час./

Фарадеевская и Максвелловская трактовка явлений электромагнитной индукции. Вихревое электрическое поле. Ток смещения.

Система уравнений Максвелла в интегральной и дифференциальной формах. Материальные уравнения.

Скорость распространения электромагнитных возмущений. Волновое уравнение. Плотность энергии. Плотность потока энергии.

Принцип относительности в электродинамике.

## **4. Колебания и волны /8 час./**

Понятие о колебательных процессах. Единый подход к колебаниям различной физической природы.

### 4.1. Кинематика гармонических колебаний /2 час./

Уравнение гармонических колебаний. Амплитуда, круговая частота, фаза. Комплексная форма представления колебаний. Векторные диаграммы. Сложение колебаний. Биения. Фигуры Лиссажу.

### 4.2. Гармонический осциллятор /4 час./

Груз на пружине, крутильный маятник, колебательный контур. Дифференциальное уравнение. Затухающие колебания. Коэффициент затухания, логарифмический декремент, добротность.

Резонанс. Резонансные кривые. Вынужденные колебания в электрических цепях. Квазистационарные токи. Метод комплексных амплитуд. Ангармонический осциллятор. Фурье разложения ангармонических колебаний.

### 4.3. Волновые процессы /2 час./

Волны. Плоская стационарная волна. Плоская синусоидальная волна. Бегущие и стоячие волны. Фазовая скорость, длина волны, волновое число.

Скалярные и векторные волны. Интерференция синусоидальных волн. Условия усиления и ослабления.

**4-й семестр - 36 час.**

## **5. Оптика /10 час./**

### 5.1. Интерференция света /4 час./

Развитие представлений о природе света. Интерференция монохроматических волн. Квазихроматические волны. Когерентность. Основные интерференционные схемы. Интерферометры.

#### 5.2. Дифракция света /4 час./

Принцип Гюйгенса-Френеля. Приближение Френеля. Интеграл в дифракции Френеля. Зонная пластинка. Метод зон Френеля. Дифракция Френеля на круглом отверстии, диске. Дифракция Фраунгофера на щели.

Дифракционная решетка. Исследование кристаллических структур. Исследование структуры тканей. Разрешающая способность спектральных приборов.

Принцип голографии.

#### 5.3. Поляризация света /2 час./

Естественный и поляризованный свет. Поляризация при отражении и преломлении на границе двух диэлектриков. Двойное лучепреломление. Анализ поляризованного света. Призмы и поляроиды.

### **6. Тепловое излучение /2 час./**

Тепловое излучение и его характеристики. Абсолютно-черное тело. Законы теплового излучения: закон Кирхгофа, законы Стефана-Больцмана и смещения Вина. Соотношения Рэлея-Джинса и Планка.

### **7. Квантовая физика /16 час./**

#### 7.1. Экспериментальное обоснование основных идей квантовой теории /6 час./

Линейные спектры атомов. Световые кванты. Фотоэффект. Эффект Комптона. Правило частот Бора. Опыт Франка и Герца. Корпускулярно-волновой дуализм света. Гипотеза де-Бройля. Дифракция электронов. /Опыты/. Микрочастица в двухщелевом интерферометре. Соотношение неопределенностей. Граница применимости классической механики.

#### 7.2. Уравнение Шредингера /6 час./

Задание квантового состояния микрочастиц: волновая функция и ее статистический смысл. Принцип суперпозиции состояний. Объяснение поведения частицы в интерферометре. Временное уравнение Шредингера. Операторы физических величин. Квантовые уравнения движения. Стационарное уравнение Шредингера. Простейшие задачи квантовой механики: свободная частица, частица в одномерной прямоугольной "яме", туннельный эффект. Гармонический осциллятор.

Объяснение устойчивости атома, туннельного эффекта, энергии нулевых колебаний осциллятора.

#### 7.3. Атом /2 час./

Частица в сферически симметричном поле. Водородоподобный атом. Энергетические уровни. Потенциалы возбуждения и ионизации. Энергетические спектры водородоподобных атомов. Пространственное распределение электронов в атоме водорода.

Структура электронных уровней в сложных атомах. Принцип Паули. Периодическая система Д.И.Менделеева.

#### 7.4. Молекула /2 час./

Молекула водорода. Обменное взаимодействие. Физическая природа химической связи. Ионная и ковалентная связи. Колебательная и вращательная структура термов.

#### 7.5. Основы физики твердого тела /4 час./

Электропроводность металлов. Носители тока в металлах. Недостаточность классической электронной теории.

Понятие о квантовой статистике Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака. Зонная структура энергетического спектра твердых тел. Заполнение зон. Металлы, полупроводники, диэлектрики. Понятие дырочной проводимости, собственные и примесные полупроводники.

Явление сверхпроводимости.

#### 7.6. Атомное ядро /2 час./

Строение атомных ядер. Ядерные реакции. Порог реакции. Механизм ядерных реакций.

Радиоактивные превращения ядер. Реакция ядерного деления. Ядерный реактор.

Проблемы источников энергии. Термоядерные реакции.

### **8. Современная физическая картина мира /2 час./**

Вещество и поле. Атомно-молекулярное строение вещества. Кварки. Элементарные частицы: лептоны, адроны. Фундаментальные взаимодействия. Взаимопревращение частиц. О единых теориях материи. Физическая картина мира как философская категория.

## **ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ**

### **ТЕМЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

**Механика. Молекулярная физика. 2-й семестр (18 час.)**

1. Теория погрешностей.

2. 2. Определение модуля Юнга методом Лермантова.
3. Проверка закона сохранения энергии на маятнике Максвелла.
4. Определение момента инерции тела динамическим методом.
5. Изучение законов сохранения момента импульса и энергии при помощи крутильного маятника.
6. Измерение линейных размеров и определение плотности твердых тел.
7. Определение момента инерции тел при помощи крутильного маятника.
8. Определение ускорения свободного падения при помощи обратного маятника.
9. Определения коэффициента вязкости жидкости методом Стокса.
10. Изучение основного закона динамики вращательного движения на маятнике Обербека.
11. Проверка 2 закона Ньютона на машине Атвуда.
12. Определение момента импульса гироскопа.

### **Электричество и магнетизм. 3-й семестр (18 час.)**

1. Элементы электрических цепей и электроизмерительные приборы.
2. Исследование электростатического поля.
3. Измерение сопротивления мостовым методом.
4. Исследование К.П.Д. источника света.
5. Определение удельного сопротивления металлического проводника.
6. Исследование процессов намагничивания ферромагнетиков.
7. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.
8. Проверка закона Ома для неоднородного участка цепи.
9. Определение удельного заряда электрона методом магнитной фокусировки электронных пучков.
10. Измерение индукции магнитного поля электродинамометром.
11. Изучение работы диода.
12. Исследование сегнетоэлектрических свойств триглицинсульфата.

### **Оптика. 4-й семестр (18 час.)**

1. Определение фокусного расстояния линзы и центрированной системы линз.
2. Определение потенциала возбуждения атомов криптона.
3. Определение линейного коэффициента ослабления гамма-излучения в свинце методом поглощения.
4. Определение радиуса кривизны линзы по кольцам Ньютона.
5. Определение максимальной энергии Бета-спектра по толщине слоя половинного ослабления.
6. Определение длины волны света при помощи дифракционной решетки.
7. Изучение закона Малюса.
8. Изучение серийных закономерностей в спектре водорода и определение постоянной Ридберга.

9. Определение энергии активации полупроводника.
10. Определение показателя преломления прозрачной пластинки с помощью микроскопа.

## ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

### 2 семестр. Механика и молекулярная физика. (18 час.)

1. Кинематика поступательного и вращательного движения /2 час./.
2. Кинематика поступательного и вращательного движения твердого тела и системы тел /2 час./.
3. Законы сохранения /2 час./.
4. Элементы механики жидкости /2 час./.
5. Первое начало термодинамики в применении к идеальному газу /2 час./.
6. Второе начало термодинамики. Цикл Карно. Расчет энтропии /2 час./.
7. Явление переноса. Капиллярные явления. /2 час./.

Предусмотрены две контрольные работы.

### 3 семестр. Электричество и магнетизм. Колебания. (18 час.)

1. Напряженности и потенциал электрического поля. Принцип суперпозиции. Теорема Гауса /2 час./.
2. Постоянный ток /2 час./.
3. Основные законы магнитостатики. Расчет магнитного поля /2 час./.
4. Силы Ампера и Лоренца /2 час./.
5. Явление электромагнитной индукции /2 час./.
6. Колебания /2 час./.

Предусмотрены две контрольные работы.

### 3 семестр. Оптика. Квантовая физика. (18 час.)

1. Интерференция света /2 час./.
  2. Дифракция света /2 час./.
  3. Поляризация света /2 час./.
  4. Экспериментальные основания квантовой теории /2 час./.
  5. Волновые свойства частиц /2 час./.
  6. Радиоактивность /2 час./.
- Предусмотрена контрольная работа.

## ЧАСТЬ 2.

**МЕТОДИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ КУРСА  
«ОБЩАЯ ФИЗИКА». КОНТРОЛИРУЮЩИЕ  
МАТЕРИАЛЫ.**

**ТЕМАТИКА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ И  
ЗАДАНИЙ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ**

**1 часть**

№	Тема	Аудиторные занятия	Домашнее задание	Число часов
1.	Кинематика	1.2, 1.15, 1.30	1.8, 1.12, 1.30	2
2.	Динамика частиц	2.5, 2.12, 2.32	2.6, 2.11, 2.35	2
3.	Динамика вращательного движения	1.44, 1.49, 1.55	1.46, 1.50, 1.57	2
4.	Закон сохранения импульса	2.56, 2.82, 2.89	2.81, 2.83, 2.87	2
	Закон сохранения энергии	2.44, 2.121, 2.84	2.45, 2.122, 2.76	
5.	Закон сохранения момента импульса	3.41, 3.40, 3.44	3.43, 3.47, 3.42	2
6.	I начало термодинамики	5.174, 5.82, 5.90	5.175, 5.91, 5.88	2
7.	II начало термодинамики	5.195, 5.197, 5.200	5.196, 5.198, 5.206	2
8.	Энтропия т/д систем	5.216, 5.218, 5.222	5.217, 5.224, 5.226	2
9.	Контрольная работа	-	-	2

## 2 часть

№	Тема	Аудиторные занятия	Домашнее задание	Число часов
1.	Напряженность и потенциал электр. поля	9.11, 9.2, 9 9.38, 9.49, 9.64	9.13, 9.3, 9 9.52, 9.38, 9.66	4
2.	Теорема Гаусса	9.20, 9.25, 9.33	9.21, 9.26, 9.32	2
3.	Постоянный ток	10.11, 10.19, 10.89	10.12, 10.21, 10.90	2
4.	Магнитное поле	11.3, 11.11, 11.19	11.7, 11.8, 11.22	2
5.	Сила Ампера и Лоренца	11.55, 11.61, 11.72	11.56, 11.71, 11.62	2
6.	Явление эл/магнитной индукции	11.98, 11.95, 11.114	11.99, 11.96, 11.115	2
7.	Колебания	12.33, 12.35, 12.41	12.34, 12.36, 12.40	2
8.	Контрольная работа	-	-	2

№	Тема	Аудиторные занятия	Домашнее задание	Число часов
1.	Интерференция	16.23, 16.21, 16.24	16.26, 16.22, 16.27	2
2.	Дифракция	16.28, 16.29, 16.34	16.31, 16.28, 16.33	2

3.	Поляризация	16.59, 16.61, 16.67	16.58, 16.60, 16.66	2
4.	Квантовые свойства света	19.13, 19.17, 19.20	19.14, 19.16, 19.18	2
5.	Тепловое излучение	18.21, 18.7, 18.12	18.19, 18.11, 18.17	2
6.	Атомная теория Бора	20.4, 20.3, 20.9	20.2, 20.10, 20.6	2
7.	Элементы квант. механики	19.30, 19.32, 19.38	19.33, 19.31, 19.40	2
8.	Ядерная физика	21.6, 21.10, 21.13	21.7, 21.4, 21.14	2
9.	Контрольная работа	-	-	2

№№ задач в таблице указаны по [6].

В качестве учебного пособия по освоению методики решения физических задач рекомендуются следующие издания:

3. Сборник задач по общему курсу физики. Часть II: Электричество и магнетизм. Колебания и волны./Составители: Добросельский К.Г., Сетейкин А.Ю., Изд-во АмГУ, Благовещенск, 2003.
4. Сборник задач по общему курсу физики. Часть III: Оптика. /Составители: Добросельский К.Г., Сетейкин А.Ю., Изд-во АмГУ, Благовещенск, 2003.

Указанные пособия так же рекомендуется использовать в качестве дидактических источников для индивидуальных расчетно-графических заданий по курсу общей физики.

## СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА

(Темы лабораторных работ и количество часов.)

**1 семестр (36 ч.)** Механика. Молекулярная физика.

15.Обработка результатов измерений (4 ч.).

16. Измерение линейных размеров и определение плотности твёрдых тел (2 ч.).
17. Проверка второго закона Ньютона на машине Атвуда (2 ч.).
18. Изучение законов сохранения при ударе шаров (2 ч.).
19. Изучение основного закона динамики вращательного движения на маятнике Обербека (2 ч.).
20. Изучение законов сохранения момента импульса и энергии при помощи крутильного маятника (2 ч.).
21. Определение момента импульса гироскопа (2 ч.).
22. Проверка закона сохранения энергии на маятнике Максвелла (2 ч.).
23. Определение момента инерции тел при помощи крутильного маятника (2 ч.).
24. Определение ускорения свободного падения при помощи обратного маятника (2 ч.).
25. Определение коэффициента вязкости методом Стокса (2 ч.).
26. Определение показателя адиабаты (2 ч.).
27. Определение модуля Юнга методом Лермантова (2 ч.).
28. Прием лабораторных работ, зачетные занятия (до 8 ч.)

## **2-й семестр (18 ч.) Электричество и магнетизм.**

10. Элементы электрических цепей и электроизмерительные приборы (2 ч.).
11. Изучение электронного осциллографа (2 ч.).
12. Определение удельного сопротивления металлического проводника (2 ч.).
13. Исследование электростатического поля (2 ч.).
14. Исследование КПД источника тока (2 ч.).
15. Проверка закона Ома для неоднородного участка цепи (2 ч.).
16. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли (2 ч.).
17. Определение удельного заряда электрона методом магнитной фокусировки электронных пучков (2 ч.).
18. Прием лабораторных работ, зачетное занятие (2 ч.)

## **3-й семестр (18 ч.) Квантовая физика. Оптика.**

1. Определение показателя преломления прозрачной пластинки с помощью микроскопа (2 ч.).
2. Изучение закона Малюса (2 ч.).
3. Определение радиуса кривизны линзы по кольцам Ньютона (2 ч.).

4. Определение длины волны света при помощи дифракционной решётки (2 ч.).
5. Определение потенциала возбуждения атомов криптона (2 ч.).
6. Изучение сериальных закономерностей в спектре водорода и определение постоянной Ридберга (2 ч.).
7. Определение линейного коэффициента ослабления гамма-излучения в свинце методом поглощения (2 ч.).
8. Определение максимальной энергии бета-спектра по толщине слоя половинного ослабления (2 ч.).
9. Прием лабораторных работ, зачетное занятие ( 2 ч.)

Методические указания с полным описанием лабораторных работ в пособии:

«Лабораторный практикум по физике: для студентов инженерных специальностей». Часть 1: «Механика. Молекулярная физика»/ Под ред. А.А.Согра. – Благовещенск, 2003 г.

«Лабораторный практикум по физике: для студентов инженерных специальностей». Часть 2: «Электричество и магнетизм»/ Под ред. А.А.Согра. – Благовещенск, 2004 г.

«Лабораторный практикум по физике: для студентов инженерных специальностей». Часть 3: «Оптика»/ Под ред. А.А.Согра. – Благовещенск, 2004 г.

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОФЕССОРСКО-ПРЕПОДАВАТЕЛЬСКОМУ СОСТАВУ ПО ОРГАНИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ**

Курс «Общая физика» является одной из базовых дисциплин общеинженерной подготовки студентов технических специальностей ВУЗов.

Учитывая специфику специальностей, по которым предусмотрено изучение физики, рекомендуется при планировании содержания лекционных курсов, практических, семинарских и лабораторных занятий существенное внимание уделять **применению теоретических знаний в инженерной практике, в быту, в научной деятельности**. Практическая направленность данного курса диктуется требованиями преемственности (межпредметного согласования) дисциплин теоретического блока и дисциплин специализации инженерных факультетов.

Рекомендуется сочетание в практике преподавания различных видов деятельности студентов: аудиторная (коллективная, индивидуальная) работа, экспериментальная, исследовательская работа (в рамках физического практикума, НИРС), самостоятельная работа (проработка теоретических вопросов, подготовка к практическим и лабораторным занятиям, подготовка к коллоквиуму, экзамену, выполнение расчетно-графических заданий).

Организация контроля качества знаний по дисциплине «Общая физика» включает несколько этапов:

1. Входящий контроль. Студенты, начинающие изучение данной дисциплины, подвергаются тестированию на предмет знания физики в объеме школьного курса. Определяется их исходный базовый уровень. Это позволяет скорректировать учебный план в соответствии с необходимостью (если требуется) введения в него дополнительных разделов, повышающих базовый уровень знаний студентов.
2. Текущий контроль. Осуществляется преподавателями, ведущими лабораторные и практические занятия. Как правило, он проводится в форме контрольных работ, а так же защите индивидуальных расчетно-графических заданий. Проверка усвоения теоретического материала осуществляется в процессе проведения теоретического коллоквиума, где студенты письменно отвечают на два предложенных из общего списка вопросов. Беседуя со студентом по содержанию этих вопросов, а также любых других из общего списка, преподаватель выставляет оценку в соответствии с общепринятыми критериями.
3. Итоговый контроль. В завершение изучения текущего раздела дисциплины «физика» студенты сдают семестровый экзамен. Экзаменационное задание (билет) содержит 3-4 вопроса, из которых два – имеют теоретический характер, 1-2 – представляют собой качественные или вычислительные задачи, по темам, вынесенным на экзамен. По итогам экзамена преподаватель

выставляет студенту оценку в соответствии с общепринятыми критериями.

4. Контроль остаточных знаний. Проводится после завершения изучения полного курса физики (1,2,3 части). Форма проверки – тестирование. Содержание тестов контроля остаточных знаний на стр. ... По итогам тестирования выставляются оценки: «5» - более 75% правильных ответов, «4» - более 60% правильных ответов, «3» - более 30% правильных ответов. Менее 30% правильных ответов – выставляется оценка «2».

Рекомендуемые сроки проведения текущего контроля:

**Проведение контрольных работ:** №1: темы 1-5, 9 неделя (1 семестр)

№2: темы 1-6. 12 неделя (2 семестр)

№3: темы 1-5. 10 неделя (3 семестр)

**Проведение коллоквиума.** На коллоквиум выносятся следующие вопросы (см. список экзаменационных вопросов):

1 семестр (1 часть) 1-25 вопросы

2 семестр (2 часть) 1-22 вопросы

3 семестр (3 часть) 1-16 вопросы

## **СОДЕРЖАНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ**

В содержание самостоятельной работы студентов входит выполнение ими следующих видов работ:

1. **Изучение теоретических вопросов** (проработка конспектов лекций, самостоятельное изучение отдельных разделов – указаны в рабочей программе – {}).
2. **Подготовка к семинарским занятиям.**
3. **Подготовка и оформление отчета по лабораторному практикуму.**
4. **Выполнение домашних заданий и индивидуальных заданий (РГР).**

Правила выполнения домашних заданий.

Домашние задания выполняются студентами в тетрадях по практическим занятиям и оформляются на листах А4 с соответствующим титульным листом.

Каждая задача оформляется на отдельном листе. Задача должна иметь условие (полное и краткое), решение должно иметь краткое обоснование, чертеж.

Чертежи допускается аккуратно выполнять от руки. Формулы должны быть записаны четко и предельно аккуратно, следует четко выделять индексы, векторные величины.

Срок сдачи - не позже 2х недель после завершения изучения темы.

**5. Подготовка к контрольным работам.**

Контрольные работы :	№1: темы 1-5,	9 неделя (1 семестр)
	№2: темы 1-6.	12 неделя (2 семестр)
	№3: темы 1-5.	10 неделя (3 семестр)

Подготовка к контрольным работам - в основном состоит в выполнении домашних задач и краткого повторения теоретических основ. Темы - в соответствии с таблицей практических занятий.

**6. Подготовка к коллоквиуму.** На коллоквиум выносятся следующие вопросы (см. список экзаменационных вопросов):

1 семестр (1 часть) 1-25 вопросы

2 семестр (2 часть) 1-22 вопросы

3 семестр (3 часть) 1-16 вопросы

**7. Подготовка к экзамену.** Подготовка осуществляется в соответствии с вопросами, выносимыми на экзамен.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

### МЕХАНИКА

1. Что изучает кинематика?
2. Что называется материальной точкой? Почему в механике вводят такую модель?
3. Что такое система отсчета?
4. Какова связь между скоростью и временем для равномерного прямолинейного движения?
5. Каковы основные кинематические характеристики движения точки по прямой?
6. Что такое вектор перемещения? Всегда ли модуль вектора перемещения равен отрезку пути, пройденному точкой?
7. Какое движение называется поступательным?
8. Дайте определения векторов средней скорости и среднего ускорения, мгновенной скорости и мгновенного ускорения. Каковы их направления?
9. Дайте определения скорости и ускорения при криволинейном движении.
10. Какое движение называется равнопеременным?
11. Что характеризуют тангенциальная и нормальная составляющие ускорения? Как направлены эти ускорения и чему они численно равны?
12. Возможны ли движения, при которых отсутствует нормальное ускорение? Тангенциальное ускорение? Приведите примеры.
13. Что называется угловой скоростью, угловым ускорением? Как определяются их направления?
14. Какова связь между линейными и угловыми величинами?
15. Какая система отсчета называется инерциальной? Почему система отсчета, связанная с Землей, строго говоря, неинерциальна?
16. Что называется массой тела? Что такое сила?
17. Является ли первый закон Ньютона следствием второго закона? Почему?
18. Сформулируйте три закона Ньютона. В каких системах отсчета они справедливы? Какова взаимосвязь между этими законами?

19. В чем заключается принцип независимости действия сил?
20. Какова физическая сущность трения? В чем отличие сухого трения от жидкого?
21. На спускающегося парашютиста действует сила земного притяжения, но движется он равномерно. Почему?
22. Что называется механической системой? Какие системы называются замкнутыми?
23. В чем состоит закон сохранения импульса? В каких системах он выполняется? Почему он является фундаментальным законом природы?
24. Что называется центром масс системы материальных точек? Как движется центр масс замкнутой системы?
25. Как могут двигаться друг относительно друга инерциальные системы отсчета? Напишите преобразования Галилея. В чем состоит механический принцип относительности?
26. В чем различие между понятиями энергии и работы?
27. Как найти работу переменной силы?
28. Какую работу совершает равнодействующая всех сил, приложенных к телу, равномерно движущемуся по окружности?
29. Что такое мощность? Вывести ее формулу.
30. Дайте определения и выведите формулы для известных вам видов механической энергии.
31. Какова связь между силой и потенциальной энергией?
32. Почему изменение потенциальной энергии обусловлено только работой консервативных сил?
33. В чем заключается закон сохранения механической энергии? Для каких систем он выполняется?
34. В чем физическая сущность закона сохранения и превращения энергии?
35. Чем отличается абсолютно упругий удар от абсолютно неупругого?
36. Как определить скорости двух тел после центрального абсолютно упругого удара? Как будут двигаться тела после нецентрального удара?

37. Что является моментом инерции точки, тела?
38. Какова роль момента инерции во вращательном движении?
39. Какова кинетическая энергия тела, вращающегося вокруг неподвижной оси?
40. Что называется моментом силы тела относительно неподвижной точки? Относительно неподвижной оси? Как определяется направление момента силы?
41. Что такое момент импульса материальной точки? Твёрдого тела? Как определяется направление момента импульса?
42. Какова связь моментов силы и импульса?
43. Выведите и сформулируйте уравнение динамики вращательного движения твёрдого тела.
44. В чем заключается физическая сущность закона сохранения момента импульса? В каких системах он выполняется? Приведите примеры.
45. Сопоставьте основные уравнения динамики поступательного и вращательного движений.
46. Что такое свободные оси (главные оси инерции)?
47. Что такое гироскоп? Каковы его основные свойства?
48. Сформулируйте закон Гука. Когда он справедлив?
49. Каков физический смысл модуля Юнга?
50. Как определяется гравитационная постоянная и каков ее физический смысл?
51. Что такое вес тела? В чем отличие веса тела от силы тяжести?
52. Как объяснить возникновение невесомости при свободном падении?
53. Сформулируйте законы Паскаля и Архимеда.
54. Какой закон выражает уравнение Бернулли для идеальной несжимаемой жидкости?
55. Что такое градиент скорости?
56. Каков физический смысл коэффициента динамической вязкости?
57. Каковы причины возникновения специальной теории относительности?

58. Зависят ли от скорости движения системы отсчета скорость тела? Скорость света?
59. Запишите преобразования Лоренца. При каких условиях они переходят в преобразования Галилея?
60. Какой вывод о пространстве и времени можно сделать на основе преобразований Лоренца?
61. Какие следствия вытекают из специальной теории относительности для размеров тел и длительности событий в разных системах отсчета?
62. В чем заключается релятивистский закон сложения скоростей?
63. Какой вид имеет основной закон релятивистской динамики материальной точки? Чем он отличается от основного закона ньютоновской механики?
64. Как выражается кинетическая энергия в релятивистской механике? При каком условии релятивистская формула для кинетической энергии переходит в классическую?
65. Сформулируйте и запишите закон взаимосвязи массы и энергии. В чем его физическая сущность?

## **МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

1. В чем сущность и различие термодинамического и статистического (молекулярно-кинетический) методов исследования физических явлений?
2. Что такое термодинамические параметры? Какие термодинамические параметры вам известны?
3. Какие газы называются идеальными? Сформулируйте основные законы идеальных газов.
4. Каков физический смысл постоянной Авогадро?
5. В чем заключается молекулярно-кинетическое толкование давления газа, термодинамической температуры?
6. В чем содержание и цель основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов?

7. В чем суть закона о равномерном распределении энергии по степеням свободы молекулы?
8. Почему колебательная степень свободы обладает вдвое большей энергией, чем поступательная и вращательная?
9. Что такое внутренняя энергия для идеального газа? Какими параметрами она определяется? Как меняется внутренняя энергия в результате различных процессов?
10. В чем сходство и в чем различие между понятиями «теплота» и «работа»?
11. Что такое теплоемкость газа, вещества? Запишите основные виды теплоемкостей газа. Какая из теплоемкостей –  $C_V$  или  $C_P$  – больше и почему? Выведите уравнение Майера для одного моля идеального газа.
12. Чему равна работа изобарного расширения моля идеального газа при нагревании на 1 К?
13. Чему равна работа изотермического расширения моля идеального газа?
14. Сформулируйте первое начало термодинамики и примените его к различным изопроцессам в газах.
15. Нагревается или охлаждается идеальный газ, если он расширяется при постоянном давлении?
16. Газ переходит из одного того же начального состояния 1 в одно и то же конечное состояние 2 в результате следующих процессов: а) изотермического; б) изобарного; в) изохорного. Рассмотрите эти процессы графически. Показать: 1) когда работа расширения максимальна; 2) когда газу сообщается максимальное количество теплоты; 3) как меняется внутренняя энергия газа.
17. Какой процесс называется адиабатическим? Выведите уравнение Пуассона.
18. Как изменяется температура газа при его адиабатическом сжатии? Почему адиабата более крута, чем изотерма?
19. Чем отличаются обратимые и необратимые процессы? Почему все реальные процессы необратимы?

20. Дайте определение второго начала термодинамики. Каков его физический смысл?
21. Что такое тепловая машина и холодильная машина? Каков КПД этих машин?
22. Идеальная тепловая машина. Покажите графически цикл Карно в переменных  $P$ ,  $V$ . Какой площадью определяется: 1) работа, совершенная над газом; 2) работа, совершенная самим расширяющимся газом?
23. Дайте понятие энтропии (определение, размерность, математическое выражение).
24. В каком направлении может изменяться энтропия замкнутой системы, незамкнутой?
25. Получите выражение для энтропии одного моля идеального газа.
26. Какие еще кроме внутренней энергии и энтропии существуют термодинамические функции?
27. Каков статистический смысл энтропии? Как энтропия зависит от состояния системы?
28. Каков физический смысл функции распределения молекул по скоростям, по энергиям?
29. В чем суть распределения Больцмана?
30. Зависит ли средняя длина свободного пробега молекул от температуры газа? Почему?
31. Как изменится средняя длина свободного пробега молекул с увеличением давления?
32. В чем сущность явлений переноса? При каких условиях они возникают?
33. Объясните физическую сущность законов Фурье, Фика.
34. От каких величин зависит диффузия газов?
35. Как связаны коэффициенты внутреннего трения и теплопроводности газа?
36. Чем отличаются реальные газы от идеальных? Начертите кривую, выражающую характер зависимости сил взаимодействия и взаимной потенциальной энергии двух молекул от расстояния между ними.

37. Выведите уравнение Ван – дер – Ваальса и сравните его с уравнением Менделеева – Клапейрона.
38. Начертите и объясните изотермы реального газа. Как уравнение Ван – дер – Ваальса описывает процесс фазового перехода вещества из жидкого состояния в газообразное?

## ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1. Какие существуют элементарные заряды? Какой заряд называется точечным?
2. В чем заключается закон сохранения заряда? Приведите примеры проявления этого закона.
3. Каким образом, имея под рукой горелку, можно удалить электрические заряды с изолятора, например, с наэлектризованной стеклянной палочки?
4. Как доказать на опыте, что шелк при трении о стекло электризуется и притом отрицательно?
5. Сформулируйте, запишите закон Кулона.
6. Атом водорода состоит из положительного ядра, вокруг которого вращается один электрон. С какой частотой должен вращаться электрон вокруг ядра, чтобы не упасть на ядро, если его орбита – круг с радиусом  $3 \times 10^{-8}$  см? Масса электрона равна  $9 \times 10^{-28}$  г.
7. Какие поля называются электростатическими?
8. Что называется напряженностью электростатического поля? Каково направление вектора напряженности  $E$ ? Какая единица напряженности в СИ?
9. Вычислите напряженность поля, создаваемого зарядом в 5 Кл на расстоянии 1 км от него.
10. Начертите силовые линии точечного отрицательного заряда и укажите их направление.
11. Что такое электрический диполь? Как направлено плечо диполя?

12. В чем заключается физический смысл теоремы Гаусса для электростатического поля в вакууме?
13. Что такое линейная, поверхностная, объемная плотности зарядов?
14. Чему равна напряженность поля в центре равномерно заряженной сферической поверхности?
15. Как доказать, что электростатическое поле является потенциальным?
16. Что называется циркуляцией вектора напряженности?
17. Дайте определения потенциала данной точки поля и разности потенциалов двух точек поля. Каковы их единицы?
18. Нарисуйте приблизительный вид эквипотенциальных поверхностей и силовых линий поля возле положительного точечного заряда, помещенного над земной поверхностью.
19. Какова связь между напряженностью и потенциалом? Выведите ее и объясните. Каков физический смысл?
20. Чему равна работа по перемещению заряда вдоль эквипотенциальной поверхности?
21. Два заряженных металлических шара одинакового диаметра приводятся в соприкосновение. Один из шаров полый. Поровну ли распределятся заряды на обоих шарах?
22. Каковы напряженность и потенциал поля, а также распределение зарядов внутри и на поверхности заряженного проводника?
23. Что называется электроемкостью уединенного проводника?
24. Что называется конденсатором? Чему равна электроемкость плоского конденсатора?
25. Три одинаковых конденсатора один раз соединены последовательно, другой – параллельно. Во сколько раз и когда емкость батареи будет больше?
26. Получите формулы для энергии заряженного конденсатора, выражаемые через заряд на обкладках конденсатора и через напряженность поля.

27. В чем различие поляризации диэлектриков с полярными и неполярными молекулами?
28. Как определяется вектор электрического смещения? Что он характеризует?
29. Сформулируйте теорему Гаусса для электростатического поля в диэлектрике.
30. Что называется силой тока? Плотностью тока? Каковы их единицы?
31. Заряд одного электрона равен  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Сколько электронов проходит в одну секунду через поперечное сечение проволоки, по которой течет в  $I$  А?
32. Через серебряную проволоку сечением  $1 \text{ мм}^2$  проходит ток силой в  $1 \text{ А}$ . Вычислите среднюю скорость упорядоченного движения электронов в этой проволоке, полагая, что каждый атом серебра дает один свободный электрон.
33. Назовите условия возникновения и существования электрического тока.
34. Что такое сторонние силы? Какова их природа?
35. В чем заключается физический смысл электродвижущей силы, действующей в цепи? Напряжения? Разности потенциалов?
36. Почему напряжение является обобщенным понятием разности потенциалов?
37. Какова связь между сопротивлением и проводимостью, удельным сопротивлением и удельной проводимостью? Каковы их единицы?
38. В чем заключается явление сверхпроводимости?
39. На чем основано действие термометров сопротивления?
40. Выведите законы Ома и Джоуля – Ленца в дифференциальной форме.
41. В чем заключается физический смысл удельной тепловой мощности тока?
42. Проанализируйте обобщенный закон Ома. Какие частные законы можно из него получить?
43. Напряжение, измеренное на зажимах разомкнутого элемента, равно  $1,8 \text{ В}$ , а при замыкании этого элемента на сопротивление  $1 \text{ Ом}$  в цепи возникает ток силой  $1 \text{ А}$ . Чему равно внутреннее сопротивление элемента?

44. Пять элементов с внутренним сопротивлением  $1 \text{ Ом}$  у каждого соединены последовательно. Чему равно внутреннее сопротивление батареи?
45. Три элемента с внутренним сопротивлением  $1,5 \text{ Ом}$  у каждого соединены параллельно. Найдите внутреннее сопротивление батареи.
46. Вольтметр, присоединенный к горящей лампочке накаливания, показывает  $120 \text{ В}$ , а амперметр, измеряющий силу тока в лампочке, -  $0,5 \text{ А}$ . Чему равно сопротивление лампочки? Начертите схему включения вольтметра и амперметра.
47. Сопротивление человеческого тела имеет величину порядка десятков тысяч  $\text{Ом}$ . Принимая для него значение  $36 \text{ кОм}$ , вычислите, какой ток проходит через человека, если он касается руками осветительных проводов, находящихся под напряжением  $220 \text{ В}$ .
48. Нарисуйте схему включения.
49. Какое количество тепла выделяет  $25$  – *ваттная* лампочка за каждую секунду?
50. Определите сопротивление электрической лампочки, рассчитанной на напряжение  $220 \text{ В}$  и потребляющей мощность  $25 \text{ Вт}$ .
51. Как формулируются правила Кирхгофа? На чем они основаны?
52. Как составляются уравнения, выражающие правила Кирхгофа? Как избежать лишних уравнений?
53. Какие опыты были поставлены для выяснения природы носителей электрического тока в металлах?
54. Сравните порядок средних скоростей теплового и упорядоченного движения электронов в металлах.
55. Выведите на основе классической теории электропроводности металлов дифференциальную форму законов Ома и Джоуля – Ленца.
56. Как классическая теория электропроводности металлов объясняет зависимость сопротивления металлов от температуры?
57. В чем заключаются трудности элементарной классической теории электропроводности металлов? Каковы границы ее применения?

58. Что называется работой выхода электрона и чем она обусловлена? От чего она зависит?
59. Какие существуют разновидности эмиссионных явлений? Дайте их определения.
60. Объясните вольт – амперную характеристику для вакуумного диода. Можно ли изменять силу тока насыщения вакуумного диода? Если да, то как?
61. Каким образом можно вырвать электроны из холодного катода? Как называется это явление?
62. При прохождении электрического тока через электролиты они нагреваются. Исходя из представлений об ионной проводимости, объясните это.
63. В чем отличие самостоятельного газового разряда от несамостоятельного? Каковы условия, необходимые для его существования?

## **МАГНЕТИЗМ**

1. Как, пользуясь магнитной стрелкой, можно определить знаки полюсов источников постоянного тока?
2. Чему равен и как направлен магнитный момент рамки с током?
3. Что называется индукцией магнитного поля? Как определяют направление вектора магнитной индукции **B**?
4. Нарисуйте и покажите, как ориентированы линии магнитной индукции поля прямого тока?
5. Что такое линии магнитной индукции? Как определяется их направление? Чем они отличаются от линий напряженности электростатического поля?
6. Почему магнитное поле является вихревым?
7. Записав закон Био – Савара – Лапласа, объясните его физический смысл.
8. Рассчитайте, применяя закон Био – Савара – Лапласа, магнитное поле: 1) прямого тока; 2) в центре кругового проводника с током.

9. Найдите выражение для силы взаимодействия двух бесконечных прямолинейных одинаковых токов противоположного направления. Начертите рисунок с указанием сил.
10. Назовите единицы магнитной индукции и напряженности магнитного поля. Дайте их определения.
11. Определите числовое значение магнитной постоянной.
12. Почему движущийся заряд по своим магнитным свойствам эквивалентен элементу тока?
13. Чему равна и как направлена сила, действующая на отрицательный электрический заряд, движущийся в магнитном поле?
14. Чему равна работа силы Лоренца при движении протона в магнитном поле? Ответ обосновать.
15. Когда заряженная частица движется в магнитном поле по спирали? От чего зависит шаг спирали? (Ответы подтвердите выводами формул.)
16. Что такое ускорители заряженных частиц? Какие они бывают и чем характеризуются?
17. Что называют потоком вектора магнитной индукции? Запишите теорему Гаусса для магнитного поля, объяснив ее физический смысл.
18. Какая физическая величина выражается в веберах? Дайте определение вебера.
19. Чему равна работа по перемещению проводника с током в магнитном поле? замкнутого контура с током? Выведите эти формулы; чем они принципиально отличаются?
20. В чем заключается явление электромагнитной индукции? Проанализируйте опыты Фарадея.
21. Что является причиной возникновения э.д.с. индукции в замкнутом проводящем контуре? От чего и как зависит э.д.с. индукции, возникающая в контуре?
22. Почему для обнаружения индукционного тока лучше использовать замкнутый проводник в виде катушки, а не в виде одного витка провода?

23. Сформулируйте правило Ленца, проиллюстрировав его примерами.
24. Всегда ли при изменении потока магнитной индукции в проводящем контуре в нем возникает э.д.с. индукции? индукционный ток?
25. Возникает ли индукционный ток в проводящей рамке, поступательно движущейся в однородном магнитном поле?
26. Покажите, что закон Фарадея есть следствие закона сохранения энергии.
27. Какова природа э.д.с. электромагнитной индукции?
28. Выведите выражение для э.д.с. индукции в плоской рамке, равномерно вращающейся в однородном магнитном поле. За счет чего ее можно увеличить?
29. Что такое вихревые токи? Вредны они или полезны?
30. Почему сердечники трансформаторов не делают сплошными?
31. В чем заключаются явления самоиндукции и взаимной индукции? Вычислите э.д.с. индукции для обоих случаев.
32. В чем заключается физический смысл времени релаксации  $\tau = L/R$ ? Докажите, что оно имеет размерность времени.
33. Приведите соотношение между токами в первичной и вторичной обмотках повышающего трансформатора.
34. Когда э.д.с. самоиндукции больше – при замыкании или размыкании цепи постоянного тока?
35. Какая физическая величина выражается в генри? Дайте определение генри.
36. В чем заключается физический смысл индуктивности контура? взаимной индуктивности двух контуров? От чего они зависят?
37. Запишите и проанализируйте выражения для объемной плотности энергии электростатического и магнитного полей. Чему равна объемная плотность энергии электромагнитного поля?
38. Напряженность магнитного поля возросла в два раза. Как изменилась объемная плотность энергии магнитного поля?
39. Почему орбитальный магнитный и механический моменты электрона в атоме противоположно направлены?

40. Что называют гиромагнитным отношением?
41. Из каких магнитных моментов складывается магнитный момент атома?
42. Что такое диамагнетики? парамагнетики? В чем различие их магнитных свойств?
43. Что такое намагниченность? Какая величина может служить аналогом в электростатике?
44. Запишите и объясните соотношения между магнитными проницаемостью и восприимчивостью для парамагнетика; для диамагнетика.
45. Выведите связь между векторами магнитной индукции, напряженности магнитного поля и намагниченности.
46. Объясните петлю гистерезиса ферромагнетика. Что такое магнитострикция?
47. Какие ферромагнетики являются магнитомягкими? магнито жесткими? Где их применяют?
48. Каков механизм намагничения ферромагнетиков?
49. Какую температуру для ферромагнетика называют точкой Кюри?
50. Что является причиной возникновения вихревого электрического поля? Чем оно отличается от электростатического поля?
51. Почему вводится понятие тока смещения? Что он собой по существу представляет?
52. Выведите и объясните выражение для плотности тока смещения.
53. В каком смысле можно сравнивать ток смещения и ток проводимости?
54. Запишите полную систему уравнений Максвелла в интегральной и дифференциальной формах и объясните их физический смысл.
55. Почему постоянные электрические и магнитные поля можно рассматривать обособленно друг от друга? Запишите для них уравнение Максвелла в обеих формах.
56. Почему уравнения Максвелла в интегральной форме являются более общими?
57. Какие основные выводы можно сделать на основе теории Максвелла?

## КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

1. Что такое колебания? свободные колебания? гармонические колебания? периодические процессы?
2. Дайте определения амплитуды, фазы, периода, частоты, циклической частоты колебания.
3. Какова связь амплитуды и фазы смещения, скорости и ускорения при прямолинейных гармонических колебаниях?
4. Выведите формулу для скорости и ускорения гармонически колеблющейся точки как функции времени.
5. Выведите и прокомментируйте формулы для кинетической, потенциальной и полной энергии при гармонических колебаниях.
6. Чему равно отношение полной энергии гармонического колебания к максимальному значению возвращающей силы, вызывающей это колебание?
7. Как можно сравнить между собой массы тела, измеряя частоты колебаний при подвешивании этих масс к пружине?
8. Что называется гармоническим осциллятором? пружинным маятником? физическим? математическим?
9. Выведите формулы для периодов для колебаний пружинного, физического и математического маятников.
10. Что называется приведенной длиной физического маятника?
11. Какие процессы происходят при свободных гармонических колебаниях в колебательном контуре? Чем определяется их период?
12. Запишите и проанализируйте дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний в контуре.
13. Запишите дифференциальное уравнение затухающих колебаний и его решение. Проанализируйте их для механических и электромагнитных колебаний.

14. Как изменяется частота собственных колебаний с увеличением массы колеблющегося тела?
15. По какому закону изменяется амплитуда затухающих колебаний? Являются ли затухающие колебания периодическими?
16. Почему частота затухающих колебаний должна быть меньше частоты собственных колебаний системы?
17. Что называется коэффициентом затухания? декрементом затухания? логарифмическим декрементом затухания? В чем заключается физический смысл этих величин?
18. Что такое вынужденные колебания? Запишите дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и решите его. Проведите их анализ для механических и электромагнитных колебаний.
19. От чего зависит амплитуда вынужденных колебаний? Запишите выражение для амплитуды и фазы при резонансе.
20. Чему равен сдвиг фаз между смещением и вынуждающей силой при резонансе?
21. Что называется резонансом? Какова его роль?
22. От чего зависит индуктивное сопротивление? емкостное сопротивление? Что называется реактивным сопротивлением?
23. Как сдвинуты по фазе колебания переменного напряжения и переменного тока текущего через конденсатор? катушку индуктивности? резистор? Ответ обосновать также с помощью векторных диаграмм.
24. Как вычислить мощность, выделяемую в цепи переменного тока? Что называется коэффициентом мощности?
25. Как объяснить распространение колебаний в упругой среде? Что такое волна?
26. Что называется поперечной волной? продольной? Когда они возникают?
27. Что называется длиной волны? Какова связь между длиной волны, скоростью и периодом?

28. Какая волна является бегущей, гармонической, плоской, сферической? Каковы их уравнения?
29. Что такое волновое число? фазовая и групповая скорости?
30. В чем заключается физический смысл вектора Умова?
31. При каких условиях возникает интерференция волн? Назовите условия интерференционных максимума и минимума.
32. Чем стоячая волна отличается от бегущей?
33. Чему равно расстояние между двумя соседними узлами стоячей волны? двумя соседними пучностями? соседними пучностью и узлом?
34. Что такое звуковые волны? Звуковые волны в воздухе продольные или поперечные? Почему?
35. Может ли звук распространяться в вакууме?
36. От чего зависят громкость, высота и тембр звука?
37. Что такое электромагнитная волна? Какова скорость ее распространения?
38. Что может служить источником электромагнитных волн?
39. Каковы физические процессы, приводящие к возможности существования электромагнитных волн?
40. Почему Герц в своих опытах использовал открытый колебательный контур?
41. Как можно представить себе шкалу электромагнитных волн, и каковы источники излучения разных видов волн?
42. Какие характеристики поля периодически изменяются в бегущей электромагнитной волне?
43. Запишите волновое уравнение для векторов **E**. и **H** переменного электромагнитного поля. Проанализируйте его решения и объясните физический смысл.
44. Как определяется фазовая скорость электромагнитных волн?
45. Как определить объемную плотность энергии в электромагнитной волне?
46. В чем заключается физический смысл вектора Умова – Пойтинга? Чему он равен?

47. Почему важна задача об изучении диполя?
48. В чем заключается физический смысл диаграммы направленности излучения диполя?

## ОПТИКА

1. В чем заключается физический смысл абсолютного показателя преломления среды? Что такое относительный показатель преломления?
2. При каком условии наблюдается полное отражение?
3. Как осуществляется построение изображения предметов в линзах?
4. Чем отличаются энергетические и световые величины в фотометрии? Какие они бывают?
5. Каковы основные положения и выводы корпускулярной и волновой теорий света? Почему возникло представление о двойственной корпускулярно-волновой природе света?
6. Какую величину называют временем когерентности? длиной когерентности? Какова связь между ними?
7. Для чего вводятся понятия временной и пространственной когерентностей?
8. Что такое оптическая длина пути? оптическая разность хода?
9. Два когерентных световых пучка с оптической разностью хода  $\Delta = \frac{3}{2}\lambda$  интерferируют в некоторой точке. Максимум или минимум наблюдается в этой точке? Почему?
10. Почему интерференцию можно от двух лазеров и нельзя от двух электроламп?
11. Будут ли отличаться интерференционные картины от двух узких близколежащих параллельных щелей при освещении их монохроматическим и белым светом? Почему?
12. Что такое полосы равной толщины и равного наклона? Где они локализованы?

13. Почему центр колец Ньютона, наблюдаемых в проходящем свете, обычно светлый?
14. Между двумя пластинками имеется воздушный клин, освещая который монохроматическим светом наблюдают интерференционные полосы. Как изменится расстояние между полосами, если пространство заполнить прозрачной жидкостью?
15. Каковы дополнения Френеля к принципу Гюйгенса?
16. В чем заключается принцип построения зон Френеля?
17. Когда наблюдается дифракция Френеля? дифракция Фраунгофера?
18. Почему дифракция не наблюдается на больших отверстиях и больших дисках?
19. Как влияет на дифракцию Фраунгофера от одной щели увеличение длины волны и ширины щели?
20. Как определить наибольший порядок спектра дифракционной решетки?
21. Как изменится дифракционная картина при удалении экрана от решетки?
22. Почему при использовании белого света только центральный максимум белый, а боковые максимумы радужно окрашены?
23. Почему штрихи на дифракционной решетке должны быть тесно расположены друг к другу? Почему их должно быть большее число?
24. Запишите условия дифракционных минимумов для одной щели и главных максимумов для решетки. Каков характер этих дифракционных картин?
25. Почему на кристаллах не наблюдается дифракция видимого света и наблюдается дифракция рентгеновского излучения?
26. Каков механизм рассеяния света в мутной среде? в чистой среде?
27. Какие практические применения имеет формула Вульфа – Брэггов?
28. Чем отличается нормальная дисперсия от аномальной?
29. По каким признакам можно отличить спектры, полученные с помощью призмы и дифракционной решетки?
30. Почему металлы сильно поглощают свет?
31. Когда возникает излучение Вавилова – Черенкова?

32. Что называется естественным светом? плоскополяризованным светом? частично поляризованным светом? эллиптически поляризованным светом?
33. Как практически можно отличить плоскополяризованный свет от естественного?
34. Интенсивность естественного света, пропущенного через два поляризатора, уменьшилась вдвое. Как ориентированы поляризаторы?
35. Чем замечателен угол Брюстера?
36. Покажите, что при выполнении закона Брюстера отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны.
37. Что называется оптической осью кристалла? Чем отличаются двуосные кристаллы от одноосных?
38. Чем обусловлено двойное лучепреломление в оптически анизотропном одноосном кристалле?
39. Какие поляризационные приборы вы знаете? В чем заключается принцип их действия?
40. Что называется пластинкой в четверть волны? в полволны?
41. Можно ли с помощью только поляризатора отличить эллиптически поляризованный свет от частично поляризованного? Почему?
42. На поляризатор падает циркулярно поляризованный свет, интенсивность которого равна  $I_0$ . Какова интенсивность света за поляризатором?
43. Каково будет действие пластинки в полволны на естественный свет? на плоскополяризованный свет, плоскость поляризации которого составляет угол  $45^\circ$  с оптической осью пластинки?
44. Что такое эффект Керра? Какова физическая причина его возникновения?
45. Какие вещества называют оптически активными?
46. В чем отличие оптической активности от двойного лучепреломления?
47. Чем отличается серое тело от черного?
48. В чем заключается физический смысл универсальной функции Кирхгофа?
49. Как и во сколько раз изменится энергетическая светимость черного тела, если его термодинамическая температура уменьшится вдвое?

50. Нарисуйте и сопоставьте кривые  $r_{\nu,T}$  и  $r_{\lambda,T}$ .
51. Как сместится максимум спектральной плотности энергетической светимости  $r_{\nu,T}$  черного тела с повышением температуры?
52. Используя формулу планка, найдите постоянную Стефана-Больцмана.
53. При каких условиях из формулы Планка получаются закон Вина и формула Рэлея-Джинса?
54. Может ли золотая пластинка служить фотосопротивлением?
55. Как при заданной частоте света изменится фототок насыщения с уменьшением освещенности катода?
56. Как из опытов по фотоэффекту определяется постоянная Планка?
57. Как с помощью уравнения Эйнштейна объяснить I и II законы фотоэффекта?
58. Нарисуйте и объясните вольт-амперные характеристики, соответствующие двум различным освещенностям катода (при заданной частоте света) и двум различным частотам (при заданной освещенности).
59. Чему равно отношение давлений света на зеркальную и зачерненную поверхности?
60. В чем отличие характера взаимодействия фотона и электрона при фотоэффекте и эффекте Комптона?
61. В чем заключается диалектическое единство корпускулярных и волновых свойств электромагнитного излучения?

## **КВАНТОВАЯ ФИЗИКА**

1. Почему ядерная модель атома оказалась несостоятельной?
2. Почему из различных серий спектральных линий атома водорода первой была изучена серия Бальмера?
3. Какой смысл имеют числа  $m$  и  $n$  в обобщенной формуле Бальмера?
4. Чему равна частота излучения атома водорода, соответствующая коротковолновой границе серии Брэкета?

5. Разъясните смысл постулатов Бора. Как с их помощью объясняется линейчатый спектр атома?
6. Какие основные выводы можно сделать на основании опытов Франка и Герца?
7. Пользуясь моделью Бора, укажите спектральные линии, которые могут возникнуть при переходе атома водорода в состояния с  $n = 3$  и  $n = 4$ .
8. Почему спектр поглощения атома водорода содержит только серию Лаймана?
9. Чему равны фазовая и групповая скорости фотона?
10. Что определяет квадрат модуля волновой функции?
11. Почему квантовая механика является статистической теорией?
12. Что характеризуют квантовые числа: главное, орбитальное и магнитное? Какие значения они могут принимать?
13. Каковы возможные значения  $l$  и  $m_l$  для главного квантового числа  $n = 5$ ?
14. Сколько различных состояний соответствует  $n = 4$ ?
15. Почему атом водорода может иметь одно и то же значение энергии, находясь в различных состояниях?
16. Какие частицы являются бозонами? фермионами? Какие волновые функции описывают их?
17. Как изменилась бы структура электронных оболочек атома, если бы электроны были не фермионами, а бозонами?
18. Сколько электронов может быть в атоме, у которого в основном состоянии заполнены  $K$ - и  $L$ -оболочки,  $3s$ -подоболочка и два электрона в  $3p$ -подоболочке? Что это за атом?
19. Какие квантовые числа имеет внешний (валентный) электрон в основном состоянии атома натрия?
20. Как объяснить происхождение коротковолновой границы спектра тормозного рентгеновского излучения?
21. Почему тормозное рентгеновское излучение имеет сплошной спектр, а характеристическое – линейчатый?

22. В чем причина значительного различия оптического и характеристического рентгеновского спектров атома?
23. Какое условие необходимо для возникновения вынужденного излучения в веществе?
24. Почему одним из обязательных компонентов лазера является оптический резонатор?
25. В чем принципиальное отличие квантовой статистики от классической?
26. Как на основе понятий квантовой теории электропроводности металлов объяснить зависимость удельной проводимости от температуры?
27. Как объяснить явление сверхпроводимости?
28. Что такое эффект Джозефсона?
29. В чем суть адиабатического приближения и приближения самосогласованного поля?
30. Чем отличаются энергетические состояния электронов в изолированном атоме и кристалле? Что такое запрещенные и разрешенные энергетические зоны?
31. Чем отличаются по зонной теории полупроводники и диэлектрики? металлы и диэлектрики?
32. Когда по зонной теории твердое тело является проводником электрического тока?
33. Как объяснить увеличение проводимости полупроводников с повышением температуры?
34. Чем обусловлена проводимость собственных полупроводников?
35. Почему уровень Ферми в собственном полупроводнике расположен в середине запрещенной зоны? Доказать это положение.
36. Каков механизм электронной примесной проводимости полупроводников? дырочной примесной проводимости?
37. Почему при достаточно высоких температурах в примесных полупроводниках преобладает собственная проводимость?

38. Каков механизм собственной фотопроводимости? примесной фотопроводимости? Что такое красная граница фотопроводимости?
39. Каковы по зонной теории механизмы возникновения флуоресценции и фосфоресценции?
40. В чем причины возникновения контактной разности потенциалов?
41. В чем суть термоэлектрических явлений? Как объяснить их возникновение?
42. Когда возникает запирающий контактный слой при контакте металла с полупроводником *n*-типа? с полупроводником *p*-типа? Объясните механизм его образования.
43. Как объяснить одностороннюю проводимость *p-n*-перехода?
44. Какова вольтамперная характеристика *p-n*-перехода? Объясните возникновение прямого и обратного тока.
45. Какое направление в полупроводниковом диоде является пропускным для тока?
46. Почему через полупроводниковый диод проходит ток (хотя и слабый) даже при запирающем напряжении?

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ И СЕМИНАРСКИМ ЗАНЯТИЯМ.**

1. Для подготовки к практическим и семинарским занятиям используйте конспекты лекций, учебники и учебные пособия, указанные в списке рекомендуемой основной и дополнительной литературы.
2. Прочитайте тему занятия, выделите те вопросы теории, которые подлежат обсуждению в аудитории.
3. Прочтите конспект лекции, освещающей данную тему.
4. **Ответьте на вопросы для самопроверки.** При возникновении трудностей с пониманием теоретических основ изучаемой темы, обратитесь к учебнику или методическому пособию. Целесообразно использовать в ходе подготовки учебники разных авторов, где изучаемый вопрос рассматривается с разных методических позиций.
5. При выполнении индивидуальных расчетно-графических заданий внимательно просмотрите решение аналогичных задач,

- рассматриваемых на учебных занятиях, осмыслите методы и методические приемы, используемые при их решении.
6. Постарайтесь самостоятельно воспроизвести решение этих задач; при возникновении трудностей вернитесь к тому месту в конспекте, который вызвал затруднения. Вновь повторите эту процедуру – до тех пор, пока воспроизведение не станет уверенным.
  7. Освоив методику решения данного класса задач, приступайте к решению задач из индивидуального задания. При этом придерживайтесь следующих правил:
    - Запишите краткие условия; выясните, что известно и что требуется найти.
    - Сделайте чертеж, изобразите схему или график, поясняющий суть задачной ситуации;
    - Выделите объекты задачи и выясните природу происходящих с ними изменений (процессов). Запишите ключевые отношения, законы, описывающие данное физическое явление.
    - Примените эти отношения к системе объектов задачи, получите математическую модель физической системы (процесса), описанной в задаче: как правило, это система уравнений, решение которой дает ответ на требования задачи.
    - Оформите аккуратно решение задачи на листе формата А4.
  8. **На практических и семинарских занятиях целесообразно иметь при себе конспекты лекций, учебники и учебные пособия, в которых изложена теория и методика решения задач по данному учебному курсу.**

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ И ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА.**

1. Лабораторный практикум выполняется по индивидуальному графику бригадой, состоящей из 2-3 студентов.
2. Следует учесть, что **подготовка к практикуму** требует немалого времени, поэтому целесообразно **планировать ее заранее!**
3. Для эффективной подготовки к лабораторной работе придерживайтесь следующих правил:
  - Внимательно прочтите описание работы в методическом пособии по лабораторному практикуму;
  - **Оформите шаблон отчета** по данной работе в индивидуальном лабораторном журнале (см. «Схема оформления отчета» в метод. указаниях к практикуму): укажите название, цель работы, изобразите схему установки. В пункте «Краткая теория» ответьте

письменно на контрольные вопросы. Для этой работы **активно используйте конспекты лекций и учебные пособия.**

- **Заготовьте формы таблиц**, в которых будут представлены результаты измерений и расчетов (примеры таблиц даются в метод. пособии)
4. Перед выполнением эксперимента студент должен пройти собеседование с преподавателем и получить допуск к работе. Для получения допуска студент должен ответить на следующие вопросы:
    - **Какова цель экспериментальной задачи?** Каковы основы теории изучаемого явления, основные понятия и формулы?
    - **Каков принцип работы экспериментальной установки?** Перечислите основные этапы эксперимента.
  5. Получив допуск, выполните эксперимент с соблюдением его методики и правил техники безопасности (см. в метод. пособии пункт «Выполнение работы»). Занесите данные измерений в таблицы вашего отчета. Произведите вычисление искомого параметра (или зависимости). Произведите статистическую обработку измерений. В случае графического представления результатов используйте только масштабную-координатную бумагу форматом 150-200 мм<sup>2</sup>.
  6. Запишите результат экспериментального задания, укажите абсолютную и относительную погрешность измерений, сделайте выводы.
  7. **Для получения зачета** студент представляет преподавателю оформленный отчет со всеми необходимыми расчетами и защищает его в ходе последующего собеседования.
  8. **Следует своевременно сдавать выполненные работы:** не допускается выполнение следующей работы при наличии двух выполненных, но не сданных работ!

## **ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ**

Экзаменационный билет включает два теоретических вопроса и задачу. При наличии сомнений в качестве знаний студента преподаватель вправе задавать дополнительные вопросы, преимущественно из программы-минимум.

### **ЧАСТЬ 1.   Механика. Молекулярная физика.**

1. Механическое движение. Радиус-вектор, скорость, ускорение. Нормальное и тангенциальное ускорение.

2. Первый закон Ньютона. Принцип относительности Галилея. Инерциальные системы отсчета.
3. Второй и третий законы Ньютона. Принцип независимости действия сил.
4. Классификация сил и видов взаимодействия.
5. Основная задача динамики. Уравнения движения. Пример: движение тела под действием силы тяжести.
6. Система материальных точек. Центр масс, скорость, ускорение центра масс. Закон движения центра масс системы материальных точек.
7. Система материальных точек. Внешние и внутренние силы. Вывод основного закона динамики для системы материальных точек.
8. Закон сохранения импульса системы тел. Абсолютно упругий и неупругий удар шаров.
9. Кинематика вращательного движения. Угловое перемещение, угловая скорость, угловое ускорение.
10. Связь между линейными и угловыми скоростями и ускорениями.
11. Связь между характеристиками поступательного и вращательного движения.
12. Момент силы. Момент импульса материальной точки. Уравнение моментов. Закон сохранения момента импульса для системы материальных точек.
13. Момент силы. Момент инерции. Вывод основного закона динамики вращательного движения твердого тела. Закон сохранения момента импульса для системы тел. Пример.
14. Расчет момента инерции для тел различной формы (стержень, диск). Теорема Штейнера.
15. Механическая работа. Работа постоянной и переменной силы. Пример. Мощность.
16. Работа и кинетическая энергия. Теорема об изменении кинетической энергии. Полная кинетическая энергия твердого тела.

17. Консервативные и неконсервативные силы. Потенциальная энергия тела. Закон сохранения механической энергии (вывод).
18. Расчет потенциальной энергии тела в поле различных сил (гравитационное взаимодействие, упруго деформированная пружина).
19. Кинематика жидкости. Линии и трубки тока. Уравнение неразрывности.
20. Уравнение Бернулли (вывод). Следствия из уравнения Бернулли.
21. Преобразования Галилея. Классический закон сложения скоростей. Механический принцип относительности.
22. Постулаты Эйнштейна. Преобразования Лоренца.
23. Следствия из преобразований Лоренца :понятие относительности длин и промежутков времени. Пример.
24. Релятивистский закон сложения скоростей.
25. Динамика теории относительности. Релятивистская масса, импульс и энергия. Закон взаимосвязи между массой и энергией.
26. Внутренняя энергия. Работа газа при изменении объема. Количество теплоты. Теплоемкость. I начало термодинамики.
27. Применение I начала динамики к различным изопроцессам.
28. Дайте определение и изобразите на диаграмме P-V основные процессы: изобарный изохорный, изотермический, адиабатический. Газовые законы, справедливые для этих процессов.
29. Расчет работы при изотермическом процессе.
30. Расчет работы при изобарном и изохорном процессах.
31. Работа при адиабатическом процессе.
32. Вывод закона Пуассона для адиабатического процесса.
33. Средняя кинетическая энергия молекул. Молекулярно-кинетическое толкование абсолютной температуры. Число степеней свободы молекул. Закон равнораспределения энергии по степеням свободы.
34. Внутренняя энергия идеального газа. Вывод формулы.
35. Вывод основного уравнения молекулярно-кинетической теории.

36. Теплоемкость при постоянном давлении и постоянном объеме. Формула Майера.
37. Круговые процессы. Цикл Карно и его к.п.д. Тепловой двигатель и холодильная машина.
38. Обратимые и необратимые процессы. Энтропия термодинамической системы. Приведенное количество теплоты. Неравенство Клаузиуса. Закон возрастания энтропии.
39. Общие формулировки 2 начала термодинамики.
40. Микро- и макросостояния. Энтропия как мера беспорядка системы. Закон Больцмана. Свойства энтропии.
41. Строение и свойства кристаллических и аморфных тел. Элементы кристаллографии. Влияние типа связи на структуру и свойства кристаллов. Дефекты структуры.
42. Число столкновений и длина свободного пробега молекул в газах.
43. Явления переноса в термодинамических неравновесных системах. Вывод закона диффузии, теплопроводности, внутреннего трения.
44. Реальные газы. Учет молекулярного взаимодействия. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Сравнение теоретических и экспериментальных изотерм.

**На коллоквиум выносятся вопросы № 1-25.**

**Программа-минимум:**

1. Основные понятия кинематики: радиус-вектор, скорость, ускорение, система отсчета.
2. Основы классической динамики: три закона Ньютона, ИСО, основная задача динамики.
3. Системы материальных точек: закон динамики для системы материальных точек, понятие центра масс; закон сохранения импульса и закон сохранения момента импульса для системы тел.
4. Кинематика и динамика вращательного движения: основные понятия (угловое перемещение, скорость и ускорение, момент силы, момент инерции тела, момент импульса); закон динамики вращательного движения твердого тела.

5. Механическая работа и энергия: основные определения (работа постоянной и переменной силы, кинетическая и потенциальная энергия; консервативные и неконсервативные силы); закон сохранения механической энергии.
6. Основы релятивистской механики. Постулаты Эйнштейна. Следствия из преобразований Лоренца.
7. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов. Основные положения МКТ. Процессы в газах. Газовые законы.
8. I начало термодинамики: теплота, работа, внутренняя энергия. Применение I начала к различным процессам.
9. II начало термодинамики (формулировки Клаузиуса и Томсона). Круговые процессы. Цикл Карно и его КПД.
10. Энтропия: термодинамическое и статистическое толкование. Закон возрастания энтропии.
11. Строение жидкостей и твердых тел.

## **ЧАСТЬ 2. Электричество и магнетизм. Теория колебаний.**

1. Электрический заряд. Закон Кулона. Напряженность электрического поля. Силовые линии. Напряженность поля точечного заряда.
2. Расчет напряженности электрического поля системы точечных и протяженных линейных зарядов. Примеры: вычислить напряженность на оси равномерно заряженного кольца.
3. Скалярное и векторное поле. Поток вектора через поверхность. Дивергенция вектора поля. Теорема Остроградского - Гаусса для вектора  $E$ .
4. Расчет электростатического поля бесконечной равномерно заряженной плоскости при помощи теоремы Остроградского - Гаусса.
5. Расчет электростатического поля бесконечной равномерно заряженной цилиндрической поверхности при помощи теоремы Остроградского - Гаусса.

6. Расчет электростатического поля заряженного по объему шара при помощи теоремы Остроградского - Гаусса.
7. Работа сил электростатического поля по перемещению заряда.
8. Потенциал электростатического поля. Разность потенциалов. Потенциал поля точечного заряда. Эквипотенциальные поверхности.
9. Связь между напряженностью и потенциалом.
10. Поле электрического диполя. Дипольный момент. Энергия диполя во внешнем электростатическом поле.
11. Электрическое поле в диэлектрике. Поляризованность. Ориентационная и деформационная поляризация. Виды диэлектриков.
12. Вектор электрического смещения  $D$ . Теорема Гаусса для вектора  $D$ .
13. Сегнетоэлектрики и их свойства. Электрический гистерезис. Применение сегнетоэлектриков.
14. Условия на границе диэлектриков.
15. Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция.
16. Емкость. Конденсаторы. Расчет емкости конденсаторов различной формы. Соединение конденсаторов.
17. Энергия электростатического поля. Объемная плотность энергии.
18. Постоянный электрический ток. Сила тока, плотность тока.
19. Источники тока. Сторонние силы. Электродвижущая сила источника. Падение напряжения. Условия существования тока в цепи.
20. Закон Ома в интегральной и дифференциальной форме. Электросопротивление. Сверхпроводимость.
21. Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной форме.
22. Закон Ома для неоднородного участка цепи, для замкнутой цепи. Разветвленные цепи; правила Кирхгофа.
23. Магнитное поле тока. Вектор магнитной индукции. Закон Био-Савара-Лапласа.

24. Принцип суперпозиции магнитных полей. Применение закона Био-Савара-Лапласа для расчета поля прямолинейного тока конечной и бесконечной длины.
25. Расчет магнитного поля кругового тока с помощью закона Био-Савара-Лапласа и принципа суперпозиции магнитных полей.
26. Магнитное взаимодействие токов. Сила Ампера. Единица магнитной индукции.
27. Сила Лоренца. Движения заряженных частиц в магнитном поле. Эффект Холла.
28. Циркуляция вектора магнитной индукции. Закон полного тока. Применение закона полного тока для поля соленоида и тороида.
29. Поток вектора магнитной индукции. Теорема Гаусса для вектора  $\mathbf{B}$ . Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле.
30. Явление электромагнитной индукции. Правило Ленца. Закон Фарадея.
31. Обобщение закона электромагнитной индукции Максвеллом. I уравнение Максвелла. Вихревое электрическое поле.
32. Явление самоиндукции. Индуктивность. Токи при замыкании и размыкании цепи.
33. Понятие о токе смещения. Второе уравнение Максвелла.
34. Система уравнений Максвелла и их физический смысл.
35. Природа магнитных свойств вещества. Виды магнетиков, характер их намагничивания.
36. Намагничивание магнетиков. Магнитный момент. Расчет внутреннего магнитного поля. Напряженность магнитного поля.
37. Ферромагнетики и их свойства. Магнитный гистерезис.
38. Гармонические колебания. Уравнение гармонических колебаний. Смещение, скорость, ускорение гармонических колебаний. Кинетическая, потенциальная, полная энергия.
39. Гармонические колебания на примере пружинного, физического маятников. Период и длина физического маятника.

40. Векторная диаграмма колебаний. Сложение гармонических колебаний одного направления.
41. Сложение гармонических колебаний разной частоты. Биения.
42. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний. Фигуры Лиссажу.
43. Затухающие колебания. Дифференциальное уравнение затухающих колебаний, его решение.
44. Вынужденные колебания. Резонанс. Резонансные кривые.
45. Электромагнитные колебания в контуре: дифференциальное уравнение гармонических колебаний, его решение. Зависимости  $u=f(t)$ ,  $I=f(t)$ ,  $Q=Q(t)$  для гармонических колебаний в контуре.
46. Переменный ток.  $R$ ,  $L$ ,  $C$  в цепи переменного тока. Закон Ома для переменного тока. Активное и реактивное сопротивление в цепи переменного тока.
47. Резонанс в цепи переменного тока. Резонанс токов, резонанс напряжений.

**На коллоквиум выносятся вопросы № 1-22.**

**Программа-минимум:**

1. Основные понятия электростатики: электростатическое поле, напряженность, потенциал поля, связь напряженности с разностью потенциалов, силовые линии и эквипотенциальные поверхности. Принцип суперпозиции полей для напряженности  $E$  и потенциала  $\varphi$ . Основная задача электростатики.
2. Теорема Остроградского-Гаусса, применение для расчета простейших полей.
3. Электрическое поле в диэлектриках: виды диэлектриков, механизмы поляризации. Вектор поляризации диэлектрика. Вектор электрического смещения  $D$ .
4. Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция. Электроемкость. Конденсаторы, их соединения.

5. Электрический ток. Законы постоянного тока: Законы Ома, Кирхгоффа, Джоуля-Ленца в интегральной форме. Источники тока, ЭДС, напряжение.
6. Магнитное поле тока. Закон Био-Савара-Лапласа. Применение закона Био-Савара-Лапласа для расчета магнитного поля кругового тока.
7. Движение заряженных частиц и проводники с током в магнитном поле. Сила Лоренца. Сила Ампера.
8. Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея для электромагнитной индукции. Индуктивность. Самоиндукция. Взаимоиндукция.
9. Система уравнения Максвелла для электромагнитного поля.
10. Основные понятия теории колебаний: гармонические колебания и их характеристики, закон  $s(t)$ , колебательные системы (пружинный, математический, физический маятники, колебательный контур; формулы периода колебаний). Затухающие колебания, закон  $s(t)$ , коэффициент затухания, декремент затухания. Вынужденные затухания. Резонанс.
11. Переменный ток. R, L, C в цепи переменного тока. Закон Ома для переменного тока. Активное и реактивное сопротивление в цепи переменного тока. Резонанс в цепи переменного тока.

### **ЧАСТЬ 3. Оптика, квантовая механика, физика атома и ядра.**

1. Понятие света. Волновая и корпускулярная природа света.
2. Уравнение плоской волны. Понятие когерентности волн. Время, длина, радиус когерентности. Интерференция волн. Условия усиления и ослабления волн.
3. Методы получения когерентных волн (щели Юнга, бипризма, бизеркала Френеля).
4. Интерференция в тонких пленках. Просветление оптики.

5. Полосы разной толщины и разного наклона. Кольца Ньютона.
6. Понятие о голографии.
7. Дифракция света. Принцип Гюйгенса-Френеля.
8. Зоны Френеля. Свойства зон Френеля.
9. Дифракция Френеля на круглом отверстии, диске.
10. Дифракция Фраунгофера на щели.
11. Дифракционная решетка. Уравнение максимумов и минимумов.
12. Исследование кристаллических структур. Уравнение Вульфа - Брэгга.
13. Поляризация света. Способы получения поляризованного света.
14. Закон Малюса.
15. Закон Брюстера.
16. Искусственное двойное лучепреломление. Вращение плоскости поляризации.
17. Тепловое излучение. Испускательная и поглощательная способности. Энергетическая светимость.
18. Абсолютно черное тело. Закон теплового излучения.
19. Корпускулярные свойства света. Фотоэффект и его законы. Уравнение Эйнштейна. Красная граница. Эффект Комптона.
20. Фотон и его характеристики. Давление света. Модели атомов.
21. Постулат Бора. Радиус и энергия стационарных орбит.
22. Спектральные закономерности. Опыт Франка Герца.
23. Корпускулярно-волновой дуализм материи. Гипотеза де-Бройля. Длина волны де-Бройля. Эксперимент Дэвиссона-Джермера, Томпсона, Тартаковского.
24. Соотношение неопределенностей. Прохождение электрона через щель.
25. Описание микрочастиц в квантовой механике. Волновая функция и ее свойства. Вероятностный характер квантовой механики. Уравнение Шредингера. (временное и стационарное).

26. Решение уравнение Шредингера для движения свободной частицы.
27. Решение уравнение Шредингера для движения частицы в прямоугольной потенциальной яме.
28. Прохождение частицы через потенциальный барьер. Туннельный эффект.
29. Квантовый осциллятор.
30. Атом водорода в квантовой механике.
31. Строение многоэлектронных атомов. Оболочки, подоболочки. Принцип Паули. Спин. Спиновое число.
32. Поглощение, спонтанное и вынужденное излучения.
33. Оптические и квантовые генераторы. Основные элементы генераторов. Характеристики лазерного излучения.
34. Зонная теория проводимости твердых тел. Металлы, полупроводники, диэлектрики.
35. Собственная проводимость полупроводников. Электронная и дырочная проводимость. Энергия активации.
36. Примесная проводимость полупроводников. Доноры и акцепторы. p-проводимость, n-проводимость.
37. Атомное ядро. Состав атомного ядра. Энергия связи, дефект масс.
38. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада. Постоянная распада. Активность.

**На коллоквиум выносятся вопросы: № 1-19.**

**Программа-минимум.**

1. Понятие света. Волновая и корпускулярная природа света.
2. Волновые свойства света: явление интерференции (условие минимумов и максимумов, условия наблюдения интерференции, основные интерференционные схемы, применение).

3. Волновые свойства света: дифракция света (принцип Гюйгенса-Френеля, метод зон Френеля, дифракция Френеля, дифракция Фраунгофера, дифракционная решетка)
4. Поляризация света: Закон Малюса, закон Брюстера.
5. Тепловое излучение: основные понятия, законы теплового излучения (Стефана-Больцмана, Вина).
6. Корпускулярные свойства света: фотоэффект (его законы), эффект Комптона.
7. Постулат Бора. Радиус и энергия стационарных орбит. Серийные закономерности в спектре атома водорода.
8. Корпускулярно-волновой дуализм материи. Гипотеза де-Бройля. Длина волны де-Бройля.
9. Описание микрочастиц в квантовой механике. Волновая функция и ее свойства. Вероятностный характер квантовой механики. Уравнение Шредингера.
10. Зонная теория проводимости твердых тел. Металлы, полупроводники, диэлектрики.
11. Атомное ядро. Состав атомного ядра. Энергия связи, дефект масс. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада.

## **ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ БИЛЕТЫ**

### **ЧАСТЬ 1. Механика. Молекулярная физика**

АмГУ

Утверждено на заседании кафедры

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2007 г.

Кафедра ТиЭФ

Факультет Энергетический

**Заведующий кафедрой**

Утверждаю:

**Курс 1**

Дисциплина Физика ч 2.

БИЛЕТ № 1

1. Механическое движение. Радиус-вектор, скорость, ускорение. Нормальное и тангенциальное ускорение.
2. Вывод закона Пуассона для адиабатического процесса.
3. Играет ли роль при прыжках в длину, насколько высоко вы прыгаете? Какие факторы определяют дальность прыжка?
4. В баллоне объемом  $V = 25$  л находится водород при температуре  $T = 290$  К. После того как часть водорода израсходовали, давление в баллоне понизилось на  $\Delta p = 0,4$  МПа. Определить массу  $m$  израсходованного водорода.

#### БИЛЕТ № 2

5. Первый закон Ньютона. Принцип относительности Галилея. Инерциальные системы отсчета.
6. Теплоемкость при постоянном давлении и постоянном объеме. Формула Майера.
7. Какое движение называют равноускоренным? В каких случаях тело движется равноускорено (укажите условие)?
8. Баллон объемом  $V = 30$  л содержит смесь водорода и гелия при температуре  $T = 300$  К и давлении  $p = 828$  кПа. Масса  $m$  смеси равна 24 г. Определить массу  $m_1$  водорода и массу  $m_2$  гелия.

#### БИЛЕТ № 3

1. Второй и третий законы Ньютона. Принцип независимости действия сил.
2. Обратимые и необратимые процессы. Энтропия термодинамической системы. Приведенное количество теплоты. Неравенство Клаузиуса. Закон возрастания энтропии.
3. Что характеризуют тангенциальная и нормальная составляющие ускорения? Как направлены эти составляющие и чему они численно равны? Дайте пояснительный чертеж.
4. Давление  $p$  газа равно 1 МПа, концентрация  $n$  его молекул равна  $10^{10}$  см<sup>-3</sup>. Определить 1) температуру  $T$  газа; 2) среднюю кинетическую энергию  $\langle \epsilon_n \rangle$  поступательного движения молекул газа.

#### БИЛЕТ № 4

1. Классификация сил и видов взаимодействия.

2. Вывод основного уравнения молекулярно-кинетической теории.
3. Какая система отсчета называется инерциальной? Почему система отсчета, связанная с Землей, строго говоря, неинерциальна?
4. В сосуде находится смесь кислорода и водорода. Масса  $m$  смеси равна 3,6 г. Массовая доля  $\omega_1$  кислорода составляет 0,6. Определить количество вещества  $\nu$  смеси,  $\nu_1$  и  $\nu_2$  каждого газа в отдельности.

#### БИЛЕТ № 5

1. Основная задача динамики. Уравнения движения. Пример: движение тела под действием силы тяжести.
2. Общие формулировки II начала термодинамики.
3. Является ли I закон Ньютона следствием второго закона? Почему? В каких системах отсчета справедливы законы Ньютона?
4. Найти среднюю длину свободного пробега  $\langle \lambda \rangle$  молекул водорода при давлении  $p = 0,1$  мПа и температуре  $T = 100$  К.

#### БИЛЕТ № 6

1. Система материальных точек. Центр масс, скорость, ускорение центра масс. Закон движения центра масс системы материальных точек.
2. Дайте определение и изобразите на диаграмме  $P$ - $V$  основные процессы: изобарный, изохорный, изотермический, адиабатический. Сформулируйте законы, справедливые для этих процессов.
3. Что называется центром масс системы материальных точек? Как движется центр масс замкнутой системы?
4. Водород занимает объем  $V_1 = 10$  м<sup>3</sup> при давлении  $p_1 = 100$  кПа. Газ нагрели при постоянном объеме до давления  $p_2 = 300$  кПа. Определить: 1) изменение  $\Delta U$  внутренней энергии газа; 2) работу  $A$ , совершаемую газом; 3) количество теплоты  $Q$ , сообщенную газу.

#### БИЛЕТ № 7

1. Система материальных точек. Внешние и внутренние силы. Вывод основного закона динамики для системы материальных точек.
2. Внутренняя энергия. Работа газа при изменении объема. Количество теплоты. Теплоемкость. I начало термодинамики.
3. Каким способом может человек, стоящий на абсолютно гладком льду, покрывающем поверхность пруда, достигнуть берега?
4. Гелий массой  $m = 1$  г. был нагрет на  $\Delta T = 100$  К при постоянном давлении  $p$ . Определить: 1) количество теплоты  $Q$ , переданное газу; 2) работу  $A$  расширения; 3) приращение  $\Delta U$  внутренней энергии газа.

### БИЛЕТ № 8

1. Закон сохранения импульса системы тел. Абсолютно упругий и неупругий удар шаров.
2. Круговые процессы. Цикл Карно и его к.п.д. Тепловой двигатель и холодильная машина.
3. Человек в лодке, гребущий против течения, покоится относительно берега. Совершает ли он какую-нибудь работу?
4. Водород при нормальных условиях имел объем  $V_1 = 100 \text{ м}^3$ . Найти изменение  $\Delta U$  внутренней энергии газа при его адиабатическом расширении до объема  $V_2 = 150 \text{ м}^3$ .

### БИЛЕТ № 9

1. Кинематика вращательного движения. Угловое перемещение, угловая скорость, угловое ускорение.
2. Расчет работы при изобарном и изохорном процессах.
3. Работа результирующей силы связана с изменением кинетической энергии. Может ли случиться, что работа одной из составляющих силы окажется больше изменения кинетической энергии? Если это возможно, приведите пример.
4. При адиабатическом сжатии кислорода массой  $m = 20 \text{ г}$  его внутренняя энергия увеличилась на  $\Delta U = 8 \text{ кДж}$  и температура повысилась до  $T_2 = 900 \text{ К}$ . Найти: 1) изменение температуры  $\Delta T$ ; 2) конечное давление  $p_2$ , если начальное давление  $p_1 = 200 \text{ кПа}$ .

### БИЛЕТ № 10

1. Связь между линейными и угловыми скоростями и ускорениями.
2. Микро- и макросостояния. Энтропия как мера беспорядка системы. Закон Больцмана. Свойства энтропии.
3. Некоторый предмет, брошенный вниз, отскакивает от земли обратно до высоты в полтора раза большей, чем начальная. Какое заключение вы можете сделать из этого наблюдения?
4. Идеальный газ, совершающий цикл Карно,  $2/3$  количества теплоты  $Q_1$ , полученного от нагревателя, отдает охладителю. Температура  $T_2$  охладителя равна  $280 \text{ К}$ . Определить температуру нагревателя  $T_1$ .

### БИЛЕТ № 11

1. Связь между характеристиками поступательного и вращательного движения.
2. Круговые процессы. Цикл Карно и его к.п.д. Тепловой двигатель и холодильная машина.
3. Колесо вращается вокруг оси, проходящей через его центр тяжести. Если оно вращается с постоянной угловой скоростью, то обладает ли любая выбранная точка на ободе нормальным ускорением? Обладает ли эта точка тангенциальным ускорением?
4. В результате изохорического нагревания водорода массой  $m = 1$  г давление  $p$  газа увеличилось в два раза. Определить изменение  $\Delta S$  энтропии газа.

### БИЛЕТ № 12

1. Момент силы. Момент импульса материальной точки. Уравнение моментов. Закон сохранения момента импульса для системы материальных точек.
2. Число столкновений и длина свободного пробега молекул в газах.
3. Требуется определить момент инерции тела сложной геометрической формы. Математический расчет в таком случае становится крайне трудным. Укажите способ, с помощью которого момент инерции такого тела мог бы быть определен экспериментально.
4. Кислород массой  $m = 2$  кг увеличил свой объем в  $n = 5$  раз: один раз изотермически, другой – адиабатически. Найти изменения энтропии в каждом из указанных процессов.

### БИЛЕТ № 13

1. Момент силы. Момент инерции. Вывод основного закона динамики вращательного движения твердого тела. Закон сохранения момента импульса для системы тел. Пример.
2. Общие формулировки II начала термодинамики.
3. Деревянный шар скатывается вниз без скольжения поочередно по наклонным плоскостям одинаковой высоты, но разного наклона. Будет ли время скатывания в одном случае больше, чем в другом, и почему? Будут ли скорости шара у оснований наклонных плоскостей одинаковы?
4. Кусок льда массой  $m = 200$  г, взятый при температуре  $t_1 = -10^\circ\text{C}$ , был нагрет до температуры  $t_2 = 0^\circ\text{C}$  и расплавлен, после чего образовавшаяся вода была нагрета до температуры  $t = 10^\circ\text{C}$ . Определить изменение  $\Delta S$  энтропии в ходе указанных процессов.

### БИЛЕТ № 14

1. Расчет момента инерции для тел различной формы (стержень, диск). Теорема Штейнера.
2. Строение и свойства кристаллических и аморфных тел. Элементы кристаллографии. Влияние типа связи на структуру и свойства кристаллов. Дефекты структуры.
3. Можно ли передать некоторое количество теплоты веществу, не вызывая этим повышения температуры?
4. Наклонная плоскость, образующая угол  $\alpha = 25^\circ$  с плоскостью горизонта, имеет длину  $l = 2$  м. Тело, двигаясь равноускоренно, соскользнуло с этой плоскости за время  $t = 2$  с. Определить коэффициент трения  $f$  тела о плоскость.

### БИЛЕТ № 15

1. Механическая работа. Работа постоянной и переменной силы. Пример. Мощность.
2. Работа при адиабатическом процессе.
3. В зимний день температура внутренней поверхности стены немного ниже температуры помещения, а температура наружной поверхности стены немного выше температуры наружного воздуха. Объясните это.
4. Материальная точка массой  $m = 2$  кг движется под действием некоторой силы  $F$  согласно уравнению  $x = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$ , где  $C = 1$  м/с<sup>2</sup>,  $D = -2$  м/с<sup>3</sup>. Найти значения этой силы в моменты времени  $t_1 = 2$  с и  $t_2 = 5$  с. В какой момент времени сила равна нулю?

### БИЛЕТ № 16

1. Работа и кинетическая энергия. Теорема об изменении кинетической энергии. Полная кинетическая энергия твердого тела.
2. Обратимые и необратимые процессы. Энтропия термодинамической системы. Приведенное количество теплоты. Неравенство Клаузиуса. Закон возрастания энтропии.
3. Может ли заданное количество механической энергии целиком превратиться во внутреннюю? Если это возможно, приведите пример?
4. Шарик массой  $m = 100$  г упал с высоты  $h = 2,5$  м на горизонтальную плиту, масса которой много больше массы шарика, и отскочил от нее вверх. Считая удар абсолютно упругим, определить импульс  $p$ , полученный плитой.

### БИЛЕТ № 17

1. Консервативные и неконсервативные силы. Потенциальная энергия тела. Закон сохранения механической энергии (вывод).
2. Расчет работы при изотермическом процессе.
3. Некоторое тело возвращается в свое первоначальное состояние после превращения его механической энергии во внутреннюю в результате трения. Будет ли этот процесс обратимым с термодинамической точки зрения?
4. Через блок, имеющий форму диска, перекинут шнур. К концам шнура привязали грузики массой  $m_1 = 100$  г и  $m_2 = 110$  г. С каким ускорением будут двигаться грузики, если масса  $m$  блока равна 400 г? Трение при вращении блока ничтожно мало.

### БИЛЕТ № 18

1. Расчет потенциальной энергии тела в поле различных сил (гравитационное взаимодействие, упруго деформированная пружина).
2. Дайте определение и изобразите на диаграмме P-V основные процессы: изобарный, изохорный, изотермический, адиабатический. Сформулируйте законы, справедливые для этих процессов.
3. Какие факторы уменьшают к.п.д. теплового двигателя по отношению к его предельному значению?
4. Человек стоит на скамье Жуковского и ловит рукой мяч массой  $m = 0,4$  кг, летящий в горизонтальном направлении со скоростью  $v = 20$  м/с. Траектория мяча проходит на расстоянии  $r = 0,8$  м от вертикальной оси вращения скамьи. С какой угловой скоростью  $\omega$  начнет вращаться скамья Жуковского с человеком, поймавшим мяч, если суммарный момент инерции  $J$  человека и скамьи равен  $6 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ?

### БИЛЕТ № 19

1. Кинематика жидкости. Линии и трубки тока. Уравнение неразрывности.
2. Расчет работы при изотермическом процессе.
3. Чтобы наиболее эффективно увеличить к.п.д. теплового двигателя, работающего по циклу Карно, будете ли вы увеличивать температуру нагревателя  $T_1$ , оставляя температуру холодильника  $T_2$  постоянной, или поступите наоборот?
4. Платформа в виде диска радиусом  $R = 1$  м, вращается по инерции с частотой  $n_1 = 6 \text{ мин}^{-1}$ . На краю платформы стоит человек, масса  $m$  которого равна 80 кг. С какой частотой  $n$  будет вращаться платформа, если человек перейдет в ее центр? Момент инерции  $J$  платформы равен

120 кг·м<sup>2</sup>? Момент инерции человека рассчитать как для материальной точки.

#### БИЛЕТ № 20

1. Уравнение Бернулли (вывод). Следствия из уравнения Бернулли.
2. Внутренняя энергия. Работа газа при изменении объема. Количество теплоты. Теплоемкость. I начало термодинамики.
3. Поясните, можно ли охладить воздух в кухне, оставив дверцу холодильника открытой?
4. Маховик, момент инерции  $J$  которого равен 40 кг·м<sup>2</sup>, начал вращаться равноускоренно из состояния покоя под действием момента силы  $M = 20$  Н·м. Вращение продолжалось в течение  $t = 10$  с. Определить кинетическую энергию  $T$ , приобретенную маховиком.

#### БИЛЕТ № 21

1. Преобразования Галилея. Классический закон сложения скоростей. Механический принцип относительности.
2. Средняя кинетическая энергия молекул. Молекулярно-кинетическое толкование абсолютной температуры. Число степеней свободы молекул. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы.
3. Два объема газа, находившихся первоначально при одной и той же температуре и давлении, сжимаются от значения  $V$  до  $\frac{1}{2}V$  – один изотермически, а другой адиабатически. В каком случае конечная температура будет больше? Будет ли иметь место изменение энтропии при обоих процессах?
4. Движение материальной точки задано уравнением  $x = At + Bt^2$ , где  $A = 4$  м/с;  $B = -0,05$  м/с<sup>2</sup>. Определить момент времени, в который скорость  $v$  точки равна нулю. Найти координату и ускорение в этот момент.

#### БИЛЕТ № 22

1. Постулаты Эйнштейна. Преобразования Лоренца.
2. Вывод закона Пуассона для адиабатического процесса.
3. Предположим, что мы предпочли выразить состояние системы через энтропию  $S$  и абсолютную температуру  $T$  вместо давления и объема. Как будет выглядеть изображение цикла Карно в диаграмме  $TS$ ?
4. Наклонная плоскость, образующая угол  $\alpha = 25^\circ$  с плоскостью горизонта, имеет длину  $l = 2$  м. Тело, двигаясь равноускоренно, соскользнуло с этой плоскости за время  $t = 2$  с. Определить коэффициент трения  $f$  тела о плоскость.

### БИЛЕТ № 23

1. Следствия из преобразований Лоренца: понятие относительности длин и промежутков времени. Пример.
2. Явления переноса в термодинамических неравновесных системах. Вывод закона диффузии, теплопроводности, внутреннего трения.
3. Разъясните такое утверждение: тепловой двигатель, превращает беспорядочное механическое движение в упорядоченное механическое.
4. На железнодорожной платформе установлено орудие. Масса платформы с орудием  $M = 15$  т. Орудие стреляет вверх под углом  $\varphi = 60^\circ$  к горизонту в направлении пути. С какой скоростью  $v_1$  покатится платформа вследствие отдачи, если масса снаряда  $m = 60$  кг и он вылетает со скоростью  $v_2 = 600$  м/с?

### БИЛЕТ № 24

1. Релятивистский закон сложения скоростей.
2. Реальные газы. Учет молекулярного взаимодействия. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Сравнение теоретических и экспериментальных изотерм.
3. Возможны ли движения, при которых отсутствует нормальное ускорение? тангенциальное ускорение? Приведите пример.
4. В баллоне объемом  $V = 25$  л находится водород при температуре  $T = 290$  К. После того как часть водорода израсходовали, давление в баллоне понизилось на  $\Delta p = 0,4$  МПа. Определить массу  $m$  израсходованного водорода.

### БИЛЕТ № 25

1. Динамика теории относительности. Релятивистская масса, импульс и энергия. Закон взаимосвязи между массой и энергией
2. Теплоемкость при постоянном давлении и постоянном объеме. Формула Майера.
3. Что называется центром масс системы материальных точек? Как движется центр масс замкнутой системы?
4. Водород занимает объем  $V_1 = 10$  м<sup>3</sup> при давлении  $p_1 = 100$  кПа. Газ нагрели при постоянном объеме до давления  $p_2 = 300$  кПа. Определить: 1) изменение  $\Delta U$  внутренней энергии газа; 2) работу  $A$ , совершаемую газом; 3) количество теплоты  $Q$ , сообщенную газом.

## ЧАСТЬ 2. Электричество и магнетизм. Теория колебаний.

АмГУ

Утверждено на заседании кафедры

Кафедра ТиЭФ

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2007 г.

Факультет Энергетический

**Заведующий кафедрой**

**Курс 1**

Утверждаю:

Дисциплина Физика ч 2.

### БИЛЕТ 1

1. Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции полей. Основная задача электростатики. Применение принципа суперпозиции для расчета напряженности полей дискретных и непрерывно протяженных зарядов (пример).
2. Теорема о циркуляции вектора  $\mathbf{B}$ . Применение закона полного тока для расчета магнитной индукции полей прямого тока и соленоида.
3. Объясните, почему нагревается проводник при протекании по нему тока. От чего зависит количество тепла, выделяемого в проводнике?
4. Две параллельные заряженные плоскости, поверхностные плотности заряда которых  $\sigma_1 = 2 \text{ мкКл/м}^2$  и  $\sigma_2 = -0.8 \text{ мкКл/м}^2$ , находятся на расстоянии  $d = 0.6 \text{ см}$  друг от друга. Определить разность потенциалов  $U$  между плоскостями.

### БИЛЕТ 2

1. Емкость. Конденсаторы. Вычислить емкость плоского конденсатора.
2. Закон Био-Савара-Лапласа. Применение закона Био-Савара-Лапласа для расчета индукции поля в центре кругового тока.
3. Чему равна удельная работа сил электростатического поля? Что его отличает от вихревого электрического поля?
4. Заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов  $U=104 \text{ В}$  и влетела в скрещенные под прямым углом электрическое ( $E=10 \text{ кВ/м}$ ) и магнитное ( $B=0,1 \text{ Тл}$ ) поля. Найти удельный заряд частицы  $Q/m$ , если, двигаясь перпендикулярно обоим полям, частица не испытывает отклонений от прямолинейной траектории.

### БИЛЕТ 3

1. Скалярное и векторное поле. Поток вектора через поверхность. Теорема Остроградского-Гаусса для вектора  $\mathbf{E}$ .
2. Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в магнитном поле. Эффект Холла.
3. В каких устройствах используется действие магнитного поля на рамку с током? Опишите принцип действия таких устройств
4. Поверхностная плотность заряда бесконечно протяженной вертикальной плоскости равна  $400 \text{ мКл/м}^2$ . К плоскости на нити подвешен шарик массой  $m = 10 \text{ г}$ . Определить заряд  $Q$  шарика, если нить образует с плоскостью угол  $\alpha = 30^\circ$ .

#### БИЛЕТ 4

1. Электрическое поле в диэлектрике. Поляризованность. Ориентационная и деформационная поляризация. Виды диэлектриков.
2. Магнитное поле тока. Вектор магнитной индукции. Закон Био-Савара-Лапласа. Расчет магнитного поля кругового тока с помощью закона Био-Савара-Лапласа и принципа суперпозиции магнитных полей.
3. Почему при одной и той же величине тока тонкая проволока нагревается сильнее, чем толстая?
4. Заряд равномерно распределен по бесконечной плоскости с поверхностной плотностью  $10 \text{ мКл/м}^2$ . Определить разность потенциалов двух точек поля, одна из которых находится на плоскости, а другая удалена от нее на расстояние  $10 \text{ см}$ .

#### БИЛЕТ 5

1. Теорема Остроградского-Гаусса для вектора  $\mathbf{E}$ . Расчет напряженности электростатического поля бесконечной равномерно заряженной плоскости при помощи теоремы Остроградского-Гаусса.
2. Поток вектора магнитной индукции. Теорема Гаусса для вектора  $\mathbf{B}$ .
3. Что называется магнитной силовой линией? Каким свойством обладают магнитные силовые линии? Как это связано с характером магнитного поля?
4. Электрон, пройдя в плоском конденсаторе путь от одной пластины до другой, приобрел скорость  $v = 105 \text{ м/с}$ . Расстояние между пластинами  $d = 8 \text{ мм}$ . Найти: 1) разность потенциалов  $U$  между пластинами; 2) поверхностную плотность заряда  $\sigma$  на пластинах.

#### БИЛЕТ 6

1. Расчет напряженности электростатического поля бесконечной равномерно заряженной цилиндрической поверхности при помощи теоремы Остроградского-Гаусса.
2. Обобщение закона электромагнитной индукции Максвеллом. I уравнение Максвелла. Вихревое электрическое поле.
3. Докажите, что силовые линии электростатического поля ортогональны эквипотенциальным поверхностям.
4. Электрон, имея скорость  $v=2 \text{ Мм/с}$ , влетел в однородное магнитное поле с индукцией  $B=30 \text{ мТл}$  под углом  $\alpha=30^\circ$  к направлению линий магнитной

индукции. Определить радиус  $R$  и шаг  $h$  винтовой линии, по которой будет двигаться электрон.

#### БИЛЕТ 7

1. Расчет напряженности электростатического поля заряженного по объему шара при помощи теоремы Остроградского-Гаусса.
2. Ферромагнетики и их свойства. Магнитный гистерезис. Природа ферромагнетизма.
3. Плоский конденсатор подключен к источнику напряжения  $U$ . Как изменится заряд на конденсаторе, если, не отключая от источника, его пластины раздвинуть?
4. Пылинка массой  $20$  мкг, несущая на себе заряд  $40$  нКл, влетела в электрическое поле в направлении силовых линий. После прохождения разности потенциалов  $200$  В пылинка имела скорость  $10$  м/с. Определить скорость пылинки до того, как она влетела в поле

#### БИЛЕТ 8

1. Работа сил электростатического поля по перемещению заряда. Потенциальный характер электростатического поля. Потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов.
2. Явление электромагнитной индукции. Правило Ленца. Закон Фарадея.
3. Два резистора с сопротивлениями  $R_1 = 2$  Ом и  $R_2 = 10$  Ом соединены параллельно и подключены к источнику тока. В каком из них сила тока будет больше? Ответ обоснуйте.
4. По бесконечно длинному прямому проводу, согнутому под углом  $\alpha = 120^\circ$ , течет ток силой  $I = 50$  А. Найти магнитную индукцию  $\mathbf{B}$  в точках, лежащих на биссектрисе угла и отстоящих от его вершины на расстоянии  $a = 5$  см.

#### БИЛЕТ 9

1. Потенциал электростатического поля. Разность потенциалов. Потенциал поля точечного заряда. Эквипотенциальные поверхности. Принцип суперпозиции для потенциала (пример).
2. Магнитное взаимодействие токов. Сила Ампера. Единица магнитной индукции.
3. У электроплитки, рассчитанной на напряжение  $220$  В, две одинаковых спирали, которые можно включать отдельно каждую, последовательно или параллельно. В каком случае мощность плитки наибольшая?
4. На бесконечном тонкостенном цилиндре диаметром  $d = 20$  см равномерно распределен заряд с поверхностной плотностью  $\sigma = 4$  мкКл/м<sup>2</sup>. Определить напряженность поля в точке, отстоящей от поверхности цилиндра на расстоянии  $a = 15$  см.

#### БИЛЕТ 10

1. Связь между напряженностью и потенциалом электростатического поля.

2. Магнитное поле тока. Вектор магнитной индукции. Закон Био-Савара-Лапласа. Расчет магнитного поля кругового тока с помощью закона Био-Савара-Лапласа и принципа суперпозиции магнитных полей.
3. Можно ли, имея два одинаковых конденсатора, получить емкость вдвое меньшую и вдвое большую, чем у одного конденсатора?
4. Расстояние между зарядами  $Q_1 = 100$  нКл и  $Q_2 = -50$  нКл равно 10 см. Определить силу, действующую на заряд  $Q_3 = 1$  мкКл, отстоящей на 12 см от заряда  $Q_1$  и на 10 см от заряда  $Q_2$ .

### БИЛЕТ 11

1. Вектор электрического смещения  $D$ . Теорема Остроградского-Гаусса для вектора  $D$ .
2. Принцип суперпозиции магнитных полей. Применение закона Био-Савара-Лапласа для расчета поля прямолинейного тока конечной и бесконечной длины.
3. Электрон влетел в однородное электрическое поле вдоль его силовых линий. Каков характер его движения в поле, траектория, ускорение?
4. Два шарика массой 1 г каждый подвешен на нитях, верхние концы которых соединены вместе. Длина каждой нити 10 см. Какие одинаковые заряды надо сообщить шарикам, чтобы нити разошлись на угол  $60^\circ$ ?

### БИЛЕТ 12

1. Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция. Принцип электростатической защиты.
2. Явление самоиндукции. Индуктивность. Токи при замыкании и размыкании цепи.
3. Сравните потенциал точечного заряда  $q = 10$  нКл в точке, удаленной от него на расстояние  $r_1 = 5$  см с потенциалом, созданным равномерно заряженной сферой радиуса  $R = 1$  см, несущей заряд  $Q = 10$  нКл, на расстоянии  $r_2 = 4$  см от ее поверхности.
4. В проводнике за время  $t = 20$  с при равномерном возрастании силы тока от  $I_1 = 2$  А до  $I_2 = 6$  А выделилось количество теплоты  $Q = 8$  кДж. Найти сопротивление  $R$  проводника.

### БИЛЕТ 13

1. Электроемкость. Конденсаторы. Расчет электроемкости плоского конденсатора.
2. Циркуляция вектора магнитной индукции. Закон полного тока. Применение закона полного тока для расчета поля соленоида.
3. Как изменится потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов при их сближении? Рассмотреть случаи одноименных и разноименных зарядов. Сопротивление  $R = 5$  Ом, вольтметр и источник

- тока соединены параллельно. Вольтметр показывает напряжение 1 В  
Определить ЭДС и внутреннее
4. Сопротивление  $R = 5 \text{ Ом}$ , вольтметр и источник тока соединены параллельно. Вольтметр показывает напряжение 1 В Определить ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока.

#### БИЛЕТ 14

1. Источники тока. Сторонние силы. Электродвижущая сила источника. Падение напряжения. Условия существования тока в цепи.
2. Обобщение закона электромагнитной индукции Максвеллом. I уравнение Максвелла. Вихревое электрическое поле.
3. Чему равна разность потенциалов двух точек электрического поля равномерно заряженной сферы, если одна из точек находится на поверхности сферы, а другая - в ее центре?
4. По тонкому проводящему кольцу радиусом  $R = 10 \text{ см}$  течет ток силой  $I = 80 \text{ А}$ . Найти магнитную индукцию  $\mathbf{B}$  в точке, равноудаленной от всех точек кольца на расстояние  $r = 20 \text{ см}$ .

#### БИЛЕТ 15

1. Расчет электростатического поля бесконечной равномерно заряженной плоскости при помощи теоремы Гаусса.
2. Понятие о токе смещения. Второе уравнение Максвелла.
3. Мимо сидящего в комнате человека лаборант пронесит заряженный проводник. Для кого из них существует магнитное поле? Электрическое поле?
4. К источнику тока с внутренним сопротивлением  $r = 2 \text{ Ом}$  подключают катушку индуктивностью  $L = 0,5 \text{ Гн}$  и сопротивлением  $R = 8 \text{ Ом}$ . Найти время  $t$ , в течение которого ток в катушке, нарастая, достигнет значения, отличающегося от максимального на 1%.

#### БИЛЕТ 16

1. Сегнетоэлектрики и их свойства. Электрический гистерезис. Применение сегнетоэлектриков.
2. Сила Лоренца. Движения заряженных частиц в магнитном поле. Эффект Холла.
3. Электрон влетел в заряженный плоский конденсатор параллельно его обкладкам, расположенным горизонтально. Является ли его движение равноускоренным? Какова траектория движения электрона в поле конденсатора?
4. По проводнику, согнутому в виде квадратной рамки со стороной  $a = 10 \text{ см}$ , течет ток силой  $I = 5 \text{ А}$ . Определить магнитную индукцию в точке пересечения диагоналей квадрата.

### БИЛЕТ 17

1. Электрический заряд. Закон Кулона. Напряженность электрического поля. Силовые линии. Напряженность поля точечного заряда.
2. Намагничивание магнетиков. Магнитный момент. Расчет внутреннего магнитного поля. Напряженность магнитного поля.
3. Чему равна циркуляция вектора магнитной индукции  $B$  по замкнутому контуру в магнитном поле? Почему магнитное поле называют вихревым?
4. Определить заряд, прошедший по резистору с сопротивлением 1 Ом, при равномерном возрастании напряжения на концах резистора от 1 до 3 В в течение 10 с.

### БИЛЕТ 18

1. Закон Ома в интегральной и дифференциальной форме. Электросопротивление. Сверхпроводимость.
2. Система уравнений Максвелла и их физический смысл.
3. Чему равна разность потенциалов двух точек электрического поля равномерно заряженной сферы, если одна из точек находится на поверхности сферы, а другая - в ее центре?
4. Тонкий медный провод массой  $m=1\text{г}$  согнут в виде квадрата и концы его замкнуты. Квадрат помещен в однородное магнитное поле ( $B=0,1\text{ Тл}$ ) так, что плоскость его перпендикулярна линиям индукции поля. Какой заряд  $Q$  протечет по проводнику, если квадрат, потянув за противоположные вершины, вытянуть в линию?

### БИЛЕТ 19

1. Расчет напряженности электрического поля системы точечных и протяженных линейных зарядов. Примеры: вычислить напряженность на оси равномерно заряженного кольца.
2. Магнитное взаимодействие токов. Сила Ампера. Единица магнитной индукции.
3. Какую опасность представляют собой обесточенные цепи с имеющимися в них конденсаторами?
4. В электрической цепи течет ток  $I_0=50\text{ А}$ . Определить силу тока в этой цепи через  $t=0,01\text{ с}$  после отключения ее от источника тока.. Сопротивление  $R$  цепи равно 20 Ом, ее индуктивность  $L=0,1\text{ Гн}$ .

### БИЛЕТ 20

1. Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца в интегральной форме.
2. Обобщение закона электромагнитной индукции Максвеллом. I уравнение Максвелла. Вихревое электрическое поле.
3. Как изменится потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов при их сближении? Рассмотреть случаи одноименных и разноименных зарядов.
4. Электрическое поле образовано бесконечно длинной заряженной нитью, линейная плотность заряда которой  $t = 20$  нКл/м. Определить разность потенциалов  $U$  двух точек поля, отстоящих на расстоянии  $r_1 = 8$  см и  $r_2 = 12$  см.

### БИЛЕТ 21

1. Закон Ома для неоднородного участка цепи, для замкнутой цепи. Разветвленные цепи; правила Кирхгофа.
2. Циркуляция вектора магнитной индукции. Закон полного тока. Применение закона полного тока для поля соленоида.
3. Изобразите силовые линии поля между обкладками цилиндрического конденсатора. Является ли это поле однородным? Вблизи какой обкладки начинается электрический пробой диэлектрика в мощном электрическом поле?
4. Протон влетает со скоростью  $v = 100$  км/с в область пространства, где имеются электрическое ( $E = 210$  В/м) и магнитное ( $B = 3,3$  мТл) поля. Вектора  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  совпадают по направлению. Определить ускорение протона в начальный момент движения в поле, если направление вектора его скорости  $\mathbf{v}$ : 1) совпадает с общим направлением векторов  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$ ; 2) перпендикулярно этому направлению.

### БИЛЕТ 22

1. Электрический заряд. Закон Кулона. Напряженность электрического поля. Силовые линии. Напряженность поля точечного заряда.
2. Принцип суперпозиции магнитных полей. Применение закона Био-Савара-Лапласа для расчета поля прямолинейного тока конечной и бесконечной длины.
3. Почему при соприкосновении двух одинаковых по размерам металлических заряженных шариков, их заряды становятся одинаковыми?

4. Сила тока в проводнике изменяется со временем по закону  $I = I_0 e^{-\alpha t}$ , где  $I_0 = 20 \text{ А}$ ,  $\alpha = 102 \text{ с}^{-1}$ . Определить количество теплоты, выделившееся в проводнике за время  $t = 102 \text{ с}$ ,  $R = 10 \text{ Ом}$ .

### БИЛЕТ 23

1. Работа сил электростатического поля по перемещению заряда. Потенциал электростатического поля. Разность потенциалов.
2. Природа магнитных свойств вещества. Виды магнетиков, характер их намагничивания.
3. Действие каких устройств основано на явлении электромагнитной индукции? Опишите принцип их работы.
4. Катушка и амперметр соединены последовательно и подключены к источнику тока. К клеммам катушки присоединен вольтметр с сопротивлением  $r = 4 \text{ Ом}$ . Амперметр показывает силу тока  $I = 0.3 \text{ А}$ , вольтметр - напряжение  $U = 120 \text{ В}$ . Определить сопротивление  $R$  катушки.

### БИЛЕТ 24

1. Поле электрического диполя. Дипольный момент. Энергия диполя во внешнем электростатическом поле.
2. Явление электромагнитной индукции. Правило Ленца. Закон Фарадея.
3. Электрон влетел в однородное электрическое поле вдоль его силовых линий. Каков характер его движения в поле, траектория, ускорение? Каков будет характер его движения в однородном магнитном поле? Опишите возможные варианты.
4. Э.д.с. батареи  $E = 12 \text{ В}$ . При силе тока  $I = 4 \text{ А}$  к.п.д. батареи  $\eta = 0.6$ . Определить внутреннее сопротивление  $r_i$  батареи.

### БИЛЕТ 25

1. Расчет электростатического поля бесконечной равномерно заряженной цилиндрической поверхности при помощи теоремы Гаусса.
2. Система уравнений Максвелла и их физический смысл.
3. У электроплитки, рассчитанной на напряжение  $220 \text{ В}$ , две одинаковых спирали, которые можно включать отдельно каждую, последовательно или параллельно. В каком случае мощность плитки наибольшая?
4. Короткая катушка, содержащая  $N=100$  витков, равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией  $B=0,4 \text{ Тл}$  с угловой скоростью  $\omega = 5 \text{ рад/с}$  вокруг оси, совпадающей с диаметром катушки и перпендикулярной линиям индукции поля. Определить мгновенное значение ЭДС индукции  $\varepsilon_i$  для тех моментов времени, когда плоскость катушки составляет угол  $\alpha=60^\circ$  с линиями индукции поля. Площадь катушки равна  $100 \text{ см}^2$

### ЧАСТЬ 3. Оптика. Квантовая физика. Физика атома и ядра.

АмГУ

Утверждено на заседании кафедры

Кафедра ТиЭФ

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2007 г.

Факультет Энергетический

Заведующий кафедрой

Курс 2

Утверждаю:

Дисциплина Физика Шч.

#### БИЛЕТ 1

1. Уравнение плоской волны. Понятие когерентности волн. Время, длина когерентности. Интерференция волн. Условия усиления и ослабления волн.
2. Постулаты Бора. Спектр атома водорода по Бору. опыты Франка и Герца.
3. Как сместится максимум плотности энергетической светимости  $\Gamma_{\nu,T}$  черного тела с повышением температуры?
4. Дифракционная решетка, имеющая 100 штрихов на 1 мм, удалена от экрана на 1,8 м. На каком расстоянии от центральной щели находится первый максимум освещенности, если на решетку падает монохроматический свет с длиной волны 410 нм? Каково расстояние между спектрами первого порядка?

#### БИЛЕТ 2

1. Методы получения когерентных волн (щели Юнга, бипризма, бизеркала Френеля).
2. Корпускулярные свойства света. Фотоэффект и его законы. Уравнение Эйнштейна. Красная граница фотоэффекта. Эффект Комптона.
3. Какие квантовые числа имеет внешний (валентный) электрон в основном состоянии атома натрия?

4. Пучок естественного света, идущий в воде, отражается от грани алмаза, погруженного в воду. При каком угле падения  $i_B$  отраженный свет полностью поляризован?

### БИЛЕТ 3

1. Интерференция в тонких пленках. Просветление оптики.
2. Спектральные закономерности атома водорода. Серийная формула. Опыт Франка и Герца.
3. В чем заключается принцип построения зон Френеля? Какие задачи позволяет решить метод зон Френеля?
4. Длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения черного тела,  $\lambda = 0,58$  мкм. Определить энергетическую светимость (излучательность)  $R_e$  поверхности тела.

### БИЛЕТ 4

1. Интерференция света. Полосы равной толщины и равного наклона. Кольца Ньютона.
2. Корпускулярно-волновой дуализм материи. Гипотеза де-Бройля. Длина волны де-Бройля. Эксперимент Дэвиссона и Джермера.
3. Почему при падении белого света на дифракционную решетку только центральный максимум белый, а остальные радужно окрашены?
4. Поперечная волна распространяется вдоль упругого шнура со скоростью  $v = 15$  м/с. Период колебаний точек шнура равен 1,2 с, амплитуда  $A = 2$  м. Определить 1) длину волны  $\lambda$ ; 2) фазу  $\varphi$  колебаний и смещение  $\xi$  точки, отстоящей на расстоянии  $x = 45$  м от источника волн в момент  $t = 4$  с; 3) разность фаз  $\Delta\varphi$  колебаний двух точек, лежащих на луче и отстоящих от источника волн на расстояниях  $x_1 = 20$  м и от другого - на  $x_2 = 30$  м.

### БИЛЕТ 5

1. Понятие о голографии.
2. Описание микрочастиц в квантовой механике. Волновая функция и ее свойства. Вероятностный характер квантовой механики. Уравнение Шредингера. (временное и стационарное).
3. Как объяснить увеличение проводимости полупроводников с ростом температуры, в то время как у металлов при этом проводимость падает?

4. Предельный угол  $i$  полного отражения пучка света на границе жидкости с воздухом равен  $43^\circ$ . Определить угол Брюстера  $i_B$  для падения луча из воздуха на поверхность этой жидкости.

#### БИЛЕТ 6

1. Дифракция света. Принцип Гюйгенса-Френеля.
2. Тепловое излучение. Испускательная и поглощательная способности. Энергетическая светимость. Абсолютно черное тело. Законы теплового излучения.
3. Почему спектр поглощения атомов водорода содержит только серию Лаймана? Какие переходы соответствуют линиям этой серии?
4. На тонкий стеклянный клин в направлении нормали к его поверхности падает монохроматический свет ( $\lambda = 0,6$  мкм). Определить угол  $\alpha$  между поверхностями клина, если расстояние  $b$  между смежными интерференционными минимумами в отраженном свете равно 4 мм.

#### БИЛЕТ 7

1. Зоны Френеля. Свойства зон Френеля. Зонные пластинки.
2. Фотон и его характеристики. Давление света.
3. Чем отличаются энергетические состояния электронов в изолированном атоме и кристалле? Что такое запрещенные и разрешенные энергетические зоны?
4. Пучок монохроматических световых волн ( $\lambda = 0,6$  мкм) падает под углом  $i = 30^\circ$  на находящуюся в воздухе мыльную пленку ( $n = 1,3$ ). При какой наименьшей толщине  $d$  пленки отраженные световые волны будут максимально ослаблены интерференцией? максимально усилены?

#### БИЛЕТ 8

1. Дифракция Френеля на круглом отверстии, диске.
2. Решение уравнение Шредингера для движения свободной частицы.
3. Покажите, что при выполнении закона Брюстера отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны.
4. Электрон, начальной скоростью которого можно пренебречь, прошел ускоряющую разность потенциалов  $U$ . Найти длину волны де Бройля электрона, если  $U = 51$  В.

#### БИЛЕТ 9

1. Дифракция Фраунгофера на щели.
2. Атом водорода в квантовой механике. Квантовые числа.
3. Почему можно наблюдать интерференцию от двух лазеров и нельзя от двух электроламп?
4. Будет ли наблюдаться фотоэффект, если на поверхность серебра направить ультрафиолетовое излучение с длиной волны  $\lambda = 300$  нм?

#### БИЛЕТ 10

1. Дифракционная решетка. Уравнение максимумов и минимумов.
2. Оптические квантовые генераторы. Основные элементы и принцип работы лазера. Характеристики лазерного излучения.
3. Сколько электронов может быть в атоме, у которого в основном состоянии заполнены  $K$ - и  $L$ -оболочки,  $3s$ -подоболочка и два электрона в  $3p$ -подоболочке? Что это за атом?
4. На мыльную пленку ( $n = 1,3$ ), находящуюся в воздухе, падает нормально пучок лучей белого света. При какой наименьшей толщине  $d$  пленки отраженный свет с длиной волны  $\lambda = 0,55$  мкм окажется максимально усиленным в результате интерференции?

#### БИЛЕТ 11

1. Исследование кристаллических структур. Уравнение Вульфа - Брэгга.
2. Соотношение неопределенностей. Прохождение электрона через щель.
3. Интенсивность естественного света, пропущенного через два поляризатора, уменьшилась вдвое. Как ориентированы поляризаторы?
4. Плоская световая волна ( $\lambda = 0,5$  мкм) падает нормально на диафрагму с круглым отверстием диаметром  $d = 1$  см. На каком расстоянии  $b$  от отверстия должна находиться точка наблюдения, чтобы отверстие открывало: 1) одну зону Френеля? 2) две зоны Френеля?

#### БИЛЕТ 12

1. Поляризация света. Способы получения поляризованного света. Закон Малюса.
2. Решение уравнение Шредингера для движения частицы в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме.
3. Как определить наибольший порядок спектра дифракционной решетки?
4. Длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения черного тела,  $\lambda = 0,6$  мкм. Определить температуру тела.

### БИЛЕТ 13

1. Поляризация света при отражении от границы раздела диэлектриков. Закон Брюстера.
2. Прохождение частицы через потенциальный барьер. Туннельный эффект.
3. Объясните механизм примесной проводимости в полупроводниках.
4. Определить максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с поверхности серебра: 1) ультрафиолетовым излучением с длиной волны  $\lambda = 0,155$  мкм; 2)  $\gamma$  - излучением с длиной волны  $\lambda = 2,47$  пм.

### БИЛЕТ 14

1. Распространение света в анизотропной среде. Двойное лучепреломление. Вращение плоскости поляризации.
2. Зонная теория проводимости твердых тел. Металлы, полупроводники, диэлектрики.
3. Что характеризуют квантовые числа: главное, орбитальное и магнитное? Какие значения они могут принимать?
4. На мыльную пленку с показателем преломления  $n = 1,33$  падает по нормали монохроматический свет длиной волны  $\lambda = 0,6$  мкм. Отраженный свет в результате интерференции имеет наибольшую яркость. Какова наименьшая возможная толщина пленки?

### БИЛЕТ 15

1. Понятие света. Волновая и корпускулярная природа света.
2. Строение многоэлектронных атомов. Оболочки, подоболочки. Принцип Паули. Спин. Спиновое число.
3. Будут ли отличаться интерференционные картины от двух узких близколежащих параллельных щелей при освещении их монохроматическим и белым светом?
4. Угол  $\varphi$  между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора равен  $45^\circ$ . Во сколько раз уменьшится интенсивность света, выходящего из анализатора, если угол увеличить до  $60^\circ$ ?

### БИЛЕТ 16

1. Интерференция в тонких пленках. Просветление оптики.
2. Собственная проводимость полупроводников. Электронная и дырочная проводимость. Энергия активации.
3. По каким признакам можно отличить спектры, полученные с помощью призмы и дифракционной решетки?

4. Давление  $p$  монохроматического света ( $\lambda = 600$  нм) на черную поверхность, расположенную перпендикулярно падающим лучам, равно  $0,1$  мкПа. Определить число фотонов, падающих за время  $t = 1$  с на поверхность площадью  $S = 1$  см<sup>2</sup>.

#### БИЛЕТ 17

1. Метод зон Френеля. Свойства зон Френеля. Зонная пластинка.
2. Примесная проводимость полупроводников. Доноры и акцепторы. р-проводимость, n-проводимость.
3. В чем отличие характера взаимодействия фотона и электрона при фотоэффекте и в эффекте Комптона?
4. Имеются два источника, совершающие колебания в одинаковой фазе и возбуждающие в окружающей среде плоские волны одинаковой частоты и амплитуды ( $A_1 = A_2 = 1$  мм). Найти амплитуду  $A$  колебаний точки среды, отстоящей от одного источника колебаний на расстоянии  $x_1 = 3,5$  м и от другого - на  $x_2 = 5,4$  м. Направления колебаний в рассматриваемой точке совпадают. Длина волны  $\lambda = 0,6$  м.

#### БИЛЕТ 18

1. Дифракция Френеля на круглом отверстии, диске.
2. Атомное ядро. Состав атомного ядра. Энергия связи, дефект масс.
3. Как при заданной частоте света в фотоэффекте изменится фототок насыщения с уменьшением освещенности катода?
4. Волновая функция  $\psi(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left(\frac{\pi}{l}x\right)$  описывает основное состояние частицы в бесконечно глубоком прямоугольном ящике шириной  $l$ . Вычислить вероятность нахождения частицы в средней трети ящика.

#### БИЛЕТ 19

1. Поляризация света. Способы получения поляризованного света. Закон Малюса.
2. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада. Постоянная распада. Активность.
3. Пользуясь моделью Бора, укажите спектральные линии, которые могут возникнуть при переходе атома водорода в состояния с  $n=3$  и  $n=4$ .
4. На щель шириной  $a = 0,05$  мм падает нормально монохроматический свет ( $\lambda = 0,6$  мкм). Определить угол  $\phi$  между первоначальным

направлением света и направлением на четвертую темную дифракционную полосу.

### БИЛЕТ 20

1. Методы получения когерентных волн (щели Юнга, бипризма, бизеркала Френеля).
2. Поглощение, спонтанное и вынужденное излучения. Принцип работы лазера.
3. Как практически можно отличить плоскополяризованный свет от естественного?
4. Рентгеновское излучение длиной волны  $\lambda = 55,8$  нм рассеивается плиткой графита (Комптон-эффект). Определить длину волны  $\lambda'$  рассеянного под углом  $\theta = 60^\circ$  к направлению падающего пучка света.

### КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ

Оценка	Полнота, системность, прочность знаний	Обобщенность знаний
«5»	Изложение полученных знаний в устной, письменной или графической форме, полное, в системе, в соответствии с требованиями учебной программы; допускаются единичные несущественные ошибки, самостоятельно исправляемые студентами.	Выделение существенных признаков изученного с помощью операций анализа и синтеза; выявление причинно-следственных связей; формулировка выводов и обобщений; свободное оперирование известными фактами и сведениями с использованием сведений из других предметов.
«4»	Изложение полученных знаний в устной, письменной и графической форме, полное, в системе, в соответствии с требованиями учебной программы; допускаются отдельные несущественные ошибки, исправляемые студентами после указания преподавателя на них.	Выделение существенных признаков изученного с помощью операций анализа и синтеза; выявлений причинно-следственных связей; формулировка выводов и обобщений, в которых могут быть отдельные несущественные ошибки; подтверждение изученного известными фактами и сведениями.
«3»	Изложение полученных знаний неполное, однако это не препятствует усвоению последующего программного – материала; допускаются отдельные существенные ошибки, исправление с помощью преподавателя.	Затруднения при выполнении существенных признаков изученного, при выявлении причинно-следственных связей и формулировке выводов.
	Изложение учебного материала неполное, бессистемное, что	Бессистемное выделение случайных признаков изученного; неумение

«2»	препятствует усвоению последующей учебной информации; существенные ошибки, неисправляемые даже с помощью преподавателя.	производить простейшие операции анализа и синтеза; делать обобщения, выводы.
«1»	Полное незнание и непонимание учебного материала (студент не может ответить ни на один поставленный вопрос).	_____

**Зачет и экзамен** – итоговая аттестация по дисциплине. Оценка (зачет) по этим видам контроля складывается из текущей работы студента в семестре, промежуточного контроля, самостоятельной работы и ответа на экзамене (зачете) (40% - промежуточный контроль знаний студентов, 60% - результаты итогового зачета (экзамена)).

Кафедра имеет право перераспределить это соотношение до 10%.

**Промежуточный контроль** – осуществляется два раза в семестр в виде контрольных точек. Преподаватель проверяет знания студентов в виде контрольных работ, тестов и др. по блоку изученной дисциплины. Фиксируется в журналах успеваемости, находящихся в деканатах.

Результаты учитываются при допуске к сдаче зачета или экзамена.

## КОНТРОЛИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

### КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1

#### МЕХАНИКА

#### БИЛЕТ № 1

1. Невесомый блок укреплен на вершине наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол  $\alpha = 30^\circ$ . Гири А и В массой 1 кг. соединены нитью, перекинутой через блок. Коэффициент трения гири В об наклонную плоскость  $k = 0.1$ . Найти ускорение, силу натяжения нити. Трением в блоке пренебречь.

2. Платформа, имеющая форму диска может вращаться около вертикальной оси. На краю платформы стоит человек. На какой угол повернется платформа,

если человек пойдя вдоль края платформы, и, обойдя, вернется в исходную точку. Масса платформы  $M_1 = 240$  кг, масса человека  $M_2 = 80$  кг. Момент инерции человека рассчитывать как для материальной точки.

3. Снаряд, летящий со скоростью  $V_0 = 500$  м/с, разорвался на два осколка. Меньший осколок, масса которого составляет 20% от обычной массы снаряда, полетел в противоположном направлении со скоростью  $V_1 = 100$  м/с. Определить скорость  $V_2$  большего осколка.

### БИЛЕТ № 2

1. Однородный цилиндр массы  $m_1 = 10$  кг, радиуса  $R = 0.1$  м вращается без трения под действием груза массой  $m_2 = 2$  кг. прикрепленного к невесомой нити, намотанной на цилиндр. Найти закон движения тела, если начальное положение тела  $f_0 = 0$  и начальная скорость  $v_0 = 0$ .

2. Три груза массой по 5 кг связаны нитью и движутся по горизонтальной плоскости под действием горизонтальной силы 20 Н, приложенной к первому грузу. Определить ускорение системы и силы натяжения нитей. Силой трения пренебречь.

3. Из автоматического пистолета вылетела пуля массой  $m = 10$  г и скоростью  $V = 300$  м/с. Затвор пистолета массой  $M = 200$  г принимается к столу пружиной, жесткость которой  $k = 25$  кН/м. На какое расстояние отойдет затвор после выстрела? Считать что пистолет жестко закреплен.

### БИЛЕТ № 3

1. К потолку вагона подвешен груз. Вагон тормозится и его скорость изменится на  $Dv = 12$  м/с за время  $Dt = 3$  с. На какой угол при этом отклонится при этом нить с шаром?

2. Диск радиусом  $R = 20$  см и массой  $m = 6$  кг вращается с частотой  $n = 18$  об/с. При торможении он останавливается, сделав 20 оборотов. Считая вращение равнозамедленным, определить время торможения и тормозящий момент.

3. Человек стоит на скамейке Жуковского и ловит мяч массой  $m = 0.4$  кг, летящий в горизонтальном направлении со скоростью  $V = 20$  м/с. Траектория

мяча проходит на расстоянии  $r = 0.8$  м от вертикальной оси вращения скамейки. С какой угловой скоростью  $\omega$  начнет вращаться скамейка Жуковского с человеком, поймавшего мяч? Считать, что суммарный момент инерции человека и скамейки  $I = 6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

#### БИЛЕТ № 4

1. Какую скорость должен иметь самолет, выполняющий "петлю Нестерова", чтобы в верхней точке летчик находился в состоянии невесомости? Радиус петли 300 м.
2. На барабан радиусом  $R = 0.5$  м намотан шнур, к концу которого привязан груз массой  $m_2 = 10$  кг. Найти момент инерции барабана, если известно, что груз опускается с ускорением  $a = 2 \text{ м/с}^2$ .
3. Акробат падает на сетку с высоты  $h = 8$  м. На какой предельной высоте  $h_1$  над полом надо поставить сетку, чтобы акробат не ударился при прыжке. Известно, что сетка прогибается на  $x_1 = 0.1$  м, если акробат стоит на ней.

### КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 2

#### ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

#### БИЛЕТ № 1

1. Две параллельные заряженные плоскости, поверхностные плотности заряда которых  $s_1 = 2 \text{ мкКл/м}^2$  и  $s_2 = -0.8 \text{ мкКл/м}^2$ , находятся на расстоянии  $d = 0.6$  см друг от друга. Определить разность потенциалов  $U$  между плоскостями.
2. Определить силу тока в каждом элементе и напряжение на зажимах реостата, если  $e_1 = 12 \text{ В}$ ,  $R_1 = 1 \text{ Ом}$ ,  $e_2 = 6 \text{ В}$ ,  $R_2 = 1.5 \text{ Ом}$  и  $R = 20 \text{ Ом}$ .
3. За время  $t = 8$  с при равномерно возрастающей силе тока в проводнике сопротивлением  $R = 8 \text{ Ом}$  выделялось количество теплоты  $Q = 500 \text{ Дж}$ . Определить заряд  $q$ , протекший в проводнике, если сила тока в момент времени  $t = 0$  равна нулю.

#### БИЛЕТ № 2

1. Поверхностная плотность заряда бесконечной протяженной вертикальной плоскости равна  $400 \text{ мкКл/м}^2$ . К плоскости на нити подвешен шарик массой  $m = 10 \text{ г}$ . Определить заряд  $Q$  шарика, если нить образует с плоскостью угол  $\alpha = 30^\circ$ .
2. Резистор сопротивлением  $R = 6 \text{ Ом}$  подключен к двум параллельно соединенным источникам тока с э.д.с.  $\mathcal{E}_1 = 2.2 \text{ В}$  и  $\mathcal{E}_2 = 2.4 \text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $R_1 = 0.8 \text{ Ом}$  и  $R_2 = 0.2 \text{ Ом}$ . Определить силу тока  $I$  в этом резисторе и напряжение  $U$  на зажимах второго источника тока.
3. В резисторе сопротивлением  $20 \text{ Ом}$  сила тока за  $5 \text{ с}$  линейно возросла от  $5$  до  $15 \text{ А}$ . Какое количество теплоты выделилось за это время?

### БИЛЕТ № 3

1. На бесконечном тонкостенном цилиндре диаметром  $d = 20 \text{ см}$  равномерно распределен заряд с поверхностной плотностью  $s = 4 \text{ мкКл/м}^2$ . Определить напряженность поля в точке, отстоящей от поверхности цилиндра на  $a = 15 \text{ см}$ .
2. В сеть с напряжением  $U = 100 \text{ В}$  подключили катушку с сопротивлением  $R_1 = 2 \text{ кОм}$  и вольтметр, соединенные последовательно. Показание вольтметра  $U_1 = 80 \text{ В}$ . Когда катушку заменили другой, вольтметр показал  $U_2 = 60 \text{ В}$ . Определить сопротивление  $R_2$  другой катушки.
3. Определить количество теплоты  $Q$ , выделившееся за время  $t = 10 \text{ с}$  в проводнике сопротивлением  $R = 10 \text{ Ом}$ , если сила тока в нем, равномерно уменьшаясь, изменилась от  $I_1 = 10 \text{ А}$  до  $I_2 = 0$ .

### БИЛЕТ № 4

1. С какой силой, приходящейся на единицу площади, отталкиваются две одноименно заряженные бесконечно протяженные плоскости с одинаковой поверхностной плотностью заряда  $s = 2 \text{ мкКл/м}^2$ ?
2. Заряд равномерно распределен по бесконечной плоскости с поверхностной плотностью  $10 \text{ мКл/м}^2$ . Определить разность потенциалов двух точек поля, одна из которых находится на плоскости, а другая удалена от нее на расстояние  $10 \text{ см}$ .

3. Катушка и амперметр соединены последовательно к источнику тока. К клеммам катушки присоединен вольтметр с сопротивлением 4 кОм. Амперметр показывает силу тока 0.4 А, вольтметр - напряжение 120 В. Определить напряжение катушки. Сколько процентов составит ошибка, если при определении сопротивления катушки не будет учтено сопротивление вольтметра?

#### БИЛЕТ № 5

1. Два шарика массой 1 г каждый подвешен на нитях, верхние концы которых соединены вместе. Длина каждой нити 10 см. Какие одинаковые заряды надо сообщить шарикам, чтобы нити разошлись на угол  $60^\circ$ ?

2. Пылинка массой 20 мкг, несущая на себе заряд 40 нКл, влетела в электрическое поле в направлении силовых линий. После прохождения разности потенциалов 200 В пылинка имела скорость 10 м/с. Определить скорость пылинки до того, как она влетела в поле.

3. Сопротивление  $r_1 = 5$  Ом, вольтметр и источник тока соединены параллельно. Вольтметр показывает напряжение 12 В. Определить ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока.

#### БИЛЕТ № 6

1. Два положительных точечных заряда  $Q$  и  $9Q$  закреплены на расстоянии 100 см друг от друга. Определить, в какой точке на прямой, проходящей через заряды так, чтобы он находился в равновесии. Указать, какой знак должен иметь этот заряд для того, чтобы равновесие было устойчивым, если перемещения заряда возможны только вдоль прямой, проходящей через закрепленные заряды.

2. Электрон с начальной скоростью 3 Мм/с влетел в однородное электрическое поле напряженностью  $E = 150$  В/м. Вектор начальной скорости перпендикулярен линиям напряженности электрического поля. Найти: 1) силу, действующую на электрон; 2) ускорение, приобретаемое электроном; 3) скорость электрона через 0.1 мкс.

3. Сила тока в проводнике равномерно увеличивается от нуля до некоторого максимального значения в течение времени 20 с. За это время в проводнике выделилась теплота 4 кДж. Определить скорость нарастания тока в проводнике, если сопротивление его 5 Ом.

### КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 3

#### ОПТИКА

##### ВАРИАНТ № 1

1. На мыльную пленку падает белый свет под углом  $60^\circ$ . При какой наименьшей толщине пленки отраженные лучи будут окрашены в красный цвет ( $\lambda = 0,65$  мкм). Показатель преломления мыльной пленки 1.33.
2. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается нормально падающим монохроматическим светом ( $\lambda = 590$  нм). Радиус кривизны линзы  $R = 5$  см. Определить толщину  $d_3$  воздушного промежутка в том месте, где находится пятое светлое кольцо.
3. Поток излучения абсолютно черного тела 10 квт. Максимум энергии излучения приходится на длину волны  $\lambda = 0,8$  мкм. Определить площадь  $S$  излучающей поверхности.

##### ВАРИАНТ № 2

1. На тонкую глицериновую пленку толщиной  $d = 1,5$  мкм нормально к ее поверхности падает белый свет. Определить длины волн  $\lambda$  лучей видимого участка спектра (0,4, 1, 0,8), которые будут ослаблены в результате интерференции.
2. Постоянная дифракционной решетки в  $n = 4$  раза больше длины волны монохроматического света, нормально падающего на ее поверхность.

Определить угол  $\alpha$  между двумя первыми симметричными дифракционными максимумами.

3. Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы свет от поверхности воды был максимально поляризован.

### ВАРИАНТ № 3

1. Для устранения отражения света на поверхность стеклянной линзы наносится пленка вещества с показателем  $n=1.2$ , меньшим, чем у стекла. При какой наименьшей толщине этой пленки отражение света с  $\lambda=0.6$  мкм не будет наблюдаться, если свет падает нормально.

2. На дифракционную решетку с периодом 4.8 мкм падает свет. Какие спектральные линии соответствующие длинам волн, лежащим в пределах видимого спектра будут совпадать в направлении  $\theta=30^\circ$ .

3. Чему равен угол между главными плоскостями двух поляризаторов, если интенсивность света, прошедшего через них уменьшилась в 5.4 раза. Считать, что каждый поляризатор поглощает 14% падающего на них света.

### ВАРИАНТ № 4

1. В установке для наблюдения колец Ньютона пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено жидкостью. Определить показатель преломления жидкости, если диаметр третьего темного кольца в отраженном свете = 6 мм. Свет с  $\lambda=0.6$  мкм падает нормально. Радиус кривизны линзы 10 м.

2. На щель шириной 0.05 м падает нормально монохроматический свет ( $\lambda=0.6$  мкм). Определить угол между первоначальным направлением лучей и четвертой дифракционной полосой.

3. Считая, что Солнце излучает как абсолютно черное тело, вычислить насколько уменьшится масса Солнца за 1 сек вследствие излучения. Температура поверхности Солнца - 5800°K.

### ВАРИАНТ № 5

1. На круглое отверстие диаметром  $d=4$  мм падает параллельный пучок лучей ( $\lambda=0.5$  мкм). Точка наблюдения находится на оси отверстия на расстоянии 1 м от него. Сколько зон Френеля укладывается в отверстии. Темное или светлое пятно получается в центре дифракционной картины, если в месте наблюдения поместить экран.

2. Постоянная дифракционной решетки = 2.5 мкм. Определить наибольший порядок спектра, общее число главных максимумов, угол дифракции в спектре третьего порядка при нормальном падении света с  $\lambda=0.59$  мкм.

3. Естественный свет падает на кристалл алмаза под углом полной поляризации. Найти угол преломления света.

#### ВАРИАНТ № 6

1. На дифракционную решетку падает нормально параллельный пучок белого света. Спектр 3-го и 4-го порядков частично накладывается друг на друга. На какую длину волн в спектре 4-го порядка накладывается граница ( $\lambda=780$  нм) спектра третьего порядка.

2. Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плосковыпуклой линзой находится жидкость. Найти показатель преломления жидкости, если радиус  $r_3$  третьего темного кольца Ньютона в отраженном свете с длиной волны  $\lambda=0.6$  мкм равен 0.82 мм. Радиус кривизны линзы  $R=0.5$  м.

3. Пучок света переходит из жидкости в стекло. Угол падения равен  $60^\circ$ , угол преломления  $g=50^\circ$ . При каком угле падения пучок света, отраженный границы раздела этих сред, будет максимально поляризован?

#### ВАРИАНТ № 7

1. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим нормально. При заполнении пространства между линзой и стеклянной пластинкой жидкостью радиусы темных колец в отраженном свете уменьшились в 1.21 раза. Определить показатель преломления жидкости.

2. Черное тело находится при  $T_1=2.900$  К. При его остывании длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической

светимости, изменилась на  $D_1=9\text{мкм}$ . Определить температуру  $T_2$ , до которой тело охлаждалось.

3. Естественный свет проходит через два поляризатора, угловыми плоскостями которых  $60^\circ$ . Во сколько раз изменится интенсивность света прошедшего эту систему, если угол между плоскостями поляризаторов уменьшить в 2 раза.

## ТЕСЫ КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ ЗНАНИЙ

### ВАРИАНТ 1

1. Точка движется по закону  $\mathbf{r} = t^2 \mathbf{i} + 2t \mathbf{j} + (t^3 - 1)\mathbf{k}$ . Это движение происходит под действием силы, которая параллельна...

Варианты ответа:

1. плоскости  $XOZ$ ;
2. плоскости  $YOZ$ ;
3. оси  $OX$ ;
4. плоскости  $XOY$ ;
5. оси  $OZ$ .

2. Каким способом может человек, стоящий на абсолютно гладком льду, покрывающем поверхность водоема, достигнуть берега?

Варианты ответа:

1. лечь и вращаться вокруг оси;
2. перемещаться мелкими шагами;
3. снять и бросить в сторону одежду;
4. двигаться коньковым ходом;
5. перекатываться с боку на бок.

3. Момент инерции тела зависит от...

- А. Распределения массы перпендикулярно оси вращения.
- Б. Распределения массы параллельно оси вращения.
- В. Моменту силы.
- Г. Массы тела.
- Д. Формы тела.

Варианты ответа:

1. только от В и Г;
2. только от А, Г и Д;
3. только от А и Б;
4. только от А и В;
5. только от Б, В и Г.

4. Укажите условия сохранения момента импульса в системе:

- А. Замкнутость системы.

- Б. Консервативность взаимодействий.
- В. Неизменность скорости частиц.
- Г. Постоянство массы частиц.

Варианты ответа:

1. только А и Б;
  2. только А;
  3. только А, Б и В;
  4. только Б;
  5. все эти условия.
5. Адиабатическими процессами являются:
- А. Процессы без теплообмена между системой и окружающей средой.
  - Б. Все быстро протекающие процессы.
  - В. Процессы, при которых работа над окружающими телами совершается за счет изменения внутренней энергии системы.
  - Г. Процессы, уравнения которых имеют вид  $pV^\gamma = const$ , где  $p$  - давление,  $V$  - объем,  $\gamma$ - коэффициент Пуассона.

Варианты ответа:

1. все эти процессы;
  2. только Б и В;
  3. А, Б и В;
  4. только А;
  5. только А и Б.
6. Клапан на велосипедной шине открыли на короткое время, выпуская воздух, а затем быстро закрыли. Остаток воздуха в шине...

Варианты ответа:

1. имеет температуру, большую температуры окружающей среды;
  2. имеет влажность, меньшую влажности окружающей среды;
  3. имеет температуру, меньшую температуры окружающей среды;
  4. стал плотнее, чем он был первоначально;
  5. имеет температуру, равную температуре окружающей среды.
7. В двух сосудах при комнатной температуре хранится по 1 молю газа. В первом сосуде газ состоит из одноатомных молекул, а во втором - из двухатомных. Каково отношение молярных теплоемкостей этих газов при постоянном объеме  $C_v(1)/C_v(2)$ ?

Варианты ответа:

1. 3/5;
  2. 5;
  3. 2/1;
  4. 1/1;
  5. 5/3.
8. Удельная теплота плавления – это количество теплоты, которое требуется для...

Варианты ответа:

1. нагрева вещества до температуры плавления;

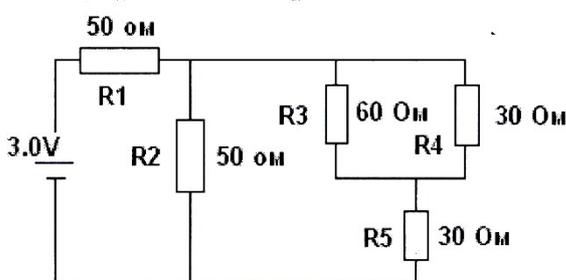
2. превращения единицы вещества в жидкость при температуре плавления;
  3. превращения в жидкость одного килограмма любого вещества, первоначально находящегося при комнатной температуре;
  4. превращения в жидкость вещества при температуре плавления;
  5. среди перечисленных ответов нет правильного.
9. Частица может колебаться вдоль оси  $X$  под действием результирующей силы  $F = -kx$  с амплитудой  $A$  и частотой  $\omega$ , где  $k$  - положительная константа. В момент, когда  $x = A/2$ , скорость частицы будет равна:

Варианты ответа:

1.  $\omega \cdot A$ ;
  2.  $\sqrt{3} \cdot \omega \cdot A/2$ ;
  3.  $\sqrt{2} \cdot \omega \cdot A$ ;
  4.  $2 \cdot \omega \cdot A$ ;
  5.  $(1/3) \cdot \omega \cdot A$ .
10. В цепи, показанной на рисунке, сопротивления даны в Омах, а батарея с э.д.с.  $\mathcal{E} = 3\text{В}$  имеет пренебрежимо малое внутренне сопротивление. Падение напряжения на сопротивлении  $R_4$  равно

Варианты ответа:

1. 0,6В;
  2. 1,2В;
  3. 1,5В;
  4. 3,0В;
  5. 0,4В.
11. По длинному прямому проводу, лежащему недалеко от Вас в плоскости листа, слева направо течет ток. Между Вами и проводом в направлении течения тока движется электрон. Укажите верную комбинацию направлений вектора магнитной индукции в месте нахождения электрона и силы, действующей на этот электрон.



Варианты ответа:

- |                             |               |
|-----------------------------|---------------|
| Вектор магнитной индукции   | Сила          |
| 1. вниз от плоскости листа  | от провода    |
| 2. вверх от плоскости листа | от провода    |
| 3. вверх от плоскости листа | к проводу     |
| 4. к Вам                    | вдоль провода |
| 5. от Вас                   | к проводу     |

**12.** Электрическая проводимость большинства металлов уменьшается с увеличением температуры вследствие:

Варианты ответа:

1. увеличения числа столкновений электронов с колебаниями решетки
2. уменьшения числа столкновений электронов с вакансиями, которые становятся более упорядоченными при увеличении температуры
3. увеличения числа столкновений электронов с примесями
4. термической активации доноров и акцепторов внутри зоны проводимости
5. уменьшения числа носителей зарядов из-за занятия вакантных состояний в зоне проводимости

**13.** Если хотя бы один виток обмотки трансформатора замкнется накоротко, то трансформатор начнет сильно греться и может выйти из строя. Какие факторы связаны с этим явлением?

- А. Возникающая в замкнутом витке ЭДС создает большой ток в этом витке.
- Б. Сопротивление замкнутого витка много меньше сопротивления нагрузки трансформатора.
- В. Выделяющаяся в проводнике теплота пропорциональна квадрату силы тока.
- Г. Рассеиваемая трансформатором энергия обратно пропорциональна числу витков.

Варианты ответа:

1. все факторы;
2. только А и Г;
3. только А и В;
4. А, Б и В;
5. только А и Б.

**14.** Воздушный конденсатор с параллельными пластинами заряжен, а затем отсоединен от батареи. Уменьшение расстояния между пластинами конденсатора приведет:

Варианты ответа:

1. к уменьшению напряжения между пластинами;
2. к увеличению заряда на пластинах конденсатора;
3. не повлияет на заряд и напряжение конденсатора;
4. к увеличению напряжения между пластинами;
5. к уменьшению заряда на пластинах конденсатора.

**15.** Провод без изоляции согнули пополам и скрутили. Как изменилось его электросопротивление?

Варианты ответа:

1. уменьшилось в 2 раза;
2. не изменилось;
3. увеличилось в 2 раза;
4. уменьшилось в 4 раза;
5. увеличилось в 4 раза.

16. Магнитная индукция  $B$  длинного прямолинейного проводника с током  $I$  на расстоянии  $r$  пропорциональна...

Варианты ответа:

1.  $I/r$ ;
2.  $I \cdot r$ ;
3.  $I$ ;
4.  $I \cdot r^2$ ;
5.  $I/r^2$ .

17. Какие из приведенных ниже утверждений относятся к плоскополяризованному свету?

- А. Свет распространяется только в одном направлении.
- Б. Световая волна поперечная.
- В. Вектор  $E$  имеет одну ориентацию.
- Г. Вектор  $H$  имеет одну ориентацию.
- Д. Световые лучи распространяются во взаимно перпендикулярных направлениях.

Варианты ответа:

1. только В и Г;
2. только Б и Г;
3. только А и В;
4. только В и Д;
5. только Б и В.

18. Что общего и в чем различия фотоэффекта и эффекта Комптона?

- А. В обоих эффектах происходит взаимодействие фотона с электроном.
- Б. В эффекте Комптона происходит рассеяние фотонов на электроны.
- В. В фотоэффекте происходит поглощение фотонов.
- Г. Эффект Комптона наблюдается в видимом диапазоне электромагнитного спектра.
- Д. Фотоэффект наблюдается для всех длин электромагнитных волн.

Варианты ответа:

1. А, В и Д;
2. Б, В и Г;
3. А, Б и В;
4. В, Г и Д;
5. Б, Г и Д.

19. Свет длиной волны 500 нанометров падает перпендикулярно на дифракционную решетку, имеющую 2000 штрихов на один сантиметр. Значение угла, на котором наблюдается дифракционный максимум первого порядка, наиболее близко к:

Варианты ответа:

1. 0,15;
2. 0,25;
3. 0,10;

4. 0,05;
5. 0,20.

**20.** Световые волны могут быть поляризованы, а звуковые волны в газе – нет. Укажите наилучшее объяснение этому факту.

Варианты ответа:

1. световые волны поперечные, тогда как звуковые волны продольные;
2. для световых волн наблюдается эффект Доплера, а для звуковых нет;
3. световые волны имеют более высокую частоту, чем звуковые;
4. световые волны распространяются при более высоких скоростях, чем звуковые;
5. световые волны имеют более короткую длину волны, чем звуковые.

**21.** Какие факторы влияют на величину угла поворота плоскости поляризации света, проходящего через раствор оптически активного вещества?

- А. Концентрация раствора.
- Б. Длина волны света.
- В. Длина пути в растворе.
- Г. Интенсивность света.
- Д. Химический состав раствора.

Варианты ответа:

1. все эти факторы;
2. только А и В;
3. только А и Б;
4. только В и Г;
5. только А, Б и В;

**22.** Какая из указанных частиц, если они все двигаются с одинаковой скоростью, обладает наибольшей длиной волны де Бройля?

Варианты ответа:

1. протон;
2. нейтрон;
3. позитрон;
4. длина волны у всех перечисленных частиц одинакова;
5. альфа – частица.

**23.** Укажите верное утверждение. Ширина запрещенной зоны у полупроводника...

Варианты ответа:

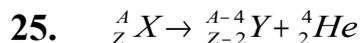
1. меньше, чем у диэлектрика;
2. больше, чем у диэлектрика;
3. увеличивается при нагревании;
4. на 2 порядка больше, чем у диэлектрика;
5. такая же, как у диэлектрика.

**24.** Укажите неверное утверждение:

Варианты ответа:

1. эффект Комптона можно наблюдать при рассеянии видимого света;
2. в теории эффекта Комптона взаимодействие фотона и электрона

- рассматривается как упругий удар;
- при комптоновском рассеянии появляются электроны отдачи;
  - изменение длины волны при комптоновском рассеянии зависит только от угла рассеяния;
  - в эффекте Комптона наибольший угол рассеяния  $\pi$ .



Приведенное превращение характеризует...

Варианты ответа:

- электронный захват;
- бета-минус – распад;
- бета-плюс – распад;
- ядерную реакцию;
- альфа – распад.

### ВАРИАНТ 2

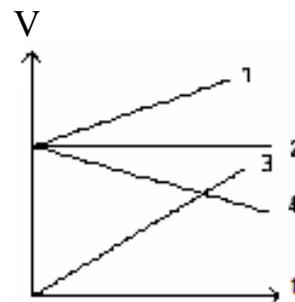
- Пятикилограммовый камень падает на гвоздь и забивает его на глубину 0,025 метра в дерево. Если камень в момент удара о гвоздь двигался со скоростью 10 метров в секунду, то средняя сила, действующая на гвоздь со стороны камня, когда гвоздь входит в дерево, наиболее близка к значению:

Варианты ответа:

- 100000 Н;
  - 10000 Н;
  - 1000 Н;
  - 10 Н;
  - 100 Н.
- Задан график зависимости скорости тела от времени. Тело 1 движется...

Варианты ответа:

- равнозамедленно ;
- равноускоренно из состояния покоя;
- равномерно;
- с переменным ускорением;
- равноускоренно с начальной скоростью.



- Приведенную длину физического маятника увеличили в 2 раза. Как изменилась частота колебаний маятника?

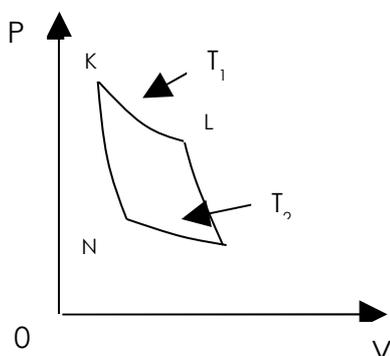
Варианты ответа:

- увеличилась в  $\sqrt{2}$  раз;
- уменьшился в  $\sqrt{2}$  раз;
- уменьшилась в 2 раза;
- увеличилась в 2 раза;

5. увеличилась в 4 раза.
4. Укажите условия сохранения момента импульса в системе:
- А. Замкнутость системы.
  - Б. Консервативность взаимодействий.
  - В. Неизменность скорости частиц.
  - Г. Постоянство массы частиц.

Варианты ответа:

- 6. только А и Б;
  - 7. только А;
  - 8. только А, Б и В;
  - 9. только Б;
  - 10. все эти условия.
5. Для кругового процесса, изображенного на рисунке, KL и MN – изотермы, а KN и LM – адиабаты.



Система совершает цикл Карно KLMN, получая количество теплоты  $Q_1$  от нагревателя при температуре  $T_1$  и отдавая количество теплоты  $Q_2$  холодильнику при температуре  $T_2$ . Все следующие утверждения верны за исключением:

Варианты ответа:

- 1. к.п.д цикла не зависит от природы рабочего тела;
  - 2. энтропия системы возрастает;
  - 3. выполненная работа равна  $Q_1 - Q_2$ ;
  - 4. энтропия нагревателя уменьшается;
  - 5.  $Q_1/T_1 = Q_2/T_2$ .
6. Удельная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении  $C_p$  больше, чем удельная теплоемкость при постоянном объеме  $C_v$  из-за того, что:

Варианты ответа:

- 1. необходимое количество теплоты при постоянном объеме больше, чем при постоянном давлении;
- 2. увеличение внутренней энергии газа при постоянном давлении больше, чем при постоянном объеме;
- 3. количество теплоты, подводимое для нагревания на один градус, одинаково как для процессов, в которых остается постоянным давление, так и для процессов, в которых остается постоянным объем;
- 4. при  $p = \text{const}$  нагреваемый газ расширяется и часть подводимой теплоты расходуется на совершение работы над внешними телами;

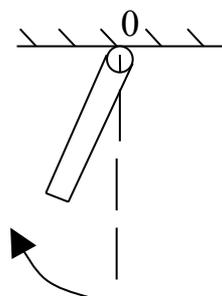
5. давление газа остается постоянным, когда его температура остается постоянной.

7. Как изменится концентрация идеального газа в зависимости от температуры при изобарическом процессе?

Варианты ответа:

1. убывает обратно пропорционально  $T$ ;
2. линейно возрастает;
3. линейно убывает;
4. возрастает пропорционально  $T^2$ ;
5. убывает обратно пропорционально  $T^2$ .

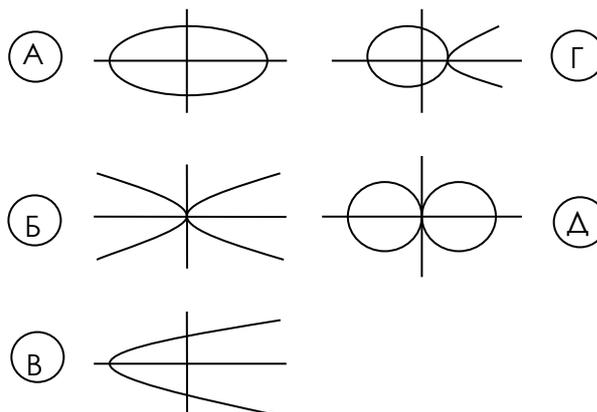
8. На рисунке показан стержень, совершающий колебательное движение. Как направлен момент силы тяжести относительно т. О?



Варианты ответа:

1. к нам;
2. вниз;
3. от нас;
4. влево;
5. вверх.

9. На рисунках показаны поперечные стоячие волны, которые могут возникать в упругом стержне. Какие стоячие волны могут возникнуть в стержне с обоими закрепленными концами?



Варианты ответа:

1. В и Г;
2. Б, Г и Д;
3. А и Д;
4. А, Б и В;
5. Б и Д.

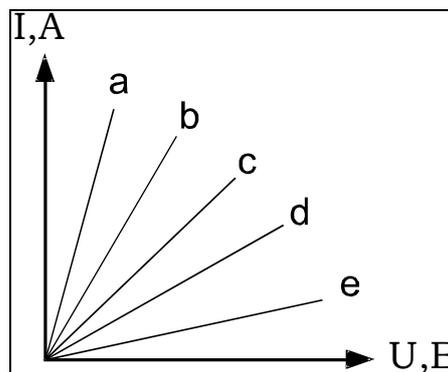
10. Как изменяются электрические сопротивления металлов и полупроводников при повышении температуры?

Варианты ответа:

1. увеличивается у металлов и полупроводников;
2. уменьшается у металлов и полупроводников;
3. увеличивается у металлов, уменьшается у полупроводников;
4. уменьшается у металлов и увеличивается у полупроводников;

5. не изменяется ни у металлов, ни у полупроводников.

11. На рисунке приведены вольт-амперные характеристики участков цепи с разными сопротивлениями. Какая линия соответствует участку с наибольшим сопротивлением?



Варианты ответа:

1. a;
2. b;
3. c;
4. d;
5. e;

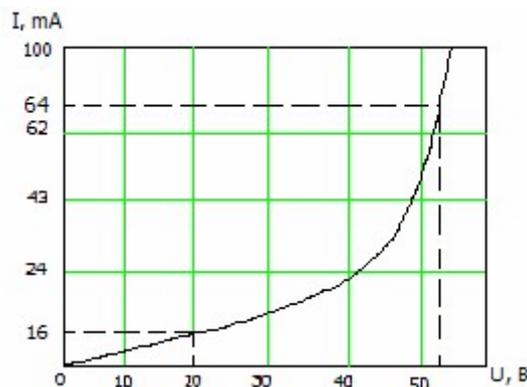
12. Плоский конденсатор между обкладками содержит диэлектрик. Конденсатор подключили к источнику напряжения, а затем удалили диэлектрик. Что при этом произошло?

- А. Напряжение на обкладках уменьшилось.
- Б. Емкость конденсатора уменьшилась.
- В. Напряженность поля увеличилась.
- Г. Заряд на обкладках уменьшился.

Варианты ответа:

1. А, Б, В и Г;
2. только В и Г;
3. только А и Б;
4. Б, В и Г;
5. только Б и Г.

13. На рисунке показана вольт-амперная характеристика некоторой цепи. Чему примерно равна мощность, потребляемая цепью, при напряжении 30В?



Варианты ответа:

1. 1.0 Вт;
2. 1000 Вт;
3. 30 Вт;
4. 0.35 Вт;
5. 3.0 Вт.

14. Отрицательный заряд движется вблизи длинного прямого провода, по которому течет электрический ток. На заряд будет действовать сила, направленная к проводу, если заряд движется в направлении:

Варианты ответа:

1. от провода;
2. противоположном току;

3. совпадающем с вектором магнитной индукции магнитного поля провода;
  4. по направлению тока;
  5. к проводу.
15. У длинной однослойной катушки убрали  $1/3$  витков. В результате коэффициент самоиндукции катушки:

Варианты ответа:

1. увеличился в 1.50 раза;
  2. уменьшился в 2.25 раза;
  3. уменьшился в 1.50 раза;
  4. не изменился;
  5. увеличился в 2.25 раза.
16. Укажите факторы, влияющие на то, что нить лампы накаливания чаще всего перегорает при накаливании.
- А. С течением времени из-за испарения вольфрама уменьшается сечение нити.
  - Б. У холодной нити сопротивление меньше и по ней проходит большой ток.
  - В. Теплота, выделяющаяся в проводнике при неизменном напряжении, пропорциональна силе тока.
  - Г. При включении происходит скачок напряжения на нити.

Варианты ответа:

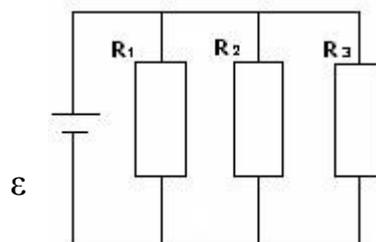
1. только А и Б;
  2. только А;
  3. только Б и В;
  4. только А и В;
  5. только Б.
17. Электрический потенциал на поверхности куба постоянен и равен  $U$ . Если внутри куба нет зарядов, то потенциал в его центре равен:

Варианты ответа:

1. 0;
  2.  $U$ ;
  3.  $U/6$ ;
  4.  $U/2$ ;
  5.  $U/8$ .
18. На каком из сопротивлений наибольшая мощность, если  $R_1 > R_2 > R_3$ ?

Варианты ответа:

1. на всех одинаковая;
2. для ответа недостаточно данных;
3. на  $R_1$ ;



4. на  $R_2$ ;
5. на  $R_3$ .

19. Что происходит за анализатором при его вращении вокруг направления распространения плоско-поляризованного луча?

- А. Интенсивность света не меняется.
- Б. Изменяется ориентация плоскости колебаний света, выходящего из анализатора.
- В. Интенсивность света меняется в пределах от  $J_{\min}$  до  $J_{\max}$ .
- Г. За анализатором  $J=J_0\cos^2\varphi$ .

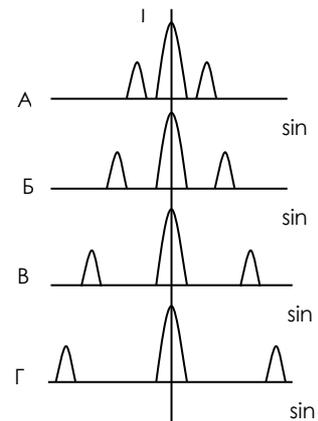
Варианты ответа:

1. Б и Г;
2. А и Г;
3. Б и В;
4. А и Б;
5. В и Г.

20. Имеются 4 решетки с различными постоянными, освещаемые одним и тем же монохроматическим излучением. Какой рисунок иллюстрирует положение главных максимумов, создаваемых решеткой с наименьшей постоянной  $d$ ?

Варианты ответа:

1. Г;
2. А;
3. для ответа недостаточно информации;
4. Б;
5. В.



21. Как изменится интерференционная картина на экране, если источники света  $S_1$  и  $S_2$  будут испускать свет с меньшей длиной волны?

Варианты ответа:

1. увеличится ширина интерференционных полос;
2. уменьшится интенсивность полос;
3. нет верного ответа;
4. увеличится интенсивность полос;
5. уменьшится ширина интерференционных полос.

22. Если  $a$  – есть поглощательная способность поверхности для солнечного света, а  $r$  – испускательная способность этой поверхности, то для того, чтобы относительно мало нагревается на солнечном свету, поверхность должна иметь:

Варианты ответа:

1. малое значение  $(a/r)$ ;
2. значение  $(ar)=1$ ;
3. большое значение  $(ar)$ ;
4. большое значение  $(a/r)$ ;
5. малое значение  $(ar)$ .

23. Соотношение неопределенностей Гейзенберга указывает на:

- А. Несовершенство измерительных приборов.
- Б. Границу применимости классических понятий.
- В. Отсутствие причинности в микромире.
- Г. Наличие волновых свойств у частиц.

Варианты ответа:

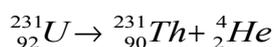
1. только Б и Г;
2. только В и Г;
3. верны все утверждения;
4. только А и Б;
5. только А и В.

24. В атоме орбитальное квантовое число  $L$  может принимать значения:

Варианты ответа:

1.  $\pm 1/2$ ;
2. 1, 2, 3, ...
3. 0,  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ , ...,  $\pm 1$ ;
4. 0, 1, 2, ...,  $n-1$ ;
5.  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ,  $\pm 3$ .

25. Покоящееся ядро урана испускает ядро гелия, превращаясь в ядро тория.



Какое из следующих утверждений верно?

Варианты ответа:

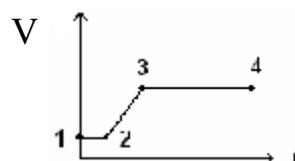
1. оба продукта распада имеют одинаковую кинетическую энергию;
2. оба продукта распада имеют одинаковую скорость;
3. ядро гелия имеет большую кинетическую энергию, чем ядро тория;
4. ядро тория имеет больший импульс, чем ядро гелия;
5. продукты распада движутся в одном направлении.

### ВАРИАНТ 3

1. На рисунке представлена зависимость скорости движущегося тела от времени. На каких участках действующие на тело силы уравновешены?

Варианты ответа:

1. только на участке 1-2;



2. на участке 2-3;
3. только на участке 3-4;
4. на участках 1-2 и 3-4;
5. на всех перечисленных участках силы действующие на тело, уравновешены.

2. Какая физическая величина определяет воздействие одного тела на другое, является скоростью изменения импульса?

Варианты ответа:

1. скорость;
2. ускорение;
3. сила;
4. давление;
5. среди перечисленных ответов нет правильного.

3. При вращении твердого тела вокруг неподвижной оси  $OZ$  момент внешних сил  $M_z$  относительно оси вращения зависит от ...

- А. Момент инерции  $J_z$  тела относительно той же оси.
- Б. Точки приложения силы.
- В. Углового ускорения тела.
- Г. Направления силы.

Варианты ответа:

1. только от А и В;
2. только от А и Б;
3. только от Б, В и Г;
4. только от В и Г;
5. только от Б и Г.

4. Человек, стоящий на вращающейся скамейке Жуковского, повернул вертикально расположенный в руках стержень в горизонтальное положение. В результате этого:

- А. Увеличится момент инерции системы.
- Б. Увеличится угловая скорость.
- В. Момент импульса системы не изменится.
- Г. Увеличится кинетическая энергия системы.

Варианты ответа:

1. только А, Б и Г;
2. только В;
3. только Б и Г;
4. только А и В;
5. только А.

5. Известно, что при замерзании воды трещины в трубах возникают всегда вдоль трубы. Укажите факторы, которые могут быть причиной этого явления.

- А. Поперек трубы действует сила на единицу длины меньшая, чем вдоль трубы.
- Б. При изготовлении труб возникают остаточные напряжения,

создающие трещины вдоль трубы.

В. Давление в жидкостях и газах передается во все стороны.

Варианты ответа:

1. только А;
2. только А и Б;
3. только В;
4. только А и В;
5. только Б.

6. Газ совершает работу А и ему передано количество теплоты Q. Чему равно изменение внутренней энергии газа?

Варианты ответа:

1.  $\Delta U = A$ ;
2.  $\Delta U = Q$ ;
3.  $\Delta U = A + Q$ ;
4.  $\Delta U = Q - A$ ;
5. среди перечисленных ответов нет правильного.

7. В двух сосудах при комнатной температуре хранится по 1 молю газа. В первом сосуде газ состоит из одноатомных молекул, а во втором – из двухатомных. Каково отношение молярных теплоемкостей этих газов при постоянном объеме  $C_v(1)/C_v(2)$ ?

Варианты ответа:

1. 3/5;
2. 5;
3. 2/1;
4. 1/1;
5. 5/3.

8. Известно, что пуля может пробить в пустом стакане только два маленьких отверстия, в то время как наполненный водой стакан пуля разбивает вдребезги. Укажите факторы, которые могут быть причиной этого явления.

А. За время входа пули в стакан уровень воды не успеваает измениться.

Б. В месте входа пули вода сжимается и возникает область высокого давления.

В. Давление в жидкостях и газах передается во все стороны.

Г. Вода оказывает большее сопротивление движению пули, чем воздух.

Варианты ответа:

1. только А, Б и В;
2. только Б и В;
3. только Б, В и Г;
4. только В и Г;
5. все эти факторы.

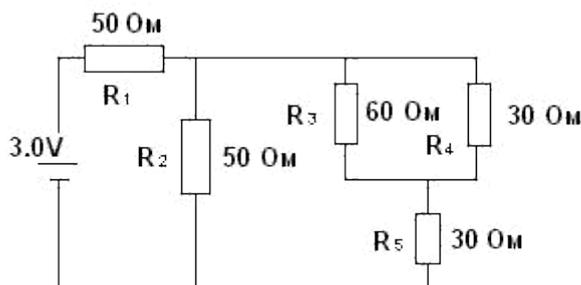
9. Маятник настенных механических часов представляет собой легкий стержень с грузиком. Для регулировки точности хода часов грузик можно перемещать по стержню. Как изменится период колебаний маятника, если грузик переместить с конца стержня на середину?

Варианты ответа:

1. увеличится в 4 раза;
  2. уменьшится в  $\sqrt{2}$  раз;
  3. увеличится в 2 раза;
  4. увеличится в  $\sqrt{2}$  раз;
  5. уменьшится в 2 раза.
10. При комнатной температуре сопротивления резисторов из полупроводника и металла оказались одинаковыми. Когда эти резисторы нагрели, их сопротивления изменились. Какое утверждение относится к полупроводниковому резистору?

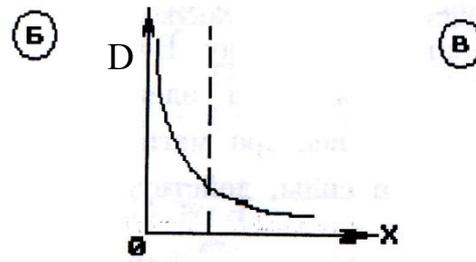
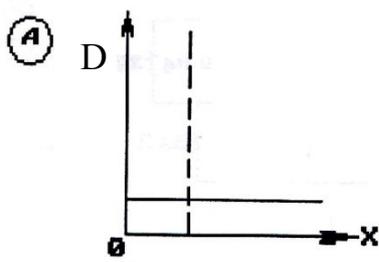
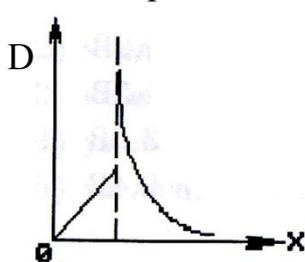
Варианты ответа:

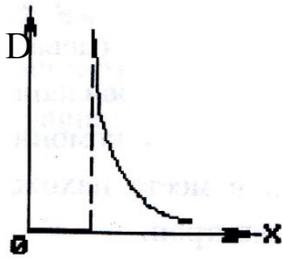
1. удельная электропроводность увеличилась;
  2. сопротивление менялось как линейная функция температуры;
  3. удельное сопротивление увеличилось;
  4. концентрация носителей заряда не изменилась;
  5. длина свободного пробега электронов возросла.
11. В цепи, показанной на рисунке, сопротивления даны в омах, а батарея предполагается идеальной (с внутренним сопротивлением равным нулю) с э.д.с.  $\varepsilon = 3$  В. Сопротивление, при котором рассеивается наибольшая мощность.



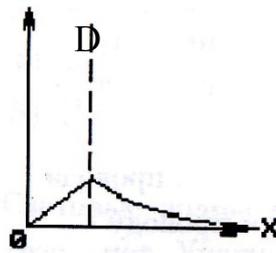
Варианты ответа:

1.  $R_5$ ;
  2.  $R_2$ ;
  3.  $R_1$ ;
  4.  $R_3$ ;
  5.  $R_4$ .
12. Укажите график зависимости вектора электрической индукции  $D$  от расстояния для равномерно заряженного по объему диэлектрического шара.





Г



Д

Варианты ответа:

1. Д;
2. Б;
3. А;
4. В;
5. Г.

13. Круглая плоская катушка радиусом 20 см содержит 12 витков провода. Магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости катушки, меняется со скоростью 0,02 Тл/с. Возникающая при этом ЭДС наиболее близка к ...

Варианты ответа:

1. 0,01В;
2. 0,03В;
3. 0,30В;
4. 0,80В;
5. 0,13В.

14. При комнатной температуре сопротивления резисторов из двух различных полупроводниковых материалов оказались одинаковыми. Когда эти резисторы нагрели, то сопротивление первого из них стало меньше второго ( $R_1 < R_2$ ). Укажите причину этого явления.

Варианты ответа:

1. ширина валентной зоны второго материала больше;
  2. в первом резисторе применен материал с меньшей шириной запрещенной зоны;
  3. уровень Ферми для второго резистора сместился вниз;
  4. ширина зоны проводимости первого материала больше;
  5. энергия активации носителей заряда во втором резисторе больше.
15. Воздушный конденсатор с параллельными пластинами заряжен, а затем отсоединен от батареи. Ввод диэлектрика в конденсатор приведет:

Варианты ответа:

1. к уменьшению заряда на пластинах конденсатора;
2. к увеличению заряда на пластинах конденсатора;
3. не повлияет на заряд и напряжение конденсатора;
4. к увеличению напряжения между пластинами;
5. к уменьшению напряжения между пластинами.

16. При включении тока в цепи его величина в некотором проводнике возрастала линейно и за 2 секунды достигла 6 А. Сопротивление проводника 20 Ом. Количество теплоты, выделившееся в проводнике за это время, наиболее близко к ...

Варианты ответа:

1. 720 Дж;
  2. 240 Дж;
  3. 480 Дж;
  4. 360 Дж;
  5. 960 Дж.
17. Маятник из молекул, имеющий дипольный магнитный момент  $p_m$ , помещен в однородное магнитное поле. Что произойдет с дипольными моментами молекул?

Варианты ответа:

1. они ориентируются против поля;
  2. они ориентируются по полю;
  3. их ориентация не изменится;
  4. они сориентируются перпендикулярно полю;
  5. нет верного ответа.
18. Укажите утверждения, которые определяют явление дифракции света.
- А. Любое отклонение при распространении света от законов геометрической оптики
  - Б. Пространственное перераспределение интенсивности света при наложении двух или нескольких когерентных волн.
  - В. Огибание волнами препятствий и захождение их в область геометрической тени.
  - Г. Зависимость фазовой скорости световой волны от ее частоты (длины волны).
  - Д. Зависимость показателя преломления вещества от частоты (длины волны) падающего света.

Варианты ответа:

1. А и В;
  2. А и Б;
  3. А и Г;
  4. А и Д;
  5. Г и Д.
19. Монохроматический свет с длиной волны  $\lambda$  нормально падает на тонкую пленку с показателем преломления  $n > 1$ . Какую минимальную толщину должна иметь пленка, чтобы в отраженном свете казаться светлой?

Варианты ответа:

1.  $\lambda/8$ ;
2.  $\lambda$ ;
3.  $\lambda/2$ ;

4.  $\lambda/4$ ;

5.  $2\lambda$ .

20. Что происходит при вращении поляризатора вокруг направления распространения естественного луча?

А. За поляризатором  $J = J_{ест}$ .

Б. Изменяется ориентация плоскости колебаний света, выходящего из прибора.

В. Наблюдается изменение интенсивности в пределах от  $J_{max}$  до  $J_{min}$ .

Г. Интенсивность света, прошедшего через поляризатор, остается одной и той же, равной  $J = \frac{1}{2} J_{ест}$ .

Варианты ответа:

1) только В;

2) А и Б;

3) Б и Г;

4) только Г;

5) только А.

21. От каких свойств среды зависит скорость света в данной среде?

А. От плотности.

Б. От температуры.

В. От магнитных свойств.

Г. От давления.

Д. От электрических свойств.

Варианты ответа:

1. Б и Д;

2. В и Г;

3. А и Б;

4. В и Д;

5. А, В и Д.

22. Укажите утверждения, которые определяют явление дисперсии света.

А. Любое отклонение при распространении света от законов геометрической оптики.

Б. Пространственное перераспределение интенсивности света при наложении двух или нескольких когерентных волн.

В. Огибание волнами препятствий и захождение их в область геометрической тени.

Г. Зависимость фазовой скорости световой волны от ее частоты (длины волны).

Д. Зависимость показателя преломления вещества от частоты (длины волны) падающего света.

Варианты ответа:

1. А и В;
2. А и Д;
3. А и Б;
4. Г и Д;
5. А и Г.

23. К чему приведет в явлении фотоэффекта уменьшение длины волны света?

Варианты ответа:

1. сместится красная граница фотоэффекта;
2. увеличится скорость фотоэлектронов;
3. уменьшится фототок;
4. ничего не изменится.

24. Какая из указанных частиц, если они все двигаются с одинаковой скоростью, обладает наибольшей длиной волны де Бройля?

Варианты ответа:

1. протон;
2. нейтрон;
3. позитрон;
4. длина волны у всех перечисленных частиц одинакова;
5. альфа – частицы.

25.  ${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow X + {}^{10}_5\text{B}$

В данной реакции частица X - это...

Варианты ответа

1. альфа – частица;
2. нейтрон;
3. электрон;
4. протон;
5. позитрон.

#### ВАРИАНТ 4

1. Точка движется по закону  $\mathbf{r} = t^2 \mathbf{i} + 2t \mathbf{j} + (t^3 - 1) \mathbf{k}$ . Это движение происходит под действием силы, которая параллельна...

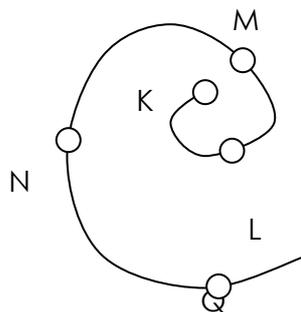
Варианты ответа:

1. плоскости XOZ;
2. плоскости YOZ;
3. оси OX;
4. плоскости XOY;
5. оси OZ.

2. Точка движется с постоянным нормальным ускорением по траектории, показанной на рисунке. В какой точке траектории её скорость будет минимальна?

Варианты ответа:

1. Q
2. K
3. L
4. M
5. N



3. Укажите условия сохранения момента импульса в системе:
- A. Замкнутость системы.
  - Б. Консервативность взаимодействий.
  - В. Неизменность скорости частиц.
  - Г. Постоянство массы частиц.

Варианты ответа:

1. только А и Б;
  2. только А;
  3. только А, Б и В;
  4. только Б;
  5. все эти условия.
4. Молярная теплоемкость при постоянном объеме  $C_V$  для некоторого газа равна  $1.5 R$  ( $R$  – универсальная газовая постоянная). Сколько атомов содержит молекула этого газа? Считать, что атомы в молекуле колебаний не совершают.

Варианты ответа:

1. два;
  2. для ответа недостаточно данных;
  3. один;
  4. больше трех;
  5. три.
5. Величина силы тяготения, действующей на точечную массу со стороны Земли, равна  $F(r)$ , где  $r$  – расстояние от центра Земли до точечной массы. предполагается, что Земля – однородная сфера радиуса  $R$ . Чему равно отношение  $\frac{F(R)}{F(2 \cdot R)}$ ?

Варианты ответа:

1. 2;
2. 1;
3. 8;
4. 4;
5. 32.

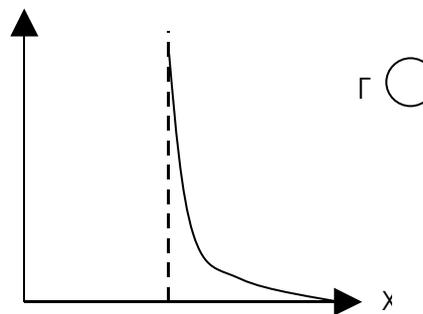
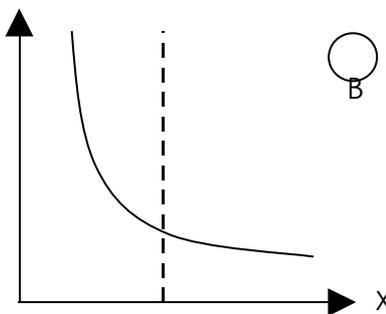
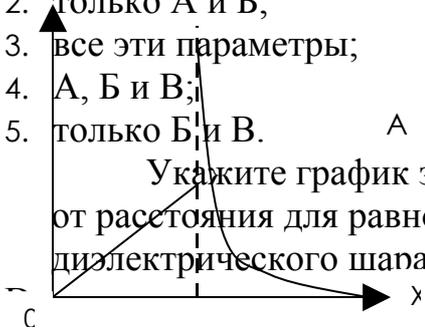
6. Адиабатическими процессами являются:
- А. Процессы без теплообмена между системой и окружающей средой.
  - Б. Все быстро протекающие процессы.
  - В. Процессы, при которых работа над окружающими телами совершается за счет изменения внутренней энергии системы.
  - Г. Процессы, уравнения которых имеют вид  $pV^\gamma = \text{const}$ , где  $p$  – давление,  $V$  – объем,  $\gamma$  – коэффициент Пуассона.

Варианты ответа:

1. все эти процессы;
  2. только Б и В;
  3. А, Б и В;
  4. только А;
  5. только А и Б.
7. Значение числа степеней свободы некоторого газа позволяет определить:
- А. Внутреннюю энергию одного моля газа при известной температуре.
  - Б. Энергию одной молекулы газа при известной температуре.
  - В. Молярную теплоемкость при  $p = \text{const}$  или  $V = \text{const}$ .
  - Г. Коэффициент Пуассона (показатель адиабаты) для данного газа.

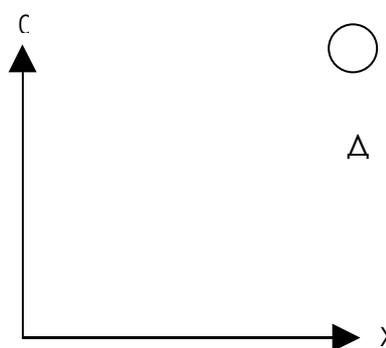
Варианты ответа:

1. только А;
  2. только А и Б;
  3. все эти параметры;
  4. А, Б и В;
  5. только Б и В.
8. Укажите график зависимости вектора электрической индукции  $D$  от расстояния для равномерно заряженного по объему диэлектрического шара.

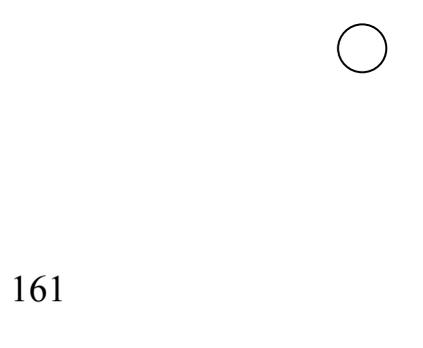


D

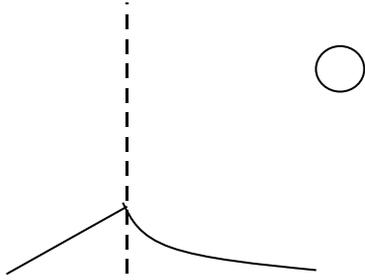
D



C



D



Варианты ответа:

1. Д;
2. Б;
3. А;
4. В;
5. Г.

9. Укажите факторы, влияющие на то, что нить лампы накаливания чаще всего перегорает при включении.

- А. С течением времени из-за испарения вольфрама уменьшается сечение нити.
- Б. У холодной нити сопротивление меньше и по ней проходит большой ток.
- В. Теплота, выделяющаяся в проводнике при неизменном напряжении, пропорциональна силе тока.
- Г. При включении происходит скачок напряжения на нити.

Варианты ответа:

1. только А и Б;
2. только А;
3. только Б и В;
4. только А и В;
5. только Б.
- 6.

10. Проводник диаметром 2 сантиметра содержит  $1 \cdot 10^{28}$  свободных электронов в каждом кубическом метре. Для электрического тока силой 100 А, скорость дрейфа свободных электронов в проводнике наиболее близка к

Варианты ответа:

1.  $6 \cdot 10^{-14}$  м/с;
2.  $5 \cdot 10^{-10}$  м/с;
3.  $5 \cdot 10^{-4}$  м/с;
4.  $8 \cdot 10^{-3}$  м/с;

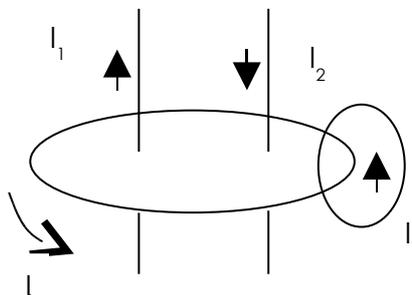
5.  $1 \cdot 10^{-19} \text{ М/с}$ .

11. Чему равна циркуляция вектора  $\mathbf{B}$  по замкнутому контуру  $L$ ?

( $\mu_0$  – магнитная постоянная)

Варианты ответа:

1.  $\mu_0(-I_1+I_2+I_3)$
2.  $\mu_0(I_1-I_2+I_3)$
3.  $\mu_0(I_1+I_2+I_3)$
4.  $\mu_0(-I_1-I_2-I_3)$
5.  $\mu_0(-I_1-I_2-I_3)$



12. От чего зависит оптическая разность хода световых волн при интерференции в тонкой пленке?

- А. От толщины пленки.
- Б. От показателя преломления пленки.
- В. От угла падения волны на пленку.
- Г. От амплитуды падающей волны.

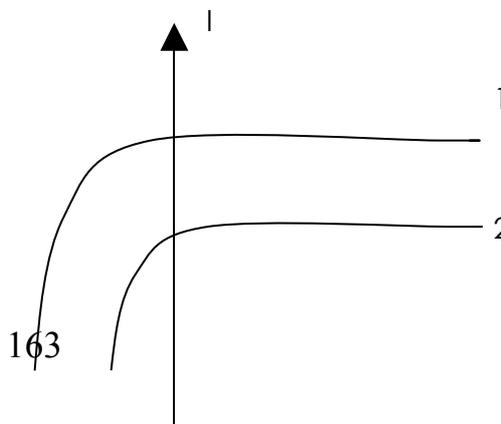
Варианты ответа:

1. только от Б и Г;
2. только от В и Г;
3. от А, Б и В;
4. от всех этих факторов;
5. только от А и Б.

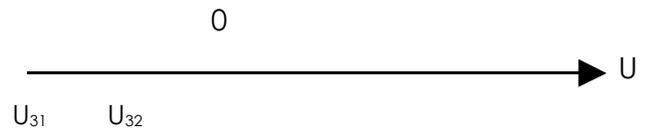
13. На рисунке изображены вольтамперные характеристики одного и того же фотоэлемента при различных условиях. Каким условиям соответствуют эти графики? ( $\nu$  – частота света,  $\Phi$  – световой поток)

Варианты ответа:

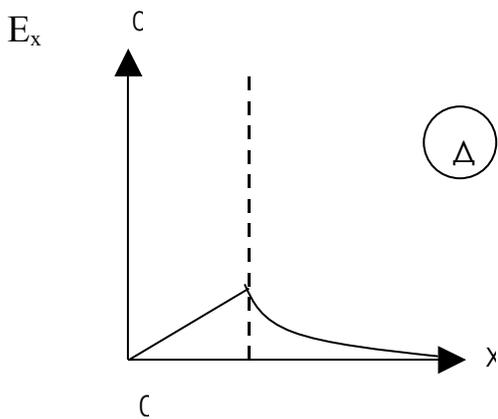
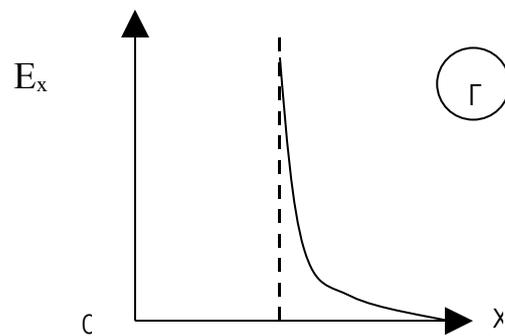
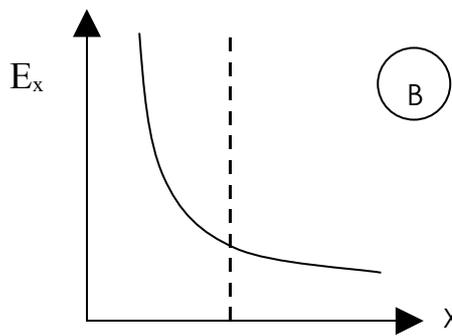
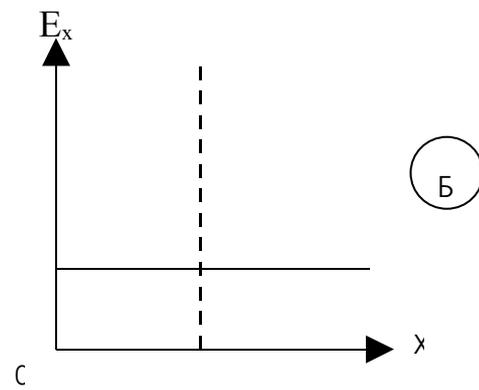
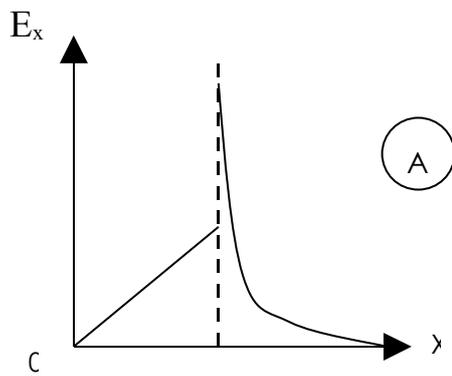
1.  $\nu_1 > \nu_2$ ;  $\Phi_1 > \Phi_2$ ;
2.  $\nu_1 > \nu_2$ ;  $\Phi_1 = \Phi_2$ ;
3.  $\nu_1 = \nu_2$ ;  $\Phi_1 > \Phi_2$ ;



4.  $v_1 < v_2; \Phi_1 = \Phi_2;$   
 5.  $v_1 < v_2; \Phi_1 < \Phi_2.$



14. Укажите график зависимости напряженности электрического поля от расстояния для бесконечной равномерно заряженной плоскости.



Варианты ответа:

1. Г;
2. А;
3. Б;
4. Д;
5. В.

15. Чему равно приведенное ниже выражение для электростатического поля в диэлектрике?

$$\int_1^2 E_1 dl =$$

А.  $= \int_V \rho dV$ .

В.  $= -grad\varphi$ .

Б.  $= \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \rho$ .

Г.  $= \varphi_1 - \varphi_2$ .

Д. Нуль.

Варианты ответа:

1. Д;
2. Б;
3. А;
4. Г;
5. В.

16. Отрицательный заряд движется вблизи длинного прямого провода, по которому течет электрический ток. На заряд будет действовать сила, направленная к проводу, если заряд движется в направлении:

Варианты ответа:

1. от провода;
2. в направлении, противоположном току;
3. перпендикулярно обоим направлениям: и направлению тока, и направлению от заряда к проводу;
4. в том же направлении, что и ток;
5. к проводу.

17. Сила Лоренца...

- А. Относится к классу гироскопических сил.
- Б. Изменяет направление скорости движения заряда.
- В. Изменяет величину скорости заряда.

Г. Сообщает заряду нормальное ускорение.

Варианты ответа:

1. Б и Г;
2. А, Б и Г;
3. Б, В и Г;
4. А и Б;
5. Б и В.

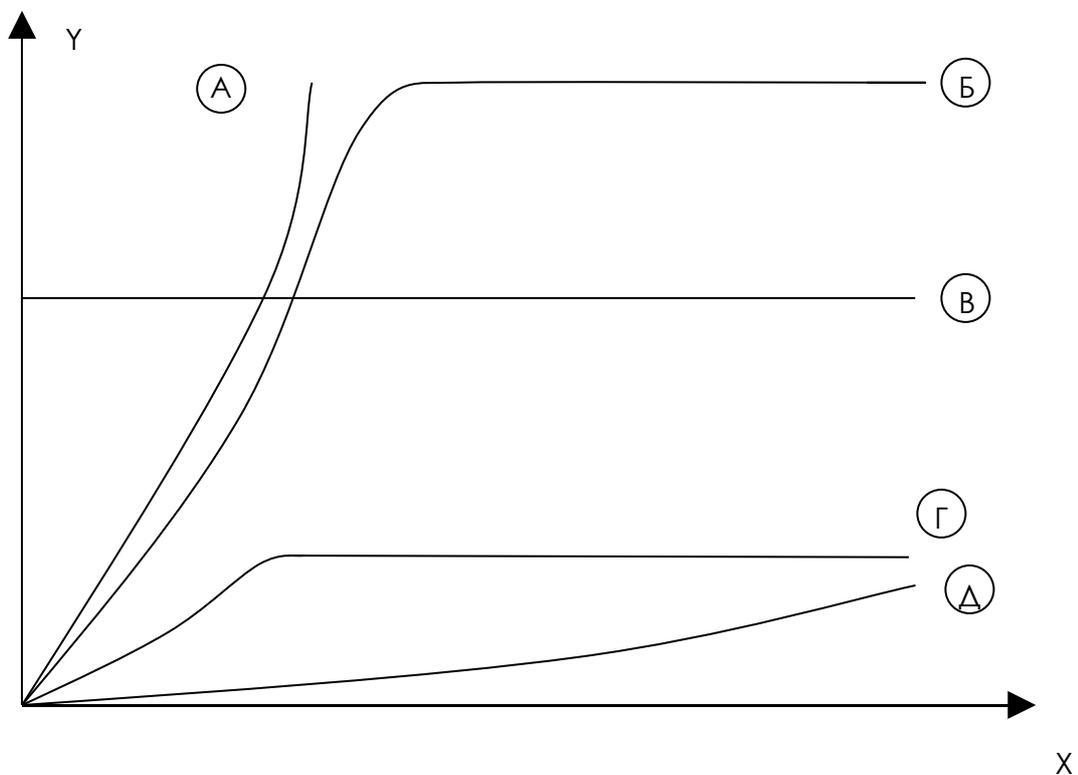
**18.** При комнатной температуре сопротивления резисторов из полупроводника и металла оказались одинаковыми. Когда эти резисторы нагрели, их сопротивления изменились. Какое утверждение относится к полупроводниковому резистору?

Варианты ответа:

1. удельная электропроводность увеличилась;
2. сопротивление изменилось как линейная функция температуры;
3. удельное сопротивление увеличилось;
4. концентрация носителей заряда не изменилась;
5. длина свободного пробега электронов возросла.

**19.** На рисунке по горизонтали отложена величина напряженности магнитного поля  $H$ , а по вертикали – величина намагниченности.

Какой из графиков будет соответствовать намагничиванию парамагнетика?

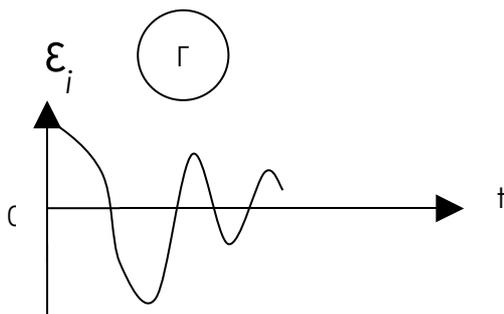
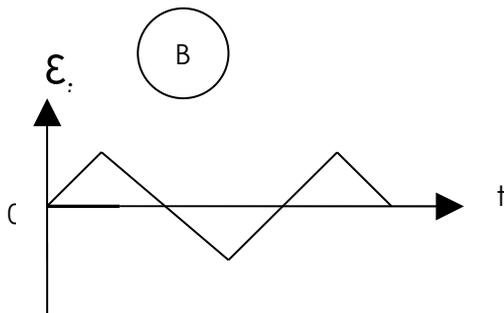
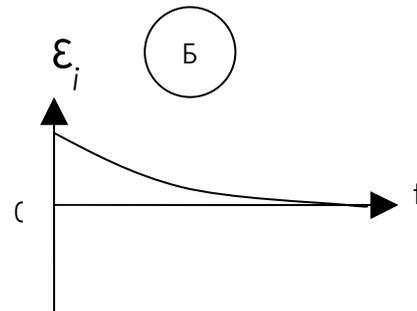
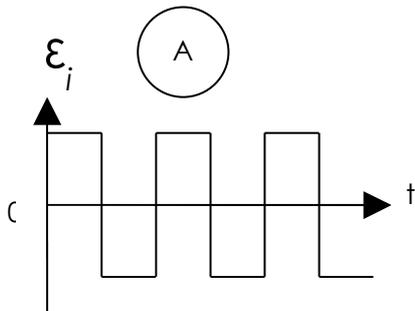
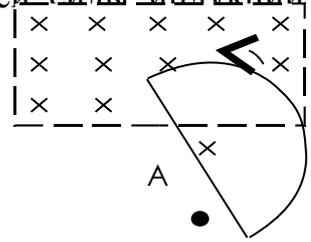


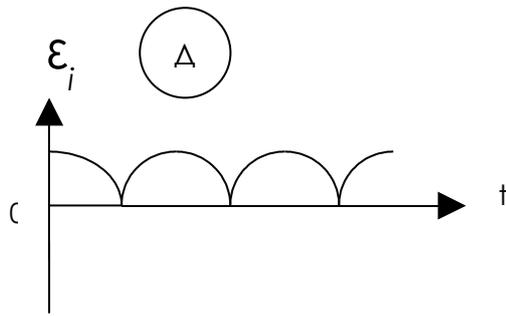
Варианты ответа:

1. В;

2. Б;
3. А;
4. Г;
5. Д.

20. Однородное магнитное поле  $B$  направлено от нас перпендикулярно плоскости рисунка и существует только в прямоугольной области (рисунок). Проволочный контур в форме полуокружности равномерно вращается против часовой стрелки в плоскости рисунка вокруг оси  $A$ , проходящей через середину диаметра на границе области поля. Какой из следующих графиков наилучшим образом описывает зависимость электродвижущей силы индукции от времени?





Варианты ответа:

1. график Д;
2. график В;
3. график А;
4. график Б;
5. график Г.

**21.** Как изменится интерференционная картина на экране, если источники света  $S_1$  и  $S_2$  будут испускать свет с меньшей длиной волны?

Варианты ответа:

1. увеличится число интерференционных полос;
2. уменьшится интенсивность полос;
3. уменьшится число интерференционных полос;
4. увеличится интенсивность полос;
5. уменьшится ширина интерференционных полос.

**22.** Укажите условия главных максимумов для дифракции Фраунгофера на дифракционной решетке.

Варианты ответа:

1.  $b \sin \varphi = \pm m \lambda$  ( $m=1,2,\dots$ );
2.  $d \sin \varphi = \pm (P/N) \lambda$  ( $P=1,2,\dots N-1,N+1,\dots 2N-1,2N+1\dots$ );
3.  $d \sin \varphi = \pm n \lambda$  ( $n=1,2,\dots$ );
4.  $\sin \varphi = 1,22 \lambda / D$ ;
5.  $b \sin \varphi = \pm (2m+1) \lambda / 2$  ( $m=1,2,\dots$ ).

**23.** Соотношение неопределенностей Гейзенберга указывает на:

- А. Несовершенство измерительных приборов.
- Б. Границу применимости классических понятий.
- В. Отсутствие причинности в микромире.
- Г. Наличие волновых свойств у микрочастиц.

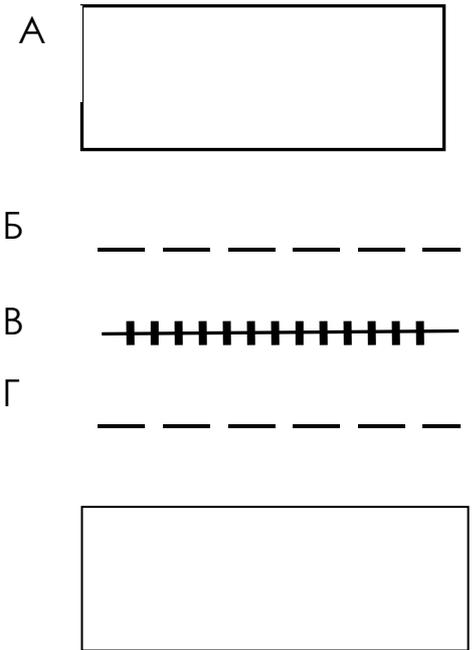
Варианты ответа:

1. только Б и Г
2. только В и Г
3. верны все эти утверждения
4. только А и Б
5. только А и В

24. На рисунке представлена схема энергетических зон полупроводника n-типа. Буква В обозначает:

Варианты ответа:

1. уровень Ферми для чистого полупроводника;
2. валентную зону;
3. уровень Ферми при 0 К;
4. зону проводимости;
5. донорный уровень.



25. Атомное ядро состоит:

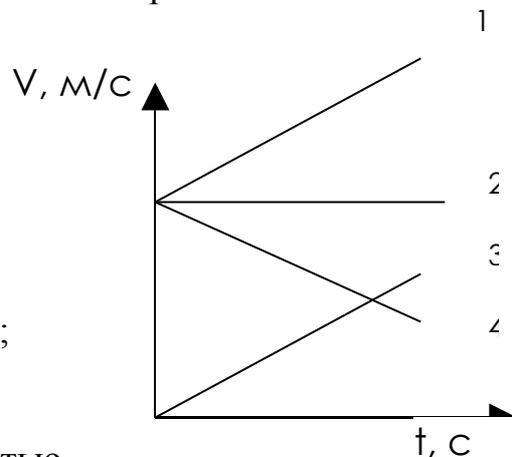
Варианты ответа:

1. из позитронов и нейтронов;
2. из электронов, протонов и нейтронов;
3. из электронов и протонов;
4. только из нейтронов;
5. из протонов и нейтронов.

### ВАРИАНТ 5

1. Задан график зависимости скорости тела от времени.

Тело 1 движется:

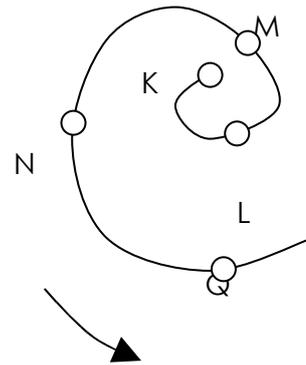


Варианты ответа:

1. равнозамедленно;
  2. равноускоренно из состояния покоя;
  3. равномерно;
  4. с переменным ускорением;
  5. равноускоренно с начальной скоростью.
2. Точка движется с постоянным нормальным ускорением по траектории, показанной на рисунке. В какой точке траектории её скорость будет максимальна?

Варианты ответа:

1. Q;
2. K;
3. L;
4. M;
5. N.



3. Момент инерции тела зависит от...

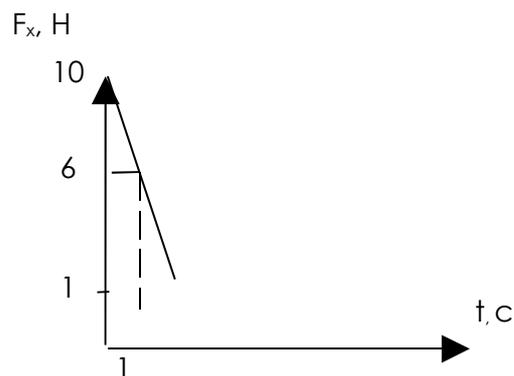
- A. Распределения массы перпендикулярно оси вращения.
- Б. Распределения массы параллельно оси вращения.
- В. Моменты силы.
- Г. Массы тела.
- Д. Формы тела.

Варианты ответа:

1. только от В и Г;
  2. только от А и Г;
  3. только от А и Б;
  4. только от А и В;
  5. только от Б, В и Г.
4. Сила, действующая на материальную точку массой 1 кг, меняется по закону, указанному на графике. Какую скорость приобретает точка при  $t_1=1\text{с}$ ? если  $V(0)=0$ ?  $F(0)=10\text{Н}$ ?  $F(t_1)=6\text{Н}$ ?

Варианты ответа:

1. 4 м/с
2. 1,5 м/с
3. 6 м/с
4. 8 м/с
5. 2 м/с



5. Потенциальная энергия тела, вынужденного двигаться по прямой линии, равна  $kx^4$ , где  $k$  – константа,  $x$  – координата. Сила, действующая на тело равна:

Варианты ответа:

1.  $-kx^4$ ;

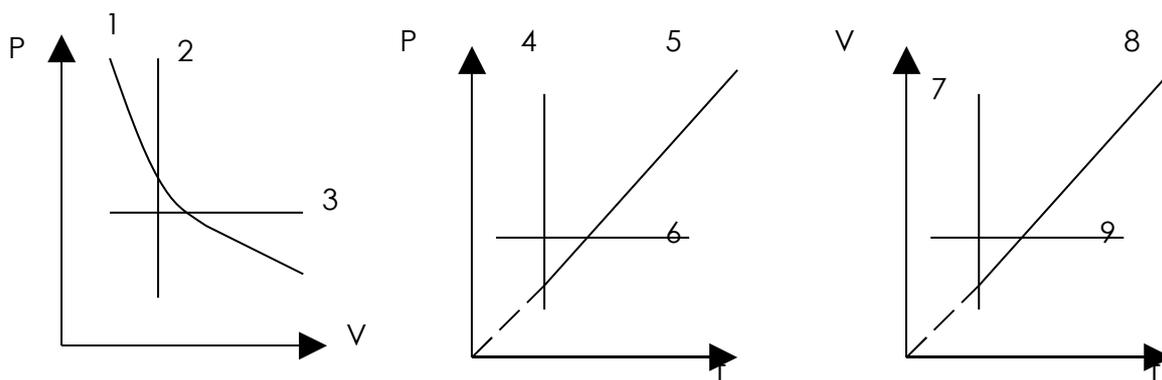
2.  $\frac{kx^5}{5}$ ;
3.  $4kx^3$ ;
4.  $-\frac{kx^5}{5}$ ;
5.  $-4kx^3$ .

6. В двух сосудах при комнатной температуре хранятся по одному моллю газа. В первом сосуде газ состоит из одноатомных молекул, а во втором – из трехатомных. Каково отношение внутренних энергий этих газов  $U_1/U_2$ ?

Варианты ответа:

1. 5/3;
2. 3/0;
3. 1/0;
4. S;
5. 3/5.

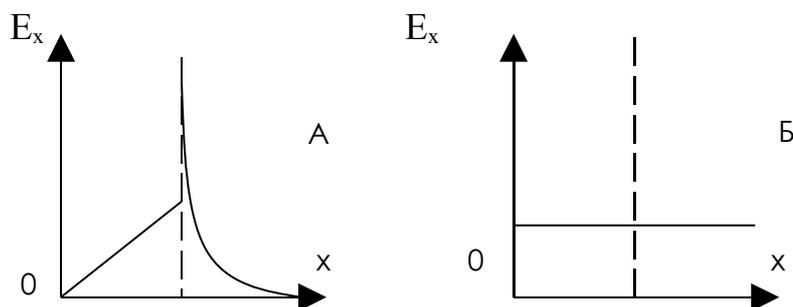
7. Какие графики на рисунках представляют изохорный процесс?

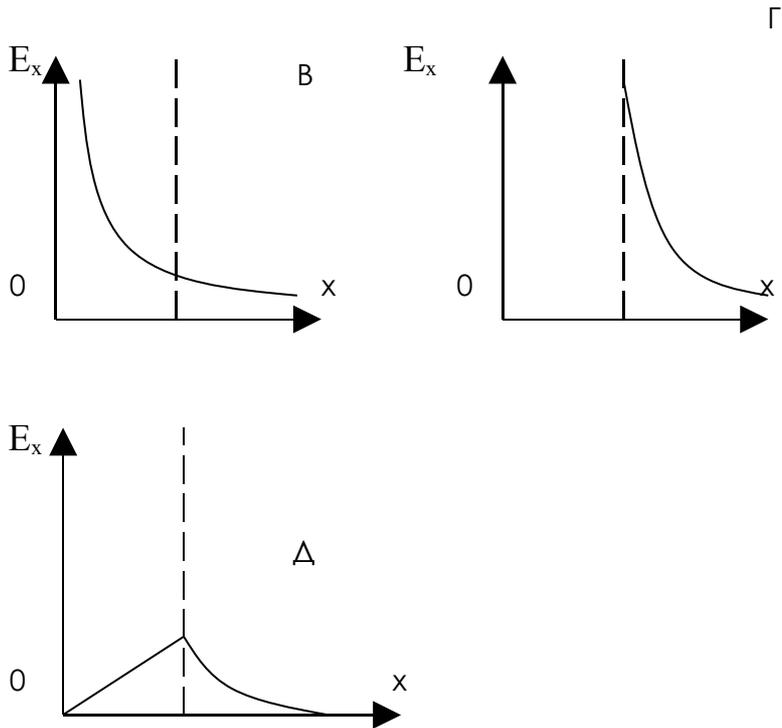


Варианты ответа:

1. графики 2, 4, 7;
2. графики 1, 4, 7;
3. графики 2, 5, 9;
4. графики 3, 6, 8;
5. графики 1, 2, 3.

8. Укажите график зависимости электрического поля от расстояния для равномерно заряженной длинной металлической трубки?

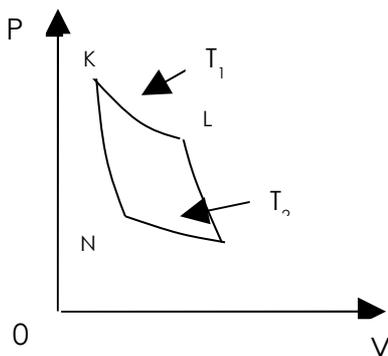




Варианты ответа:

1. Б;
2. Д;
3. А;
4. В;
5. Г.

9. Для кругового процесса, изображенного на рисунке, KL и MN – изотермы, а KN и LM – адиабаты.



Система совершает цикл Карно KLMN, получая количество теплоты  $Q_1$  от нагревателя при температуре  $T_1$  и отдавая количество теплоты  $Q_2$  холодильнику при температуре  $T_2$ . Все следующие утверждения верны за исключением:

Варианты ответа:

1. к.п.д цикла не зависит от природы рабочего тела;
2. энтропия системы возрастает;
3. выполненная работа равна  $Q_1 - Q_2$ ;
4. энтропия нагревателя уменьшается;
5.  $Q_1/T_1 = Q_2/T_2$ .

10. У длинной однослойной катушки убрали  $1/3$  витков. В результате коэффициент самоиндукции катушки:

Варианты ответа:

1. увеличился в 1.50 раза;
2. уменьшился в 2.25 раза;
3. уменьшился в 1.50 раза;
4. не изменился;
5. увеличился в 2.25 раза.

**11.** Маятник настенных механических часов представляет собой легкий стержень с грузиком. Для регулировки точности хода часов грузик можно перемещать по стержню. Как изменится период колебаний маятника, если грузик переместить с конца стержня на середину?

Варианты ответа:

1. увеличится в 4 раза;
2. уменьшится в  $\sqrt{2}$  раз;
3. увеличится в 2 раза;
4. увеличится в  $\sqrt{2}$  раз;
5. уменьшится в 2 раза.

**12.** Как изменится интерференционная картина на экране, если источники света  $S_1$  и  $S_2$  будут испускать свет с меньшей длиной волны?

Варианты ответа:

1. увеличится число интерференционных полос;
2. уменьшится интенсивность полос;
3. уменьшится число интерференционных полос;
4. увеличится интенсивность полос;
5. уменьшится ширина интерференционных полос.

**13.** Магнитная индукция  $B$  длинного прямолинейного проводника с током  $I$  на расстоянии  $r$  пропорциональна

Варианты ответа:

6.  $I/r$ ;
7.  $I \cdot r$ ;
8.  $I$ ;
9.  $I \cdot r^2$ ;
10.  $I/r^2$ .

**14.** От каких свойств среды зависит скорость света в данной среде?

- А. От плотности.
- Б. От температуры.
- В. От магнитных свойств.
- Г. От давления.
- Д. От электрических свойств.

Варианты ответа:

1. Б и Д;
2. В и Г;
3. А и Б;
4. В и Д;
5. А, В и Д.

15. При включении тока в цепи его величина в некотором проводнике возросла линейно и за 2 секунды достигла 6А. Сопротивление проводника 20 Ом. Количество теплоты, выделившееся в проводнике за это время, наиболее близко к...

Варианты ответа:

1. 720 Дж;
2. 240 Дж;
3. 480 Дж;
4. 360 Дж;
5. 960 Дж.

16. Электрический потенциал на поверхности куба постоянен и равен  $U$ . Если внутри куба нет зарядов, то потенциал в его центре равен...

Варианты ответа:

1. 0;
2.  $U$ ;
3.  $U/6$ ;
4.  $U/2$ ;
5.  $U/8$ .

17. Силовые линии однородного магнитного поля направлены слева направо в плоскости листа. Если электрон влетает в магнитное поле вдоль силовых линий, то он ...

Варианты ответа:

1. отклонится в плоскость листа;
2. отклонится из плоскости листа;
3. отклонится вверх;
4. отклонится вниз;
5. не испытает отклонения.

18. Укажите факторы, влияющие на то, что нить лампы накаливания чаще всего перегорает при включении.

- А. С течением времени из-за испарения вольфрама уменьшается сечение нити.
- Б. У холодной нити сопротивление меньше и по ней проходит большой ток
- В. Теплота, выделяющаяся в проводнике при неизменном напряжении, пропорциональна силе тока.
- Г. При включении происходит скачок напряжения на нити

Варианты ответа:

1. только А и Б;
2. только А;
3. только Б и В;
4. только А и В;
5. только Б.

19. Плоский вакуумный конденсатор присоединен к батарее с разностью потенциалов  $U_0$ .  $E_0$  – величина напряженности электрического поля,  $D_0$  – величина вектора электрического смещения.  $Q_0$  – заряд на пластинах конденсатора. Если конденсатор заполнить диэлектриком, то какое утверждение будет верным? (Электрические параметры в конечном состоянии обозначены индексом  $f$ ).

Варианты ответа:

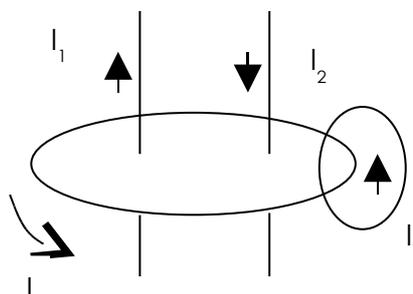
1.  $Q_f = Q_0$ ;
2.  $U_f < U_0$ ;
3.  $U_f > U_0$ ;
4.  $E_f > E_0$ ;
5.  $D_f > D_0$ .

20. Чему равна циркуляция вектора  $B$  по замкнутому контуру  $L$ ?

( $\mu_0$  – магнитная постоянная)

Варианты ответа:

1.  $\mu_0(-I_1+I_2+I_3)$
2.  $\mu_0(I_1-I_2+I_3)$
3.  $\mu_0(I_1+I_2+I_3)$
4.  $\mu_0(-I_1-I_2-I_3)$
5.  $\mu_0(-I_1-I_2-I_3)$



21. У длинной однослойной катушки убрали  $1/3$  витков. В результате коэффициент самоиндукции катушки:

Варианты ответа:

1. увеличился в 1.50 раза;
2. уменьшился в 2.25 раза;
3. уменьшился в 1.50 раза;
4. не изменился;
5. увеличился в 2.25 раза.

22. Если  $a$  – есть поглощательная способность поверхности для солнечного света, а  $r$  – испускательная способность этой поверхности, то для того, чтобы относительно мало нагреваться на солнечном свете, поверхность должна иметь:

Варианты ответа:

1. малое значение  $(a/r)$ ;
2. значение  $(ar)=1$ ;

3. большое значение ( $ar$ );
4. большое значение ( $a/r$ );
5. малое значение ( $ar$ ).

23. Соотношение неопределенностей Гейзенберга указывает на:

- А. Несовершенство измерительных приборов.
- Б. Границу применимости классических понятий.
- В. Отсутствие причинности в микромире.
- Г. Наличие волновых свойств у частиц.

Варианты ответа:

1. только Б и Г;
2. только В и Г;
3. верны все утверждения;
4. только А и Б;
5. только А и В.

24. Ниже приведены некоторые формулы ядерной физики. Формула Г определяет:

1.  $\tau = 1/\lambda$
2.  $dN = |\lambda N dt|$
3.  $A = |\lambda N|$
4.  $N = N_0 e^{-\lambda t}$
5.  $T = \frac{\ln 2}{\lambda}$

Варианты ответа:

1. период полураспада;
2. активность нуклида;
3. ни одну из всех перечисляемых величин;
4. среднее время жизни радиоактивного ядра;
5. закон радиоактивного распада.

25. В атоме орбитальное квантовое число  $L$  может принимать значения:

Варианты ответа:

6.  $\pm 1/2$ ;
7.  $1, 2, 3, \dots$
8.  $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm 1$ ;
9.  $0, 1, 2, \dots, n-1$ ;
10.  $\pm 1, \pm 2, \pm 3$ .

### ВАРИАНТ 6

1. Импульс материальной точки изменяется по закону  $\vec{p} = 2t\vec{i} + 3t^2\vec{j}$ .  
Как зависит модуль силы  $F$  от времени?

Варианты ответа:

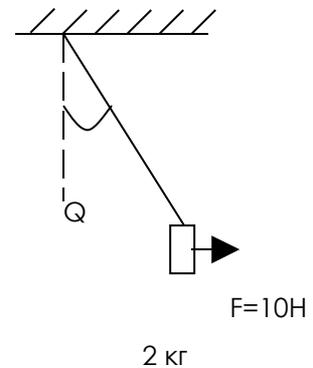
1.  $3\sqrt{1+t^2}$ ;

2.  $\sqrt{2+9t^2}$  ;
3.  $\sqrt{4+9t^2}$  ;
4.  $2\cdot\sqrt{1+9t^2}$  ;
5.  $\sqrt{4t^2+9t^4}$  ;

2. Двухкилограммовый ящик подвешен к потолку на невесомой нити. Под действием горизонтальной силы ящик медленно отклоняется в сторону до тех пор, пока значение силы не становится равным 10Н. В этот момент ящик приходит в состояние равновесия, как показано на рисунке. Угол, который образует нить с вертикалью, ближе всего к...

Варианты ответа:

1.  $\arcsin 20$ ;
2.  $\operatorname{arctg} 0.5$ ;
3.  $45^\circ$
4.  $\operatorname{arcctg} 2.0$ ;
5.  $\arcsin 0.5$ .



3. Потенциальная энергия тела, вынужденного двигаться по прямой линии, равна  $kx^4$ , где  $k$  – константа,  $x$  – координата. Сила, действующая на тело равна:

Варианты ответа:

1.  $-kx^4$ ;
2.  $\frac{kx^5}{5}$ ;
3.  $4kx^3$ ;
4.  $-\frac{kx^5}{5}$ ;
5.  $-4kx^3$ .

4. Момент импульса тела можно изменить если..

- А. Приложить момент силы
- Б. Изменить момент инерции
- В. Изменить угловую скорость
- Г. Перенести ось вращения

Варианты ответа:

1. только В и Г;
2. только Б, В, Г;
3. только А, Б, В;

4. только А;
5. всеми этими действиями.
5. Идеальным газом называется газ, у которого:
  - А. Одноатомные молекулы
  - Б. Молекулы не взаимодействуют друг с другом
  - В. Молекулы участвуют только в поступательном движении
  - Г. Размерами молекул можно пренебречь

Варианты ответа:

1. все эти свойства;
  2. только Б;
  3. только Г;
  4. Б, В и Г;
  5. только Б и Г.
6. В двух сосудах при комнатной температуре хранится по 1 молю газа. В первом сосуде газ состоит из одноатомных молекул, а во втором – из двухатомных. Каково отношение молярных теплоемкостей этих газов при постоянном объеме  $C_v(1)/C_v(2)$ ?

Варианты ответа:

1. 3/5;
  2. 5;
  3. 2/1;
  4. 1/1;
  5. 5/3.
7. Известно, что пуля может пробить в пустом стакане только два маленьких отверстия, в то время как наполненный водой стакан пуля разбивает вдребезги. Укажите факторы, которые могут быть причиной этого явления.
- А. За время входа пули в стакан уровень воды не успеваает измениться.
  - Б. В месте входа пули вода сжимается и возникает область высокого давления.
  - В. Давление в жидкостях и газах передается во все стороны.
  - Г. Вода оказывает большее сопротивление движению пули, чем воздух.

Варианты ответа:

1. только А, Б и В;
  2. только Б и В;
  3. только Б, В и Г;
  4. только В и Г;
  5. все эти факторы.
8. Плоский конденсатор между обкладками содержит диэлектрик. Конденсатор подключили к источнику напряжения, а затем удалили диэлектрик. Что при этом произошло?
- А. Напряжение на обкладках уменьшилось.

- Б. Емкость конденсатора уменьшилось.
- В. Напряженность поля увеличилась.
- Г. Заряд на обкладках уменьшился.

Варианты ответа:

1. А, Б, В и Г;
2. только В и Г;
3. только А и Б;
4. Б, В и Г;
5. только Б и Г.

9. Чему равно приведенное ниже выражение для напряженности электростатического поля в диэлектрике?

$$\oint_L E_1 dl =$$

А.  $\int \rho dV$  .

Б.  $\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \rho$  .

В.  $-\text{grad}\varphi$  .

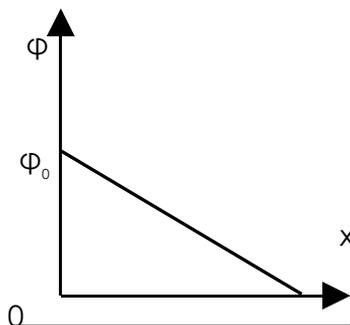
Г.  $\varphi_1 - \varphi_2$  .

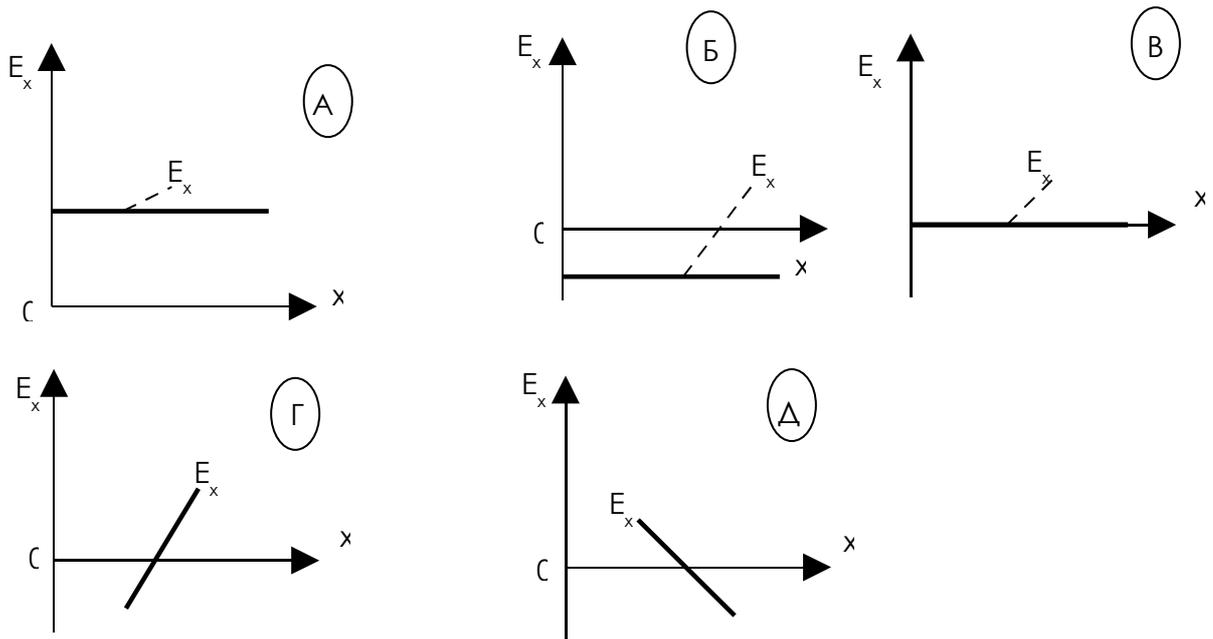
Д. Нуль .

Варианты ответа:

1. Б;
2. А;
3. Д;
4. Г;
5. В.

10. На рисунке представлен график зависимости потенциала электрического поля  $\varphi$  от расстояния  $x$ . Какова зависимость напряженности поля от расстояния  $E(x)$ ?

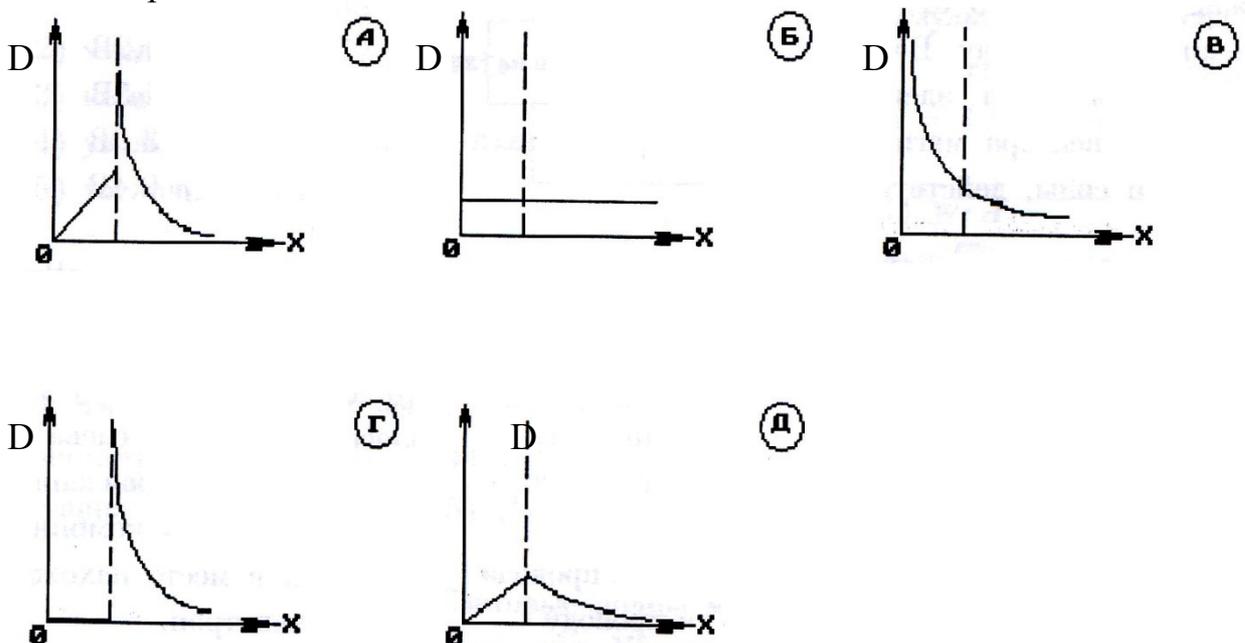




Варианты ответа:

1. Г;
2. Б;
3. А;
4. В;
5. Д.

11. Укажите график зависимости вектора электрической индукции  $D$  от расстояния для равномерно заряженного по объему диэлектрического шара.



Варианты ответа:

6. Д;
7. Б;
8. А;
9. В;
10. Г.

12. Желательно, чтобы электроны, прошедшие разность потенциалов 350кВ, двигались в циклотроне по орбите 1м. Величина магнитной индукции для этого должна быть наиболее близка к... (удельный заряд электрона  $1,76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг).

Варианты ответа:

1. 1 мТл;
2. 2 мТл;
3. 20 мТл;
4. 50 мТл;
5. 10 мТл.

13. Смещение частиц среды в плоской бегущей звуковой волне описывается выражением  $e = A_0 \cdot \cos(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ , где

$A_0$  – амплитуда смещения,

$\omega, \lambda$  – круговая частота и длина волны

$t$  – время

$x$  – координата в направлении распространения.

Выражение для ускорения частиц среды в этой волне имеет вид...

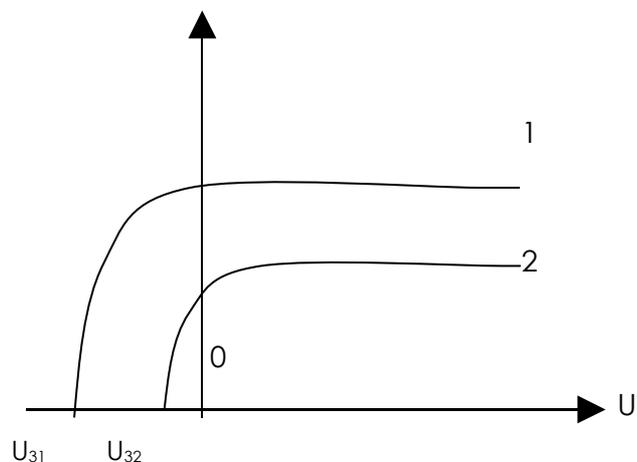
Варианты ответа:

1.  $(A_0 / \lambda) \cdot \cos(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ ;
2.  $- A_0 / \lambda \cdot \sin(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ ;
3.  $- A_0 \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ ;
4.  $- A_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ ;
5.  $(A_0 / \lambda) \cdot \sin(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ .

14. На рисунке изображены вольтамперные характеристики одного и того же фотоэлемента при различных условиях. Каким условиям соответствуют эти графики? ( $\nu$  – частота света,  $\Phi$  – световой поток)

Варианты ответа:

1.  $\nu_1 > \nu_2; \Phi_1 > \Phi_2;$
2.  $\nu_1 > \nu_2; \Phi_1 = \Phi_2;$
3.  $\nu_1 = \nu_2; \Phi_1 > \Phi_2;$
4.  $\nu_1 < \nu_2; \Phi_1 = \Phi_2;$
5.  $\nu_1 < \nu_2; \Phi_1 < \Phi_2.$



15. Какая формула указывает на потенциальный характер электростатического поля?

- А.  $\int_S \vec{E}_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i Q_i .$
- Б.  $\vec{E} = -grad\varphi .$
- В.  $\int_S \vec{E}_n d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV .$
- Г.  $\int_L \vec{E}_n dl = 0 .$
- Д. Нуль.

Варианты ответа:

1. Б;
  2. нет такой формулы;
  3. А;
  4. В;
  5. Г.
16. Плоский конденсатор между обкладками содержит диэлектрик. Конденсатор подключили к источнику напряжения, а затем удалили диэлектрик. Что при этом произошло?
- А. Напряжение на обкладках уменьшилось.
  - Б. Емкость конденсатора уменьшилось.
  - В. Напряженность поля увеличилась.

Г. Заряд на обкладках уменьшился.

Варианты ответа:

1. А, Б, В и Г;
2. только В и Г;
3. только А и Б;
4. Б, В и Г;
5. только Б и Г.

17. Если хотя бы один виток обмотки трансформатора замкнется накоротко, то трансформатор начинает сильно греться и может выйти из строя. Какие факторы связаны с этим явлением?

Варианты ответа:

1. Возникающая в замкнутом витке ЭДС создает большой ток в этом витке;
2. Сопротивление замкнутого витка много меньше сопротивления нагрузки трансформатора;
3. Выделяющаяся в проводнике теплота пропорциональна квадрату силы тока;
4. Рассеиваемая трансформатором энергия обратно пропорциональна числу витков.

18. Проводник диаметром 2 сантиметра содержит  $1 \cdot 10^{28}$  свободных электронов в каждом кубическом метре. Для электрического тока силой 100 А, скорость дрейфа свободных электронов в проводнике наиболее близка к

Варианты ответа:

1.  $6 \cdot 10^{-14}$  м/с;
2.  $5 \cdot 10^{-10}$  м/с;
3.  $5 \cdot 10^{-4}$  м/с;
4.  $8 \cdot 10^{-3}$  м/с;
5.  $1 \cdot 10^{-19}$  м/с.

19. Укажите, что характерно для диамагнетиков:

А. Аномально большие значения магнитной проницаемости.

Б. Справедливо следующее соотношение  $\bar{B} = \mu_0 \mu \bar{H}$ .

( $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость)

В. Вектор магнитной индукции молекулярных токов  $\bar{B}$  параллелен вектору магнитной индукции намагничивающего поля  $\bar{B}_0$ .

Г. Индукция поля в диамагнетике меньше индукции намагничивающего поля  $\bar{B} < \bar{B}_0$ .

Варианты ответа:

1. только Б и Г;
2. только Б, В и Г;
3. только А и Г;
4. все эти факты;
5. только А и Б.

20. Уравнение волны имеет вид:  $S = 0,01 \cdot \cos(12,6 \cdot 10^3 \cdot t - 37 \cdot x)$ . Чему равно значение волнового числа?

Варианты ответа:

1. 0,37;
2. 37;
3. 126;
4.  $12,6 \cdot 10^3$ ;
5. 0,01.

21. Дана система уравнений Максвелла:

$$A. \oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{d\vec{B}}{dt} d\vec{S}$$

$$B. \oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V p dV$$

$$B. \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S (\vec{j} + \frac{d\vec{D}}{dt}) d\vec{S}$$

$$Г. \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

Какое из этих уравнений является обобщением закона Фарадея для электромагнитной индукции?

Варианты ответа:

1. В;
2. Г;
3. А;
4. ни одно из них;
5. Б.

22. Явление фотоэффекта описывается уравнением Эйнштейна  $|eU| = h\nu - \omega$ . Величина  $\omega$  в этом уравнении:

Варианты ответа:

1. полная световая энергия, поглощенная фотокатодом за время измерения;

2. минимальная энергия, требующаяся для вырывания электрона из материала катода;
  3. средняя энергия всех электронов в фотокатоде;
  4. минимальная энергия, которую должен иметь фотон, чтобы быть поглощенным фотокатодом;
  5. разность энергий между двумя наименьшими орбитами электрона в атоме фотокатода.
- 23.** Наибольшая длина рентгеновских лучей, которые могут испытывать брэгговскую дифракцию на семействе кристаллических плоскостей, находящихся на расстоянии  $d$  друг от друга, равна:

Варианты ответа:

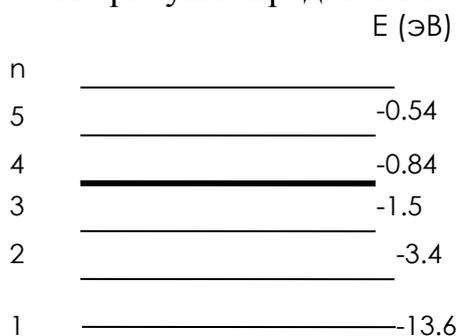
1.  $d/2$ ;
2.  $2d$ ;
3.  $D$ ;
4.  $4d$ ;
5.  $d/4$ .

- 24.** Кристаллический образец характеризуется температурой Дебая, равной  $300^\circ\text{K}$ . Максимальная частота фонона (кванта энергии тепловых колебаний решетки), который может возбуждаться в образце, наиболее близка к

Варианты ответа:

1.  $5 \cdot 10^{10}$  Гц;
2.  $1 \cdot 10^{10}$  Гц;
3.  $1 \cdot 10^5$  Гц;
4.  $1 \cdot 10^{12}$  Гц;
5.  $5 \cdot 10^{12}$  Гц.

- 25.** На рисунке представлена схема уровней энергии атома водорода.



Величина  $10,2$  В соответствует ...

Варианты ответа:

1. потенциалу ионизации для первого возбужденного состояния;
2. потенциалу ионизации для основного состояния;
3. второму потенциалу возбуждения;
4. первому потенциалу возбуждения;
5. ни одной из перечисленных величин.

### ВАРИАНТ 7

1. Точка движется по закону  $\mathbf{r} = t^2 \mathbf{i} + 2t \mathbf{j} + (t^3 - 1)\mathbf{k}$ . Это движение происходит под действием силы, которая параллельна...

Варианты ответа:

1. плоскости XOZ;
  2. плоскости YOZ;
  3. оси OX;
  4. плоскости XOY;
  5. оси OZ.
2. Каким способом может человек, стоящий на абсолютно гладком льду, покрывающем поверхность водоема, достигнуть берега?

Варианты ответа:

1. лечь и вращаться вокруг оси;
  2. перемещаться мелкими шагами;
  3. снять и бросить в сторону одежду;
  4. двигаться коньковым ходом;
  5. перекатываться с боку на бок.
3. Момент инерции тела зависит от...
    - А. Распределения массы перпендикулярно оси вращения.
    - Б. Распределения массы параллельно оси вращения.
    - В. Моменты силы.
    - Г. Массы тела.
    - Д. Формы тела.

Варианты ответа:

1. только от В и Г;
  2. только от А и Г;
  3. только от А и Б;
  4. только от А и В;
  5. только от Б, В и Г.
4. Укажите условия сохранения момента импульса в системе:
    - А. Замкнутость системы.
    - Б. Консервативность взаимодействий.
    - В. Неизменность скорости частиц.
    - Г. Постоянство массы частиц.

Варианты ответа:

1. только А и Б;
2. только А;

3. только А, Б и В;
4. только Б;
5. все эти условия.
5. Постоянная Больцмана не может быть выражена в единицах измерения под номером...

Варианты ответа:

1. эВ/К;
2.  $\text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{с}^2$
3.  $\text{кг}\cdot\text{м}^2/(\text{с}^2\cdot\text{К})$ ;
4. Н·м/К;
5. Дж/К.
6. Удельная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении  $C_p$  больше, чем удельная теплоемкость при постоянном объеме  $C_v$  из-за того, что:

Варианты ответа:

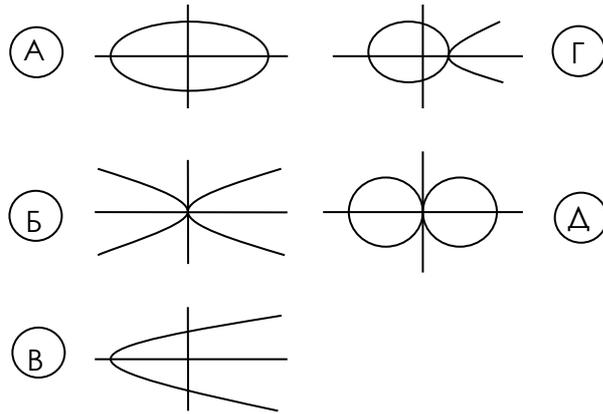
1. необходимое количество теплоты при постоянном объеме больше, чем при постоянном давлении;
2. увеличение внутренней энергии газа при постоянном давлении больше, чем при постоянном объеме;
3. количество теплоты, подводимое для нагревания на один градус, одинаково как для процессов, в которых остается постоянным давление, так и для процессов, в которых остается постоянным объем;
4. при  $p=\text{const}$  нагреваемый газ расширяется и часть подводимой теплоты расходуется на совершение работы над внешними телами;
5. давление газа остается постоянным, когда его температура остается постоянной.
7. Газ совершает работу  $A$  и ему передано количество теплоты  $Q$ . Чему равно изменение внутренней энергии газа?

Варианты ответа:

1.  $\Delta U = A$ ;
2.  $\Delta U = Q$ ;
3.  $\Delta U = A + Q$ ;
4.  $\Delta U = Q - A$ ;
5. среди перечисленных ответов нет правильного.
8. На рисунках показаны поперечные стоячие волны, которые могут возникать в упругом стержне. Какие стоячие волны могут возникнуть в стержне с обоими закрепленными концами?

Варианты ответа:

1. В и Г;
2. Б, Г и Д;
3. А и Д;
4. А, Б и В;
5. Б и Д.



9. Проводник диаметром 2 сантиметра содержит  $1 \cdot 10^{28}$  свободных электронов в каждом кубическом метре. Для электрического тока силой 100 А, скорость дрейфа свободных электронов в проводнике наиболее близка к:

Варианты ответа:

1.  $6 \cdot 10^{-14}$  м/с;
2.  $5 \cdot 10^{-10}$  м/с;
3.  $2 \cdot 10^{-4}$  м/с;
4.  $8 \cdot 10^{-3}$  м/с;
5.  $1 \cdot 10^{-19}$  м/с.

10. Чему равно приведенное ниже выражение для напряженности электростатического поля в диэлектрике?

$$\oint_L E_1 dl =$$

А.  $\int \rho dV$ .

Б.  $\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \rho$ .

В.  $-\text{grad} \varphi$ .

Г.  $\varphi_1 - \varphi_2$ .

Д. Нуль.

Варианты ответа:

1. Б;
2. А;
3. Д;
4. Г;
5. В.

11. Как изменяются электрические сопротивления металлов и полупроводников при повышении температуры?

Варианты ответа:

1. увеличивается у металлов и полупроводников;
2. уменьшается у металлов и полупроводников;
3. увеличивается у металлов, уменьшается у полупроводников;
4. уменьшается у металлов и увеличивается у полупроводников;
5. не изменяется ни у металлов, ни у полупроводников.

12. По длинному прямому проводу, лежащему недалеко от Вас в плоскости листа, слева направо течет ток. Между Вами и проводом в направлении течения тока движется электрон. Укажите верную комбинацию направлений вектора магнитной индукции в месте нахождения электрона и силы, действующей на этот электрон.

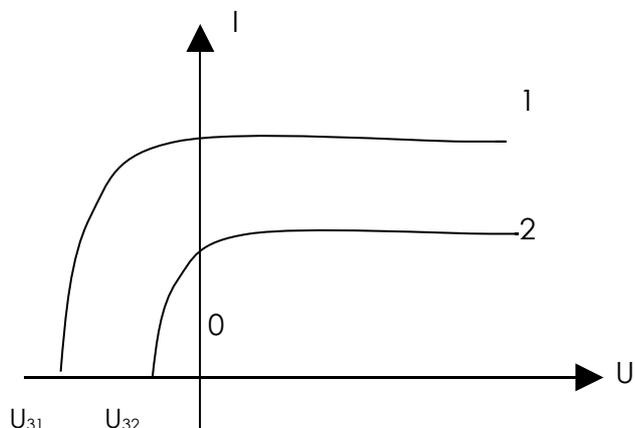
Варианты ответа:

- | Вектор магнитной индукции   | Сила          |
|-----------------------------|---------------|
| 1. вниз от плоскости листа  | от провода    |
| 2. вверх от плоскости листа | от провода    |
| 3. вверх от плоскости листа | к проводу     |
| 4. к Вам                    | вдоль провода |
| 5. от Вас                   | к проводу     |

13. На рисунке изображены вольтамперные характеристики одного и того же фотоэлемента при различных условиях. Каким условиям соответствуют эти графики? ( $\nu$  – частота света,  $\Phi$  – световой поток)

Варианты ответа:

1.  $\nu_1 > \nu_2$ ;  $\Phi_1 > \Phi_2$ ;
2.  $\nu_1 > \nu_2$ ;  $\Phi_1 = \Phi_2$ ;
3.  $\nu_1 = \nu_2$ ;  $\Phi_1 > \Phi_2$ ;
4.  $\nu_1 < \nu_2$ ;  $\Phi_1 = \Phi_2$ ;
5.  $\nu_1 < \nu_2$ ;  $\Phi_1 < \Phi_2$ .



14. У длинной однослойной катушки убрали  $1/3$  витков. В результате коэффициент самоиндукции катушки:

Варианты ответа:

1. увеличился в 1.50 раза;
2. уменьшился в 2.25 раза;
3. уменьшился в 1.50 раза;
4. не изменился;
5. увеличился в 2.25 раза.

15. Частица может колебаться вдоль оси  $x$  под действием результирующей силы  $F=-kx$  с амплитудой  $A$  и частотой  $\omega$ , где  $k$  – положительная константа. В момент, когда  $A/2$ , скорость частицы равна:

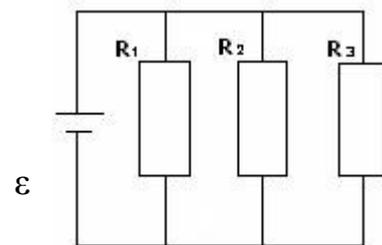
Варианты ответа:

1.  $\omega \cdot A$ ;
2.  $\sqrt{3} \cdot \omega \cdot A/2$ ;
3.  $\sqrt{2} \cdot \omega \cdot A$ ;
4.  $2 \cdot \omega \cdot A$ ;
5.  $(1/3) \cdot \omega \cdot A$ .

16. На каком из сопротивлений наибольшая мощность, если  $R_1 > R_2 > R_3$ ?

Варианты ответа:

1. на всех одинаковая;
2. для ответа недостаточно данных;
3. на  $R_1$ ;
4. на  $R_2$ ;
5. на  $R_3$ .



17. Естественный свет падает на два идеальных последовательно расположенных поляризатора. Поляризаторы ориентированы так, что свет не проходит через второй поляризатор. Между двумя первыми помещается третий поляризатор, плоскость пропускания которого может поворачиваться. Максимальное значение интенсивности света, прошедшего сквозь все три поляризатора, составляет следующую долю от интенсивности падающего света:

Варианты ответа:

1.  $1/\sqrt{2}$ ;
2.  $1/2$ ;
3. 1;
4.  $1/8$ ;
5. 0.

18. Дана система Максвелла:

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\int (d\mathbf{B}/dt) d\mathbf{S}.$$

(L) (S)

Б.  $\oint DdS = \int pdV.$

(S) (V)

В.  $\int_{\circ} HdL = \int (j + (dD/dt))dS.$

(L) (S)

Г.  $\int BdS = 0.$

(S)

Какое из этих уравнений является обобщением закона Фарадея для электромагнитной индукции?

Варианты ответа:

1. В;
2. Г;
3. А;
4. Ни одно из них;
5. Б.

19. Световые волны могут быть поляризованы, а звуковые волны в газе – нет. Укажите наилучшее объяснение этому факту.

Варианты ответа:

1. световые волны поперечные, тогда как звуковые волны продольные;
2. для световых волн наблюдается эффект Доплера, а для звуковых нет;
3. световые волны имеют более высокую частоту, чем звуковые;
4. световые волны распространяются при более высоких скоростях, чем звуковые;
5. световые волны имеют более короткую длину волны, чем звуковые.

20. Если  $a$  - есть поглощательная способность поверхности для солнечного света, а  $r$  – испускательная способность этой поверхности, то для того, чтобы относительно мало нагреваться на солнечном свете, поверхность должна иметь:

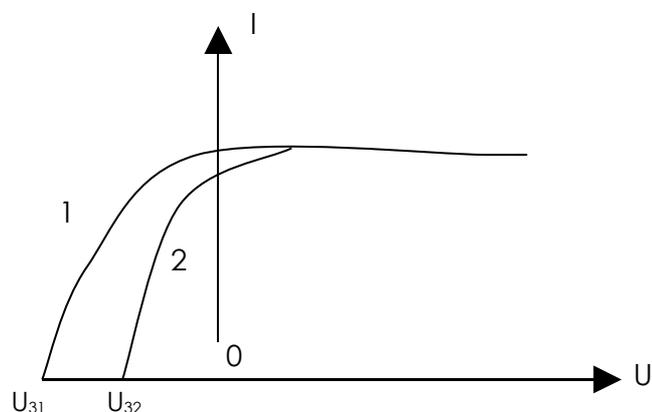
Варианты ответа:

1. малое значение ( $a/r$ );
2. значение ( $ar$ )=1;
3. большое значение ( $ar$ );
4. большое значение ( $a/r$ );
5. малое значение ( $ar$ ).

21. На рисунке изображены вольтамперные характеристики одного и того же фотоэлемента при различных условиях. Каким условиям соответствуют эти графики? ( $\nu$  – частота света,  $\Phi$  – световой поток)

Варианты ответа:

1.  $\nu_1 > \nu_2$ ;  $\Phi_1 > \Phi_2$ ;
2.  $\nu_1 = \nu_2$ ;  $\Phi_1 > \Phi_2$ ;
3.  $\nu_1 < \nu_2$ ;  $\Phi_1 = \Phi_2$ ;
4.  $\nu_1 > \nu_2$ ;  $\Phi_1 = \Phi_2$ ;
5.  $\nu_1 < \nu_2$ ;  $\Phi_1 < \Phi_2$ .



22. Бозоны – это частицы...

Варианты ответа:

1. имеющие размеры атома;
2. имеющие целое значение спина;
3. не имеющие спина;
4. не обладающие массой покоя;
5. имеющие не целое значение спина.

23. Наибольшая длина волны рентгеновских лучей, которые могут испытывать брэгговскую дифракцию на семействе кристаллических плоскостей, находящихся на расстоянии  $d$  друг от друга, равна:

Варианты ответа:

1.  $d/2$ ;
2.  $2d$ ;
3.  $d$ ;
4.  $4d$ ;
5.  $d/4$ .

24. Атомное ядро состоит:

Варианты ответа:

1. из позитронов и нейтронов;
2. из электронов, протонов и нейтронов;
3. из электронов и протонов;
4. только из нейтронов;
5. из протонов и нейтронов.

25. Что общего и в чем различия фотоэффекта и эффекта Комптона?

- А. В обоих эффектах происходит взаимодействие фотона с электроном.
- Б. В эффекте Комптона происходит рассеяние фотонов на электроны.
- В. В фотоэффекте происходит поглощение фотонов.
- Г. Эффект Комптона наблюдается в видимом диапазоне электромагнитного спектра.
- Д. Фотоэффект наблюдается для всех длин электромагнитных волн.

Варианты ответа:

- 1. А, В и Д;
- 2. Б, В и Г;
- 3. А, Б и В;
- 4. В, Г и Д;
- 5. Б, Г и Д.

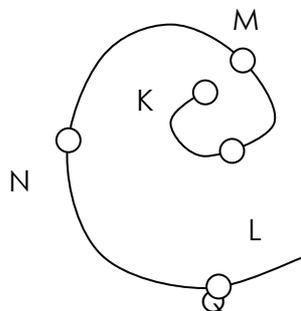
### ВАРИАНТ 8

1. Пятикилограммовый камень падает на гвоздь и забивает его на глубину 0,025 метра в дерево. Если камень в момент удара о гвоздь двигался со скоростью 10 метров в секунду, то средняя сила, действующая на гвоздь со стороны камня, когда гвоздь входит в дерево, наиболее близка к значению:

Варианты ответа:

- 1. 100000 Н;
- 2. 10000 Н;
- 3. 1000 Н;
- 4. 10 Н;
- 5. 100 Н.

2. Точка движется с постоянным нормальным ускорением по траектории, показанной на рисунке. В какой точке траектории её скорость будет минимальна?



Варианты ответа:

- 1. Q
  - 2. K
  - 3. L
  - 4. M
  - 5. N
3. Момент инерции тела зависит от...
- А. Распределения массы перпендикулярно оси вращения.
  - Б. Распределения массы параллельно оси вращения.
  - В. Моменты силы.

- Г. Массы тела.
- Д. Формы тела.

Варианты ответа:

1. только от В и Г;
  2. только от А и Г;
  3. только от А и Б;
  4. только от А и В;
  5. только от Б, В и Г.
4. Приведенную длину физического маятника увеличили в 2 раза. Как изменилась частота колебаний маятника?

Варианты ответа:

1. увеличилась в  $\sqrt{2}$  раз;
  2. уменьшился в  $\sqrt{2}$  раз;
  3. уменьшилась в 2 раза;
  4. увеличилась в 2 раза;
  5. увеличилась в 4 раза.
5. Человек, стоящий на вращающейся скамейке Жуковского, повернул вертикально расположенный в руках стержень в горизонтальное положение. В результате этого:
- А. Увеличится момент инерции системы.
  - Б. Увеличится угловая скорость.
  - В. Момент импульса системы не изменится.
  - Г. Увеличится кинетическая энергия системы.

Варианты ответа:

1. только А, Б и Г;
  2. только В;
  3. только Б и Г;
  4. только А и В;
  5. только А.
6. Постоянная Больцмана не может быть выражена в единицах измерения под номером...

Варианты ответа:

1. эВ/К;
  2.  $\text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{с}^2$
  3.  $\text{кг}\cdot\text{м}^2/(\text{с}^2\cdot\text{К})$ ;
  4. Н·м/К;
  5. Дж/К.
7. Банкир разделил свой золотой запас на две равные половины. Одну половину оставил на Земле, а другую отправил с космическим кораблем, летящим со скоростью  $0,92\cdot c$ . Масса золота на корабле отличается от земной в:

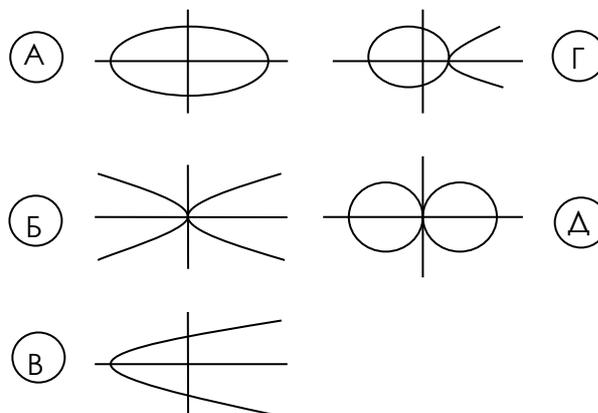
Варианты ответа:

1. 30 раз;
2. 15 раз;
3. 5 раз;

4. 25 раз;  
5. 10 раз.
8. На рисунках показаны поперечные стоячие волны, которые могут возникать в упругом стержне. Какие стоячие волны могут возникнуть в стержне с обоими закрепленными концами?

Варианты ответа:

1. В и Г;
2. Б, Г и Д;
3. А и Д;
4. А, Б и В;
5. Б и Д.



9. Проводник диаметром 2 сантиметра содержит  $1 \cdot 10^{28}$  свободных электронов в каждом кубическом метре. Для электрического тока силой 100 А, скорость дрейфа свободных электронов в проводнике наиболее близка к:

Варианты ответа:

1.  $6 \cdot 10^{-14}$  м/с;
2.  $5 \cdot 10^{-10}$  м/с;
3.  $2 \cdot 10^{-4}$  м/с;
4.  $8 \cdot 10^{-3}$  м/с;
5.  $1 \cdot 10^{-19}$  м/с.

10. Частица может колебаться вдоль оси  $x$  под действием результирующей силы  $F = -kx$  с амплитудой  $A$  и частотой  $\omega$ , где  $k$  – положительная константа. В момент, когда  $A/2$ , скорость частицы равна:

Варианты ответа:

1.  $\omega \cdot A$ ;
2.  $\sqrt{3} \cdot \omega \cdot A/2$ ;
3.  $\sqrt{2} \cdot \omega \cdot A$ ;
4.  $2 \cdot \omega \cdot A$ ;
5.  $(1/3) \cdot \omega \cdot A$ .

11. Желательно, чтобы электроны, прошедшие разность потенциалов 350кВ, двигались в циклотроне по орбите 1м. Величина магнитной индукции для этого должна быть наиболее близка к... (удельный заряд электрона  $1,76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг).

Варианты ответа:

1. 1 мТл;
2. 2 мТл;
3. 20 мТл;

4. 50 мТл;
5. 10 мТл.

**12.** Отрицательный заряд движется вблизи длинного прямого провода, по которому течет электрический ток. На заряд будет действовать сила, направленная к проводу, если заряд движется в направлении:

Варианты ответа:

1. от провода;
2. противоположном току;
3. совпадающем с вектором магнитной индукции магнитного поля провода;
4. по направлению тока;
5. к проводу.

**13.** Провод без изоляции согнули пополам и скрутили. Как изменилось его электросопротивление?

Варианты ответа:

1. уменьшилось в 2 раза;
2. не изменилось;
3. увеличилось в 2 раза;
4. уменьшилось в 4 раза;
5. увеличилось в 4 раза.

**14.** Смещение частиц среды в плоской бегущей звуковой волне описывается выражением  $e = A_0 \cdot \cos(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ , где

$A_0$  – амплитуда смещения,

$\omega$ ,  $\lambda$  – круговая частота и длина волны

$t$  – время

$x$  – координата в направлении распространения.

Выражение для ускорения частиц среды в этой волне имеет вид...

Варианты ответа:

1.  $(A_0 / \lambda) \cdot \cos(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ ;
2.  $- A_0 / \lambda \cdot \sin(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ ;
3.  $- A_0 \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ ;
4.  $- A_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ ;
5.  $(A_0 / \lambda) \cdot \sin(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ .

**15.** Магнитная индукция  $B$  длинного прямолинейного проводника с током  $I$  на расстоянии  $r$  пропорциональна...

Варианты ответа:

1.  $I / r$ ;
2.  $I \cdot r$ ;
3.  $I$ ;
4.  $I \cdot r^2$ ;

5.  $I/r^2$ .

16. Электрический потенциал на поверхности куба постоянен и равен  $U$ . Если внутри куба нет зарядов, то потенциал в его центре равен:

Варианты ответа:

1. 0;
2.  $U$ ;
3.  $U/6$ ;
4.  $U/2$ ;
5.  $U/8$ .

17. Естественный свет падает на два идеальных последовательно расположенных поляризатора. Поляризаторы ориентированы так, что свет не проходит через второй поляризатор. Между двумя первыми помещается третий поляризатор, плоскость пропускания которого может поворачиваться. Максимальное значение интенсивности света, прошедшего сквозь все три поляризатора, составляет следующую долю от интенсивности падающего света:

Варианты ответа:

1.  $1/\sqrt{2}$ ;
2.  $1/2$ ;
3. 1;
4.  $1/8$ ;
5. 0.

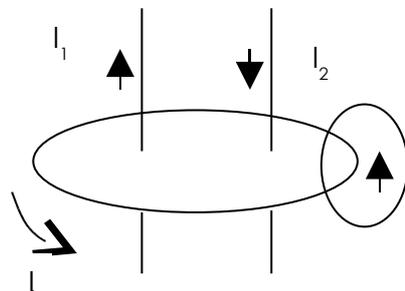
18. Какие факторы будут влиять на результат вычисления циркуляции вектора магнитной индукции  $B$  по замкнутому контуру  $L$ ?

( $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $I$  – макроток,  $i$  – микроток)

- А. Направление токов.
- Б. Направление обхода контура.
- В. Величина микротока.
- Г. Величина макротока.

Варианты ответа:

1. все эти факторы;
2. только Б, В и Г;
3. только А и Б;
4. только А, Б и Г;
5. только Б и В.

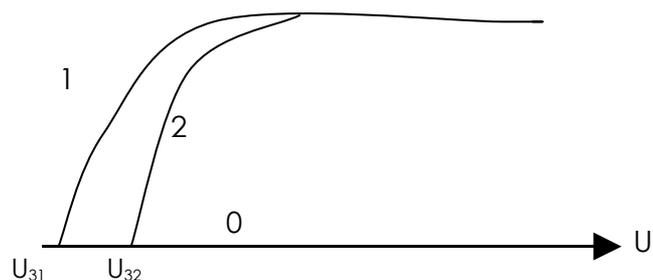


19. На рисунке изображены вольтамперные характеристики одного и того же фотоэлемента при различных условиях. Каким условиям соответствуют эти графики? ( $\nu$  – частота света,  $\Phi$  – световой поток)



Варианты ответа:

1.  $v_1 > v_2; \Phi_1 > \Phi_2;$
2.  $v_1 = v_2; \Phi_1 > \Phi_2;$
3.  $v_1 < v_2; \Phi_1 = \Phi_2;$
4.  $v_1 > v_2; \Phi_1 = \Phi_2;$
5.  $v_1 < v_2; \Phi_1 < \Phi_2.$



20. Какие факторы влияют на величину угла поворота плоскости поляризации света, проходящего через раствор оптически активного вещества?

- А. Концентрация раствора.
- Б. Длина волны света.
- В. Длина пути в растворе.
- Г. Интенсивность света.
- Д. Химический состав раствора.

Варианты ответа:

1. все эти факторы;
2. только А и В;
3. только А и Б;
4. только В и Г;
5. только А, Б и В;

21. Дана система Максвелла:

$$\text{А. } \oint_{(L)} \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \int_{(S)} (d\mathbf{B}/dt) d\mathbf{S}.$$

$$\text{Б. } \oint_{(S)} \mathbf{D} d\mathbf{S} = \int_{(V)} \rho dV.$$

$$\text{В. } \oint_{(L)} \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_{(S)} (j + (d\mathbf{D}/dt)) d\mathbf{S}.$$

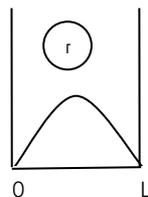
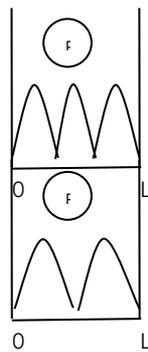
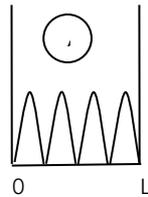
$$\text{Г. } \oint_{(S)} \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0.$$

Какое из этих уравнений является обобщением закона Фарадея для электромагнитной индукции?

Варианты ответа:

1. В;
2. Г;
3. А;
4. Ни одно из них;
5. Б.

**22.** На рисунках приведены картины вероятности нахождения электрона в потенциальном ящике с бесконечно высокими стенами.



Какая из картин соответствует первому возбужденному состоянию?

Варианты ответа:

1. В;
2. Б;
3. А и Г;
4. А;
5. Г.

**23.** Наибольшая длина волны рентгеновских лучей, которые могут испытывать брэгговскую дифракцию на семействе кристаллических плоскостей, находящихся на расстоянии  $d$  друг от друга, равна:

Варианты ответа:

1.  $d/2$ ;

2.  $2d$ ;
3.  $d$ ;
4.  $4d$ ;
5.  $d/4$ .

24. Соотношение неопределенностей Гейзенберга указывает на:

- А. Несовершенство измерительных приборов.
- Б. Границу применимости классических понятий.
- В. Отсутствие причинности в микромире.
- Г. Наличие волновых свойств у частиц.

Варианты ответа:

1. только Б и Г;
2. только В и Г;
3. верны все утверждения;
4. только А и Б;
5. только А и В.

25.  ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 He$

Приведенное превращение характеризует...

Варианты ответа:

1. электронный захват;
2. бета-минус – распад;
3. бета-плюс – распад;
4. ядерную реакцию;
5. альфа – распад.

## ВАРИАНТ 9

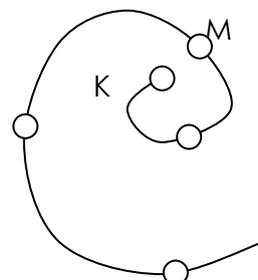
1. Пятикилограммовый камень падает на гвоздь и забивает его на глубину 0,025 метра в дерево. Если камень в момент удара о гвоздь двигался со скоростью 10 метров в секунду, то средняя сила, действующая на гвоздь со стороны камня, когда гвоздь входит в дерево, наиболее близка к значению:

Варианты ответа:

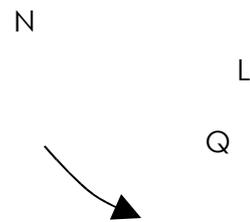
1. 100000 Н;
2. 10000 Н;
3. 1000 Н;
4. 10 Н;
5. 100 Н.

2. Точка движется с постоянным нормальным ускорением по траектории, показанной на рисунке. В какой точке траектории её скорость будет максимальна?

Варианты ответа:



1. Q;
2. K;
3. L;
4. M;
5. N.

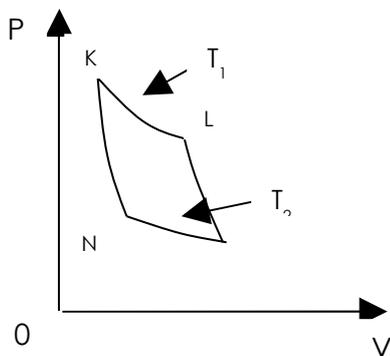


3. Укажите условия сохранения момента импульса в системе:
- А. Замкнутость системы.
  - Б. Консервативность взаимодействий.
  - В. Неизменность скорости частиц.
  - Г. Постоянство массы частиц.

Варианты ответа:

1. только А и Б;
2. только А;
3. только А, Б и В;
4. только Б;
5. все эти условия.

4. Для кругового процесса, изображенного на рисунке, KL и MN – изотермы, а KN и LM – адиабаты.



Система совершает цикл Карно KLMN, получая количество теплоты  $Q_1$  от нагревателя при температуре  $T_1$  и отдавая количество теплоты  $Q_2$  холодильнику при температуре  $T_2$ . Все следующие утверждения верны за исключением:

Варианты ответа:

1. к.п.д цикла не зависит от природы рабочего тела;
2. энтропия системы возрастает;
3. выполненная работа равна  $Q_1 - Q_2$ ;
4. энтропия нагревателя уменьшается;
5.  $Q_1/T_1 = Q_2/T_2$ .

5. Удельная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении  $C_p$  больше, чем удельная теплоемкость при постоянном объеме  $C_v$  из-за того, что:

Варианты ответа:

1. необходимое количество теплоты при постоянном объеме больше, чем при постоянном давлении;
  2. увеличение внутренней энергии газа при постоянном давлении больше, чем при постоянном объеме;
  3. количество теплоты, подводимое для нагревания на один градус, одинаково как для процессов, в которых остается постоянным давление, так и для процессов, в которых остается постоянным объем;
  4. при  $p = \text{const}$  нагреваемый газ расширяется и часть подводимой теплоты расходуется на совершение работы над внешними телами;
  5. давление газа остается постоянным, когда его температура остается постоянной.
6. Идеальным газом называется газ, у которого:
- А. Одноатомные молекулы
  - Б. Молекулы не взаимодействуют друг с другом
  - В. Молекулы участвуют только в поступательном движении
  - Г. Размерами молекул можно пренебречь

Варианты ответа:

1. все эти свойства;
  2. только Б;
  3. только Г;
  4. Б, В и Г;
  5. только Б и Г.
7. Как изменится концентрация идеального газа в зависимости от температуры при изобарическом процессе?

Варианты ответа:

1. убывает обратно пропорционально  $T$ ;
  2. линейно возрастает;
  3. линейно убывает;
  4. возрастает пропорционально  $T^2$ ;
  5. убывает обратно пропорционально  $T^2$ .
8. Значение числа степеней свободы некоторого газа позволяет определить:
- А. Внутреннюю энергию одного моля газа при известной температуре.
  - Б. Энергию одной молекулы газа при известной температуре.
  - В. Молярную теплоемкость при  $p = \text{const}$  или  $V = \text{const}$ .
  - Г. Коэффициент Пуассона (показатель адиабаты) для данного газа.

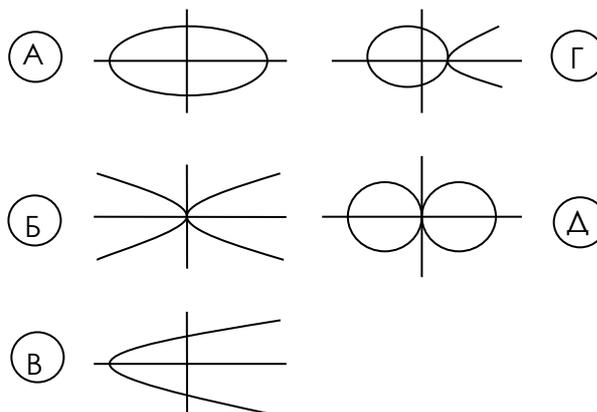
Варианты ответа:

1. только А;
2. только А и Б;
3. все эти параметры;
4. А, Б и В;
5. только Б и В.

9. На рисунках показаны поперечные стоячие волны, которые могут возникать в упругом стержне. Какие стоячие волны могут возникнуть в стержне с обоими закрепленными концами?

Варианты ответа:

1. В и Г;
2. Б, Г и Д;
3. А и Д;
4. А, Б и В;
5. Б и Д.



10. Частица может колебаться вдоль оси  $x$  под действием результирующей силы  $F = -kx$  с амплитудой  $A$  и частотой  $\omega$ , где  $k$  – положительная константа. В момент, когда  $A/2$ , скорость частицы равна:

Варианты ответа:

1.  $\omega \cdot A$ ;
2.  $\sqrt{3} \cdot \omega \cdot A/2$ ;
3.  $\sqrt{2} \cdot \omega \cdot A$ ;
4.  $2 \cdot \omega \cdot A$ ;
5.  $(1/3) \cdot \omega \cdot A$ .

11. Желательно, чтобы электроны, прошедшие разность потенциалов 350кВ, двигались в циклотроне по орбите 1м. Величина магнитной индукции для этого должна быть наиболее близка к... (удельный заряд электрона  $1,76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг).

Варианты ответа:

1. 1 мТл;
2. 2 мТл;
3. 20 мТл;
4. 50 мТл;
5. 10 мТл.

12. По длинному прямому проводу, лежащему недалеко от Вас в плоскости листа, слева направо течет ток. Между Вами и проводом в направлении течения тока движется электрон. Укажите верную комбинацию направлений вектора магнитной индукции в месте

нахождения электрона и силы, действующей на этот электрон.

Варианты ответа:

Вектор магнитной индукции	Сила
1. вниз от плоскости листа	от провода
2. вверх от плоскости листа	от провода
3. вверх от плоскости листа	к проводу
4. к Вам	вдоль провода
5. от Вас	к проводу

13. Если хотя бы один виток обмотки трансформатора замкнется накоротко, то трансформатор начнет сильно греться и может выйти из строя. Какие факторы связаны с этим явлением?

- А. Возникающая в замкнутом витке ЭДС создает большой ток в этом витке.
- Б. Сопротивление замкнутого витка много меньше сопротивления нагрузки трансформатора.
- В. Выделяющаяся в проводнике теплота пропорциональна квадрату силы тока.
- Г. Рассеиваемая трансформатором энергия обратно пропорциональна числу витков.

Варианты ответа:

- 1. все факторы;
- 2. только А и Г;
- 3. только А и В;
- 4. А, Б и В;
- 5. только А и Б.

14. Смещение частиц среды в плоской бегущей звуковой волне описывается выражением  $e = A_0 \cdot \cos(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ , где

$A_0$  – амплитуда смещения,

$\omega$ ,  $\lambda$  – круговая частота и длина волны

$t$  – время

$x$  – координата в направлении распространения.

Выражение для ускорения частиц среды в этой волне имеет вид...

Варианты ответа:

- 1.  $(A_0 / \lambda) \cdot \cos(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ ;
- 2.  $- A_0 / \lambda \cdot \sin(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ ;
- 3.  $- A_0 \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ ;
- 4.  $- A_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ ;
- 5.  $(A_0 / \lambda) \cdot \sin(\omega \cdot t - (2\pi / \lambda) \cdot x)$ .

15. Монохроматический свет с длиной волны  $\lambda$  нормально падает на тонкую пленку с показателем преломления  $n > 1$ . Какую минимальную толщину должна иметь пленка, чтобы в отраженном свете казаться светлой?

Варианты ответа:

- 1.  $\lambda/8$ ;

2.  $\lambda$ ;
3.  $\lambda/2$ ;
4.  $\lambda/4$ ;
5.  $2\lambda$ .

16. Укажите факторы, влияющие на то, что нить лампы накаливания чаще всего перегорает при накаливании.
- А. С течением времени из-за испарения вольфрама уменьшается сечение нити.
  - Б. У холодной нити сопротивление меньше и по ней проходит большой ток.
  - В. Теплота, выделяющаяся в проводнике при неизменном напряжении, пропорциональна силе тока.
  - Г. При включении происходит скачок напряжения на нити.

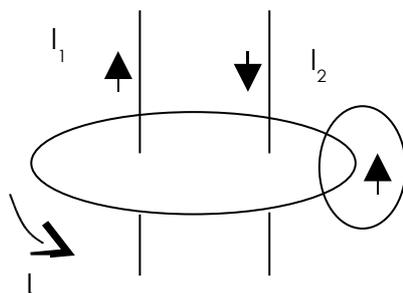
Варианты ответа:

1. только А и Б;
2. только А;
3. только Б и В;
4. только А и В;
5. только Б.

17. Какие факторы будут влиять на результат вычисления циркуляции вектора магнитной индукции  $B$  по замкнутому контуру  $L$ ? ( $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $I$  – макроток,  $i$  – микроток)
- А. Направление токов.
  - Б. Направление обхода контура.
  - В. Величина микротока.
  - Г. Величина макротока.

Варианты ответа:

1. все эти факторы;
2. только Б, В и Г;
3. только А и Б;
4. только А, Б и Г;
5. только Б и В.



18. При комнатной температуре сопротивления резисторов из полупроводника и металла оказались одинаковыми. Когда эти резисторы нагрели, их сопротивления изменились. Какое утверждение относится к полупроводниковому резистору?

Варианты ответа:

1. удельная электропроводность увеличилась;
2. сопротивление изменилось как линейная функция температуры;

3. удельное сопротивление увеличилось;
4. концентрация носителей заряда не изменилась;
5. длина свободного пробега электронов возросла.

19. Сила Лоренца...

- А. Относится к классу гироскопических сил.
- Б. Изменяет направление скорости движения заряда.
- В. Изменяет величину заряда.
- Г. Сообщает заряду нормальное ускорение.

Варианты ответа:

1. Б и Г;
2. А, Б и Г;
3. Б, В и Г;
4. А и Б;
5. Б и В.

20. Дана система Максвелла:

А.  $\oint \vec{E} d\vec{l} = -\int (d\vec{B}/dt) d\vec{S}$ .

(L) (S)

Б.  $\oint \vec{D} d\vec{S} = \int \rho dV$ .

(S) (V)

В.  $\oint \vec{H} d\vec{l} = \int (j + (d\vec{D}/dt)) d\vec{S}$ .

(L) (S)

Г.  $\oint \vec{B} d\vec{S} = 0$ .

(S)

Какое из этих уравнений является обобщением закона Фарадея для электромагнитной индукции?

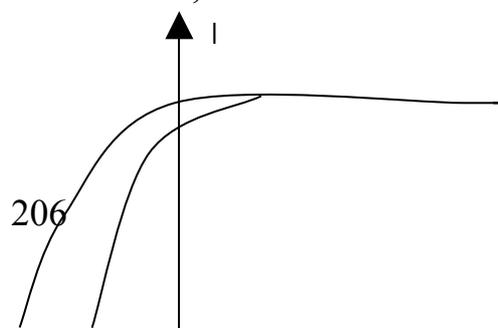
Варианты ответа:

1. В;
2. Г;
3. А;
4. Ни одно из них;
5. Б.

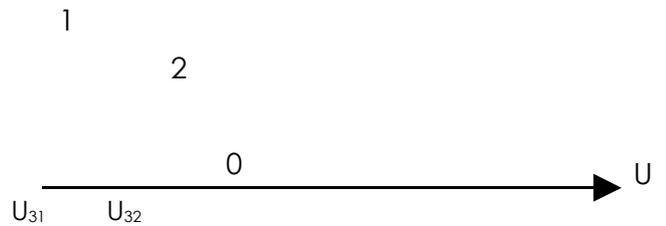
21. На рисунке изображены вольтамперные характеристики одного и того же фотоэлемента при различных условиях. Каким условиям соответствуют эти графики? ( $\nu$  – частота света,  $\Phi$  – световой поток)

Варианты ответа:

1.  $\nu_1 > \nu_2; \Phi_1 > \Phi_2$ ;



2.  $v_1 = v_2; \Phi_1 > \Phi_2;$
3.  $v_1 < v_2; \Phi_1 = \Phi_2;$
4.  $v_1 > v_2; \Phi_1 = \Phi_2;$
5.  $v_1 < v_2; \Phi_1 < \Phi_2.$

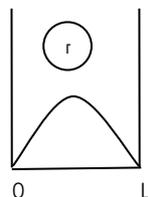
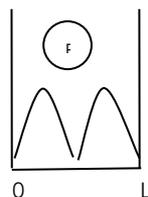
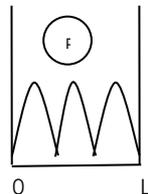
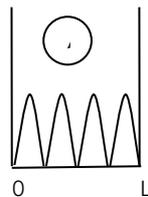


**22.** Бозоны – это частицы...

Варианты ответа:

1. имеющие размеры атома;
2. имеющие целое значение спина;
3. не имеющие спина;
4. не обладающие массой покоя;
5. имеющие не целое значение спина.

**23.** На рисунках приведены картины вероятности нахождения электрона в потенциальном ящике с бесконечно высокими стенами.



Какая из картин соответствует первому возбужденному состоянию?

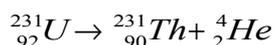
Варианты ответа:

1. В;
2. Б;
3. А и Г;

4. А;  
5. Г.
24. Что общего и в чем различия фотоэффекта и эффекта Комптона?  
А. В обоих эффектах происходит взаимодействие фотона с электроном.  
Б. В эффекте Комптона происходит рассеяние фотонов на электроны.  
В. В фотоэффекте происходит поглощение фотонов.  
Г. Эффект Комптона наблюдается в видимом диапазоне электромагнитного спектра.  
Д. Фотоэффект наблюдается для всех длин электромагнитных волн.

Варианты ответа:

1. А, В и Д;
  2. Б, В и Г;
  3. А, Б и В;
  4. В, Г и Д;
  5. Б, Г и Д.
25. Покоящееся ядро урана испускает ядро гелия, превращаясь в ядро тория.



Какое из следующих утверждений верно?

Варианты ответа:

1. оба продукта распада имеют одинаковую кинетическую энергию;
2. оба продукта распада имеют одинаковую скорость;
3. ядро гелия имеет большую кинетическую энергию, чем ядро тория;
4. ядро тория имеет больший импульс, чем ядро гелия;
5. продукты распада движутся в одном направлении.

## ВАРИАНТ 10

1. Каким способом может человек, стоящий на абсолютно гладком льду, покрывающем поверхность водоема, достигнуть берега?

Варианты ответа:

1. лечь и вращаться вокруг оси;
  2. перемещаться мелкими шагами;
  3. снять и бросить в сторону одежду;
  4. двигаться коньковым ходом;
  5. перекатываться с боку на бок.
2. Какая физическая величина определяет воздействие одного тела на другое, является скоростью изменения импульса?

Варианты ответа:

1. скорость;
2. ускорение;
3. сила;
4. давление;

5. среди перечисленных ответов нет правильного.

3. Приведенную длину физического маятника увеличили в 2 раза. Как изменилась частота колебаний маятника?

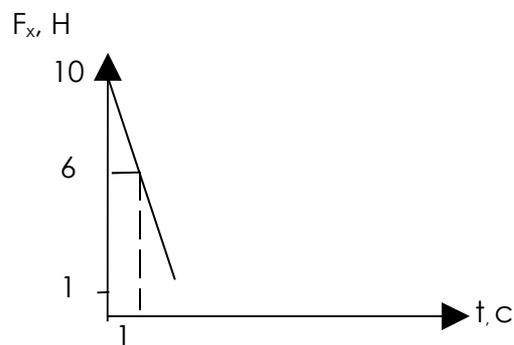
Варианты ответа:

1. увеличилась в  $\sqrt{2}$  раз;
2. уменьшился в  $\sqrt{2}$  раз;
3. уменьшилась в 2 раза;
4. увеличилась в 2 раза;
5. увеличилась в 4 раза.

4. Сила, действующая на материальную точку массой 1 кг, меняется по закону, указанному на графике. Какую скорость приобретает точка при  $t_1=1$ с? если  $V(0)=0$ ?  $F(0)=10$ Н?  $F(t_1)=6$ Н?

Варианты ответа:

1. 4 м/с
2. 1,5 м/с
3. 6 м/с
4. 8 м/с
5. 2 м/с



5. Молярная теплоемкость при постоянном объеме  $C_V$  для некоторого газа равна  $1.5 R$  ( $R$  – универсальная газовая постоянная). Сколько атомов содержит молекула этого газа? Считать, что атомы в молекуле колебаний не совершают.

Варианты ответа:

1. два;
2. для ответа недостаточно данных;
3. один;
4. больше трех;
5. три.

6. Удельная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении  $C_p$  больше, чем удельная теплоемкость при постоянном объеме  $C_v$  из-за того, что:

Варианты ответа:

1. необходимое количество теплоты при постоянном объеме больше, чем при постоянном давлении;
2. увеличение внутренней энергии газа при постоянном давлении больше, чем при постоянном объеме;
3. количество теплоты, подводимое для нагревания на один градус, одинаково как для процессов, в которых остается постоянным

давление, так и для процессов, в которых остается постоянным объем;

4. при  $p = \text{const}$  нагреваемый газ расширяется и часть подводимой теплоты расходуется на совершение работы над внешними телами;
  5. давление газа остается постоянным, когда его температура остается постоянной.
7. Банкир разделил свой золотой запас на две равные половины. Одну половину оставил на Земле, а другую отправил с космическим кораблем, летящим со скоростью  $0,92 \cdot c$ . Масса золота на корабле отличается от земной в:

Варианты ответа:

1. 30 раз;
  2. 15 раз;
  3. 5 раз;
  4. 25 раз;
  5. 10 раз.
8. Как изменится концентрация идеального газа в зависимости от температуры при изобарическом процессе?

Варианты ответа:

1. убывает обратно пропорционально  $T$ ;
  2. линейно возрастает;
  3. линейно убывает;
  4. возрастает пропорционально  $T^2$ ;
  5. убывает обратно пропорционально  $T^2$ .
9. Проводник диаметром 2 сантиметра содержит  $1 \cdot 10^{28}$  свободных электронов в каждом кубическом метре. Для электрического тока силой 100 А, скорость дрейфа свободных электронов в проводнике наиболее близка к:

Варианты ответа:

1.  $6 \cdot 10^{-14}$  м/с;
  2.  $5 \cdot 10^{-10}$  м/с;
  3.  $2 \cdot 10^{-4}$  м/с;
  4.  $8 \cdot 10^{-3}$  м/с;
  5.  $1 \cdot 10^{-19}$  м/с.
10. Чему равно приведенное ниже выражение для напряженности электростатического поля в диэлектрике?

$$\oint_L E_1 dl =$$

А.  $\int \rho dV$ .

Б.  $\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \rho$ .

В.  $-\text{grad} \varphi$ .

Г.  $\varphi_1 - \varphi_2$ .

Д. *Нуль*.

Варианты ответа:

1. Б;
2. А;
3. Д;
4. Г;
5. В.

**11.** Плоский конденсатор между обкладками содержит диэлектрик. Конденсатор подключили к источнику напряжения, а затем удалили диэлектрик. Что при этом произошло?

- А. Напряжение на обкладках уменьшилось.
- Б. Емкость конденсатора уменьшилась.
- В. Напряженность поля увеличилась.
- Г. Заряд на обкладках уменьшился.

Варианты ответа:

1. А, Б, В и Г;
2. только В и Г;
3. только А и Б;
4. Б, В и Г;
5. только Б и Г.

**12.** Частица может колебаться вдоль оси  $x$  под действием результирующей силы  $F = -kx$  с амплитудой  $A$  и частотой  $\omega$ , где  $k$  – положительная константа. В момент, когда  $A/2$ , скорость частицы равна:

Варианты ответа:

1.  $\omega \cdot A$ ;
2.  $\sqrt{3} \cdot \omega \cdot A/2$ ;
3.  $\sqrt{2} \cdot \omega \cdot A$ ;
4.  $2 \cdot \omega \cdot A$ ;
5.  $(1/3) \cdot \omega \cdot A$ .

**13.** Желательно, чтобы электроны, прошедшие разность потенциалов 350кВ, двигались в циклотроне по орбите 1м. Величина магнитной индукции для этого должна быть наиболее близка к... (удельный заряд электрона  $1,76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг).

Варианты ответа:

1. 1 мТл;
2. 2 мТл;
3. 20 мТл;
4. 50 мТл;
5. 10 мТл.

14. Монохроматический свет с длиной волны  $\lambda$  нормально падает на тонкую пленку с показателем преломления  $n > 1$ . Какую минимальную толщину должна иметь пленка, чтобы в отраженном свете казаться светлой?

Варианты ответа:

1.  $\lambda/8$ ;
2.  $\lambda$ ;
3.  $\lambda/2$ ;
4.  $\lambda/4$ ;
5.  $2\lambda$ .

15. Воздушный конденсатор с параллельными пластинами заряжен, а затем отсоединен от батареи. Уменьшение расстояния между пластинами конденсатора приведет:

Варианты ответа:

1. к уменьшению напряжения между пластинами;
2. к увеличению заряда на пластинах конденсатора;
3. не повлияет на заряд и напряжение конденсатора;
4. к увеличению напряжения между пластинами;
5. к уменьшению заряда на пластинах конденсатора.

16. Естественный свет падает на два идеальных последовательно расположенных поляризатора. Поляризаторы ориентированы так, что свет не проходит через второй поляризатор. Между двумя первыми помещается третий поляризатор, плоскость пропускания которого может поворачиваться. Максимальное значение интенсивности света, прошедшего сквозь все три поляризатора, составляет следующую долю от интенсивности падающего света:

Варианты ответа:

1.  $1/\sqrt{2}$ ;
2.  $1/2$ ;
3. 1;
4.  $1/8$ ;
5. 0.

17. Свет длиной 500 нанометров падает перпендикулярно на дифракционную решетку имеющую 2000 штрихов на один сантиметр. Значение угла, на котором наблюдается дифракционный максимум первого порядка, наиболее близко к:

Варианты ответа:

1. 0,15;
2. 0,25;
3. 0,10;
4. 0,05;
5.  $0,20\lambda$ .

18. Какие из приведенных ниже утверждений относятся к плоскополяризованному свету?

А. Свет распространяется только в одном направлении.

- Б. Световая волна поперечная.
- В. Вектор  $E$  имеет одну ориентацию.
- Г. Вектор  $H$  имеет одну ориентацию.
- Д. Световые лучи распространяются во взаимно перпендикулярных направлениях.

Варианты ответа:

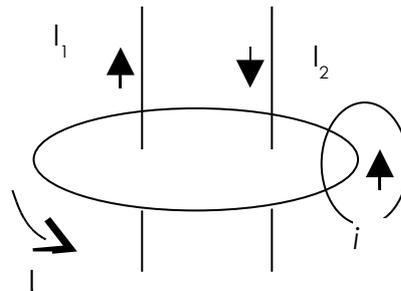
1. только В и Г;
2. только Б и Г;
3. только А и В;
4. только В и Д;
5. только Б и В.

19. Какие факторы будут влиять на результат вычисления циркуляции вектора магнитной индукции  $B$  по замкнутому контуру  $L$ ? ( $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $I$  – макроток,  $i$  – микроток)

- А. Направление токов.
- Б. Направление обхода контура.
- В. Величина микротока.
- Г. Величина макротока.

Варианты ответа:

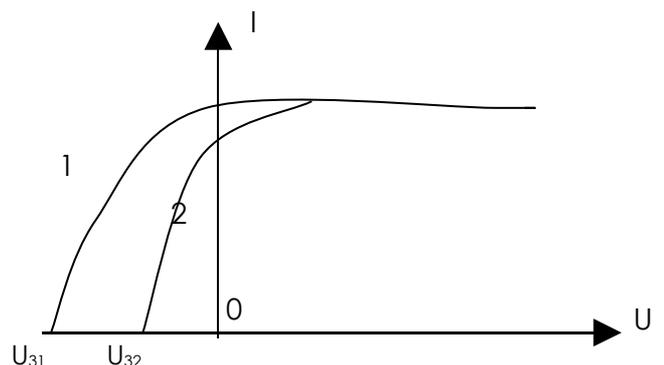
1. все эти факторы;
2. только Б, В и Г;
3. только А и Б;
4. только А, Б и Г;
5. только Б и В.



20. На рисунке изображены вольтамперные характеристики одного и того же фотоэлемента при различных условиях. Каким условиям соответствуют эти графики? ( $\nu$  – частота света,  $\Phi$  – световой поток)

Варианты ответа:

1.  $\nu_1 > \nu_2$ ;  $\Phi_1 > \Phi_2$ ;
2.  $\nu_1 = \nu_2$ ;  $\Phi_1 > \Phi_2$ ;
3.  $\nu_1 < \nu_2$ ;  $\Phi_1 = \Phi_2$ ;
4.  $\nu_1 > \nu_2$ ;  $\Phi_1 = \Phi_2$ ;
5.  $\nu_1 < \nu_2$ ;  $\Phi_1 < \Phi_2$ .



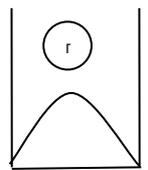
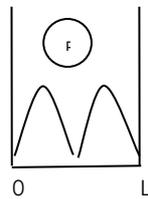
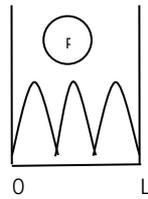
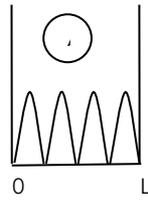
21. Бозоны – это частицы...

Варианты ответа:

1. имеющие размеры атома;
2. имеющие целое значение спина;
3. не имеющие спина;
4. не обладающие массой покоя;

5. имеющие не целое значение спина.

22. На рисунках приведены картины вероятности нахождения электрона в потенциальном ящике с бесконечно высокими стенами.



Какая из картин соответствует первому возбужденному состоянию?

Варианты ответа:

1. В;
  2. Б;
  3. А и Г;
  4. А;
  5. Г.
23. Наибольшая длина волны рентгеновских лучей, которые могут испытывать брэгговскую дифракцию на семействе кристаллических плоскостей, находящихся на расстоянии  $d$  друг от друга, равна:

Варианты ответа:

1.  $d/2$ ;
  2.  $2d$ ;
  3.  $d$ ;
  4.  $4d$ ;
  5.  $d/4$ .
24. Укажите верное утверждение. Ширина запрещенной зоны у

полупроводника...

Варианты ответа:

1. меньше, чем у диэлектрика;
2. больше, чем у диэлектрика;
3. увеличивается при нагревании;
4. на 2 порядка больше, чем у диэлектрика;
5. такая же, как у диэлектрика.

**25.** Атомное ядро состоит:

Варианты ответа:

1. из позитронов и нейтронов;
2. из электронов, протонов и нейтронов;
3. из электронов и протонов;
4. только из нейтронов;
5. из протонов и нейтронов.

### Ключи правильных ответов.

Номер вопроса	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	2	4	1	5	4	1	2	2	3
2	3	5	3	2	1	2	3	2	1	3
3	2	2	5	2	2	5	2	2	2	2
4	1	5	4	4	4	5	5	2	2	4
5	1	2	1	4	5	5	2	4	4	4
6	3	4	4	1	4	1	4	2	5	4
7	1	1	1	3	3	1	4	4	1	4
8	5	1	1	1	5	5	3	3	3	1
9	2	3	2	3	2	4	3	3	3	3
10	5	3	1	3	3	3	4	2	2	4

11	1	5	3	4	2	1	3	2	2	5
12	1	5	1	3	5	2	1	2	1	2
13	4	3	2	2	1	2	3	4	4	2
14	1	2	2	3	4	3	3	2	2	4
15	4	3	5	4	3	5	2	1	4	1
16	1	3	3	2	2	5	5	2	3	4
17	1	2	5	2	5	4	4	4	1	5
18	3	5	1	1	3	3	3	1	1	1
19	5	3	4	4	5	1	1	4	2	1
20	1	1	3	3	4	2	1	5	3	4
21	5	5	4	5	3	3	4	3	4	2
22	3	1	4	3	1	2	2	1	2	1
23	1	1	2	1	1	2	2	2	1	2
24	1	4	3	5	5	5	2	1	3	1
25	5	3	2	2	4	4	3	5	3	2

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.

### Основная

5. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.:Высшая школа, 1990 -2001.
6. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Милковская Л.Б. Курс физики. - М.: Высшая школа, 1973-1988, т. 1-3.
7. Савельев И.В. Курс физики. - М.: Наука, 1989, т. 1-3.
8. Астахов А.В. Курс физики. -М.: Наука, 1977-1983, т. 1-3.
9. Методические указания по выполнению лабораторных работ. ч. 1,2 3, 1991.
10. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. - М.: Наука, 1976.
11. Савельев И.В. Сборник вопросов и задач по общей физике. – М.: Астрель, 2001.
12. Сборник задач по общему курсу физики. Часть II: Электричество и магнетизм. Колебания и волны./Составители: Добросельский К.Г., Сетейкин А.Ю., Изд-во АмГУ, Благовещенск, 2003.

13. Сборник задач по общему курсу физики. Часть III: Оптика. /Составители: Добросельский К.Г., Сетейкин А.Ю., Изд-во АмГУ, Благовещенск, 2003.

### **Дополнительная**

1. Лабораторный практикум по физике./Под ред. А.С. Ахматова. -М.: Высш. шк., 1980.
2. Лабораторный практикум по физике./Под ред. Е.М. Гершензона, Н.Н. Малова. -М.: Просвещение, 1985.
3. Лабораторный практикум по физике./Под ред. Л.М. Гольдина. -М.: Наука, 1983.
4. Бурсиан Э.В. Физические приборы. -М.: Просвещение, 1984.
5. Чертов А.Г. Физические величины.- М.: Высшая школа, 1990.
6. Иродов И.Е. Задачи по общей физике. -М.: Наука, 1987.
7. Е.М. Новодворская, Э.Н. Дмитриев. Методика проведения упражнений по физике во ВТУЗе. М.: Высшая школа, 1968.

### **МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

1. Яворский Б.М., Селезнёв Ю.А. Справочное руководство по физике. -М.: Наука, 1989.
2. Лекционные видеодемонстрации.
3. Учебные видеофильмы: «Интерференция света», «Дифракция света», «Двулучепреломление. Оптическая анизотропия», «Фотоэффект», «Элементы механики сплошных сред».

## **ЧАСТЬ 3.**

**ПЛАН-КОНСПЕКТ ЛЕКЦИОННОГО КУРСА  
«ОБЩАЯ ФИЗИКА».**

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ.**

**ТЕМА: Предмет механики. Кинематика и динамика.**

**Классическая механика. Квантовая механика.**

**Релятивистская механика.**

**Предметом изучения физики** является материя, которая является объективной реальностью, существующей независимо от нас; познается органами чувств, находится в непрерывном движении. Формы существования в пространстве и времени: вещество и поле.

Под движением понимают всякое изменение вообще и выделяют следующие наиболее общие формы движения материи: физическую, химическую, биологическую и общественную. Самой простой из них является физическая форма движения материи.

Физика как наука изучает простейшие и вместе с тем наиболее общие закономерности явлений природы, свойства и строение материи, и законы её движения. В физической форме движения материи принято выделять механическую, тепловую, электромагнитную и квантово-механическую формы движения. Курс физики разбивают на следующие разделы – механика, молекулярная физика и термодинамика, электромагнетизм, квантовая механика, физика конденсированного состояния, физика атомного ядра и элементарных частиц.

Физика является основой всех естественных наук (например, химии, биологии, географии, астрономии и т.д.), так как физическая форма движения материи входит в более сложные формы движения как их составная часть. При этом в настоящее время нет четкой границы между физикой и естественными науками, поскольку современные физические методы

исследования широко внедряются в них и возникают соответственно такие дисциплины, как физическая химия, биофизика, геофизика, астрофизика и т.д.

**Физика – наука экспериментальная.** Вся история развития физики показывает, что новые идеи и законы являются следствием опыта, эксперимента. В основе каждого раздела курса физики лежат фундаментальные законы физики, которые не выводятся теоретически, они являются обобщением опытных фактов.

В физике реализуется, в основном, следующая схема познания, изучения явлений природы: 1) наблюдение какого-либо нового явления в природе, проведение опытов – многократного воспроизведения данного явления в контролируемых условиях; 2) объяснения результатов опытов с помощью различных гипотез, позволяющих теоретически объяснить закономерности протекания этого явления; 3) после экспериментальной проверки гипотеза либо отбрасывается, либо становится законом, позволяющим описать данную область явлений и подсказать новые явления, новые закономерности. Эти предсказания проверяются на опыте, и схема познания реализуется на более высоком уровне.

Законы физики представляют собой количественные соотношения и формулируются на математическом языке.

Развитие физики стимулирует развитие математики. Изучение квантово-механической формы движения материи, физики атомного ядра и элементарных частиц, ранних этапов развития Вселенной требуют разработки новых понятий и методов в математике.

### **ТЕМА : Элементы кинематики**

***Физические модели: материальная точка (частица), система материальных точек, абсолютно твёрдое тело, сплошная среда.***

***Пространство и время.***

**Материальная точка (м.т.)** – тело, размерами которого можно пренебречь в условиях данного движения.

**Абсолютно твердое тело (а. т. т)** - это абсолютно недеформируемое тело или тело, расстояние между двумя любыми точками которого остается постоянным при его движении.

**Сплошная среда** – единая система, свойства которой в каждой точке одинаковы.

**Пространство и время.** В классической механике пространство считают однородным, однозначным, изотропным, трехмерным, подчиняющимся геометрии Евклида. Время- однородно, однозначно, изотропно, одномерно.

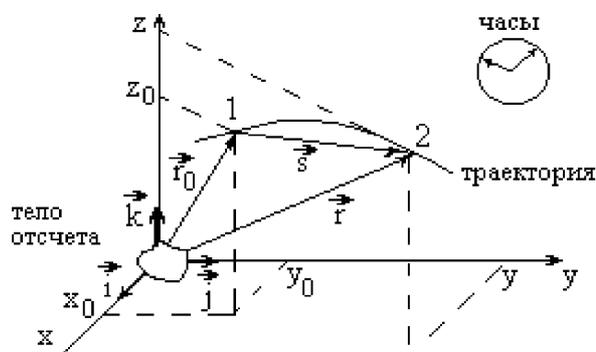
## Кинематическое описание движения.

Под механическим движением понимают изменение с течением времени взаимного положения тел в пространстве.

**Поступательное движение** – это такое движение, при котором любая прямая, проведенная в теле, перемещается параллельно самой себе.

**Вращательное движение вокруг неподвижной оси** – это такое движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой, называемой осью вращения (она может находиться вне тела).

**Система отсчета (С.О.)** - включает в себя тело отсчета, связанную с ним систему координат и прибор (часы) для измерения времени.



Линию, по

называют **траекторией** движения.

которой движется тело,

Положение тела в пространстве можно задать либо с помощью координат  $(x, y, z)$ , либо с помощью **радиус-вектора**  $r$ , проведенного из начала координат в рассматриваемую точку (для точек 1 и 2 на рис.1 это векторы  $r_0$  и  $r$ ),

$$r = i \cdot x + j \cdot y + k \cdot z$$

где вектора  $i, j, k$  - это единичные орты, указывающие направления осей OX, OY, OZ,

$x, y, z$  - проекции вектора  $r$  на координатные оси.

Вектор  $S$ , соединяющий начальное и конечное положение тела (точки 1 и 2 на рис.1), называют **перемещением**. Он связан с радиус-векторами  $r_0$  и  $r$  и следующим равенством:

$$S = r - r_0$$

Модуль вектора перемещения меньше или равен **пути** - расстоянию, пройденному телом по траектории. Эти величины совпадают по модулю в случае прямолинейного движения.

Скорость и ускорение. Нормальное и касательное ускорение.

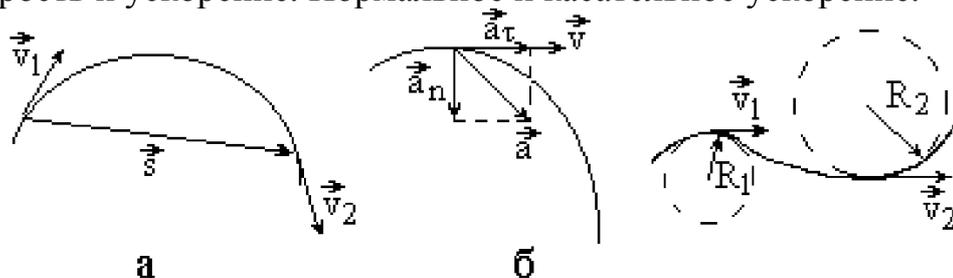


Рис.2

**Средняя путевая скорость**  $v_{cp}$  - скалярная физическая величина, равная отношению пути, пройденного телом за время  $t$ , к этому времени  $t$ :

$$v_{cp} = \frac{S}{t}$$

**Мгновенная скорость** -

скорость тела в данной точке траектории, равная первой производной от радиус-вектора  $r$  по времени  $t$ :

$$\vec{v} = \frac{dr}{dt}$$

**Мгновенное ускорение** - быстрота изменения скорости, ускорение в данной точке траектории, равное первой производной от скорости по времени  $t$  или второй производной от радиус-вектора по времени  $t$ :

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2r}{dt^2}$$

Проекцию вектора ускорения  $a$  на направление касательной к траектории называют касательным (тангенциальным) ускорением  $a_\tau$ , а на направление, перпендикулярное к касательной - нормальным ускорением  $a_n$ .

$$a = a_\tau + a_n; \quad \vec{a}_\tau = \frac{dv}{dt}; \quad a_n = \frac{v^2}{R};$$

где  $v$  - численное значение скорости;  $R$  - **радиус кривизны траектории** в данной ее точке, он равен радиусу окружности  $R$ , вписанной в малый участок траектории вблизи этой точки (рис.2,в).

Тангенциальное ускорение характеризует изменение скорости тела по величине (по модулю скорости), а нормальное ускорение - по направлению.

**Движение точки по окружности. Угловая скорость и угловое ускорение. Вектор угловой скорости и углового ускорения.**

Пусть м.т. движется со скоростью  $v$  по окружности радиуса  $r$  вокруг неподвижной оси вращения (рис. 3). При повороте на угол  $d\varphi$ , радиус-вектор  $r$

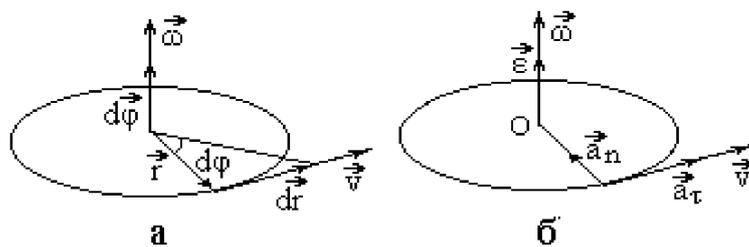


Рис.3

получит приращение  $dr$ .

Вектор  $dr$  направлен по касательной к окружности.

**Вектором элементарного углового перемещения  $d\varphi$**  называется вектор, направление которого связано с направлением вращения правилом правого буравчика, поступательное движение буравчика определяет направление вектора  $d\varphi$ .

**Угловая скорость  $\omega$**  характеризует быстроту вращения м.т., равная первой производной от вектора углового перемещения  $d\varphi$  по времени  $t$ :

$$\vec{\omega} = \frac{d\varphi}{dt}$$

Направления вектора угловой скорости  $\omega$  и вектора элементарного углового

$d\varphi$  перемещения совпадают.

**Вектор углового ускорения  $\varepsilon$**  характеризует быстроту изменения угловой скорости и равен первой производной от угловой скорости  $\omega$  по времени  $t$ :

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\omega}{dt}$$

В случае ускоренного вращения направления векторов  $\varepsilon$  и  $\omega$  совпадают (рис.3,б), для замедленного вращения - направлены в противоположные стороны.

Для описания вращательного движения тела используют **частоту обращения  $n$** , определяемую как число оборотов, совершаемых телом за единицу времени, и **период обращения  $T$**  как время одного полного оборота. Справедливы следующие формулы взаимосвязи:

$$n = \frac{N}{t}; T = \frac{2\pi r}{v}; \omega = 2\pi n$$

***Формулы взаимосвязи линейных и угловых характеристик при вращательном движении***

$$v = [\omega; r]; a_n = \omega^2 R; a_t = \varepsilon \cdot R;$$

где  $R$  – радиус окружности.

**ТЕМА: Динамика частиц.**

***Основная задача динамики. Понятие состояния в классической механике. Уравнение движения.***

Кинематика устанавливает законы движения материальной точки, но не указывает причины, вызвавшие это движение, а также факторы, влияющие на вариации кинематических параметров движения.

Рассматривая механическое взаимодействие данного тела с другими телами, приводящее к изменению состояния тела, изменению его скорости, т.е. к возникновению ускорения, можно записать уравнение движения тела. Это и есть основная задача динамики.

***Масса и импульс. Границы применимости классического способа описания движения частиц.***

Все тела изменяют свою скорость не мгновенно, а постепенно при их взаимодействии с другими телами. Способность тела сохранять свое состояние называется **инертностью**. Количественной характеристикой инертности тела является его **масса  $m$** .

Величина, равная произведению массы тела на его скорость, характеризующая количество движения тела называется **импульсом тела  $P$** .

$$P = m \cdot v$$

Импульс величина векторная, направление вектора импульса совпадает с направлением вектора скорости.

Классический способ описания состояния тела можно применять только в случае, если тело движется с малыми скоростями. Критерием малости скорости является выполнение условия:  $v \ll c$ ,  $c$  - скорость света в вакууме.

## ***Современная трактовка законов Ньютона. Первый закон Ньютона и понятие инерциальной системы отсчёта.***

В основе классической механики движения м.т. лежат три закона Ньютона, они не доказываются, они являются обобщением опытных фактов.

**Первый закон Ньютона:** тело покоится или движется равномерно и прямолинейно, если на него не действуют другие тела или их действие скомпенсировано.

Оказывается, что первый закон Ньютона выполняется не во всех системах отсчета. Если выбрать С.О., связанную с поездом, движущимся равномерно и прямолинейно, то шарик, лежащий на гладком горизонтальном столе в купе вагона, будет покоиться, т.к. действующие на него силы тяжести и нормальной реакции опоры компенсируют друг друга. Однако, если поезд будет двигаться с ускорением, то без видимых причин шарик начнет двигаться относительно поезда, т.е. приобретет ускорение. Поэтому среди всех С.О. выделяют **инерциальные системы отсчета (ИСО)** как С.О., в которых выполняется первый закон Ньютона и соответственно второй и третий законы Ньютона.

Наиболее близкой к ИСО можно считать С.О., связанную с Солнцем. Для многих физических явлений систему отсчета, связанную с Землей, также можно считать ИСО. В теоретическом плане ИСО существует бесконечное множество, все они движутся равномерно и прямолинейно, т.е. без ускорения, или покоятся.

## ***Второй закон Ньютона как уравнение движения. Сила как производная импульса. Виды сил в механике.***

Для общности рассуждений механическое взаимодействие тела с другими телами описывают понятием **силы  $F$** , которая определяется как векторная физическая величина, характеризующая механическое взаимодействие данного тела с другими телами, приводящее к его деформации или к возникновению ускорения.

Введение силы  **$F$**  позволяет количественно описать такие взаимодействия и выявить в них наиболее важные особенности. С учетом этого о взаимодействии

Сила является количественной характеристикой соответствующего вида взаимодействия. В природе существует четыре вида взаимодействия: сильное; слабое; гравитационное и электромагнитное. В механике

проявляются только силы гравитационного и электромагнитного взаимодействия.

Гравитационное взаимодействие выражается законом всемирного тяготения:

$$\vec{F} = G \frac{m \cdot M}{r^2} \cdot \frac{r}{r};$$

Проявлением этого взаимодействия на Земле является существование силы тяжести:

$$F = m \cdot g; \quad g - \text{ускорение свободного падения};$$

И сила, с которой тело действует на опору или подвес, - вес тела:

$$P = m(g \pm a)$$

Электромагнитное взаимодействие выражается законом Кулона:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot Q}{r^2} \cdot \frac{r}{r};$$

В механике это взаимодействие объясняет существование сил упругости и сил трения.

Трение бывает сухим и вязким, в первом случае сила трения пропорциональна силе нормального давления  $N$  (пропорциональной силе тяжести), во втором – скорости движения тела  $v$ .

$$F_T = \mu \cdot N; \quad F_T = \eta \cdot v \quad \text{или} \quad F_T = \eta \cdot v^2 \quad \text{для случая больших скоростей.}$$

Сила упругости пропорциональна величине деформации:

$$F_y = k \cdot x$$

**Второй закон Ньютона** количественно описывает механическое взаимодействие тел, связывая между собой действующую на тело силу с изменением его

импульса. Согласно этому закону первая производная от импульса  $P$  тела по времени  $t$  равна векторной сумме сил, действующих на тело:

$$\frac{dP}{dt} = \sum_1^N \vec{F}_i$$

Формула позволяет рассматривать движение, при котором масса тела может изменяться (реактивное движение).

Если масса тела не зависит от времени, то тогда выражение можно записать, вводя в него ускорение тела:

$$m \cdot a = F$$

и сформулировать **второй закон Ньютона** следующим образом: произведение массы тела на его ускорение равно векторной сумме сил, действующих на тело.

### Третий закон Ньютона.

**Третий закон Ньютона** устанавливает дополнительные связи между силами, возникающими при взаимодействии, и облегчает решение задачи о механическом движении тел.

*Согласно этому закону силы, действующие между двумя телами, равны по модулю и противоположны по направлению, лежат на одной прямой, имеют одну природу.*

$$F_{12} = F_{21}$$

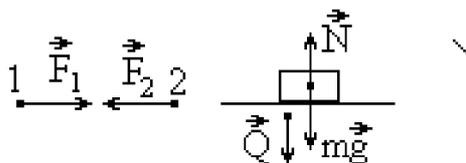


Рис.4

### ТЕМА : Система материальных точек.

Внутренние и внешние силы. Центр масс (центр инерции).

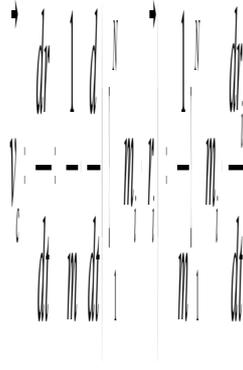
Если рассматривать систему материальных точек, т.е. совокупность м.т., которые взаимодействуют только между собой и описываются общими закономерностями, то все силы можно разделить на: внешние (действуют со стороны тел, не входящих в систему) и внутренние (действуют внутри системы). Для описания поведения системы м.т. введем понятие **центра масс системы**.

**Центром масс системы** называется точка пространства, положение которой

относительно какой-либо ИСО определяется радиус-вектором  $r_c = \frac{\sum_1^N m_i \cdot r_i}{m}$

где  $m$  - сумма масс тел (материальных точек) системы;  $r_i$  - радиус-вектор  $i$ -го тела (м.т.) системы.

Если поместить в центр масс тело в виде материальной точки массы  $m$ , то оно будет двигаться со скоростью  $v_c$ , равной



Если подставить полученное выражение во второй закон Ньютона получим закон движения центра масс:

$$m \cdot \frac{dv_c}{dt} = \sum_1^N \vec{F}_i$$

**Центр масс системы** - это точка пространства, к которой приложены все силы, вызывающие по отдельности поступательное движение системы. Поэтому поступательное движение системы можно моделировать движением тела в виде м.т. массы  $m$ , помещенного в центре масс системы. Этот прием является удобным при изучении такого движения системы.

Если система является замкнутой или внешние силы, действующие на нее, компенсируют друг друга, то ее центр масс будет двигаться равномерно и прямолинейно или покоиться. Поэтому в ИСО, связанной с ним, проще описать движение тел системы.

Введенное выше понятие центра масс системы включает в себя как частный случай понятия центра масс и для абсолютно твердого тела. Действительно а.т.т. можно разбить на малые объемы  $dV$  и представить в виде совокупности м.т., между которыми действуют внутренние силы. Отличием для а.т.т. является тот факт, что расстояния между м.т. этого тела остаются со временем неизменными. Размеры объемов  $dV$  (м.т.) нужно выбирать такими, чтобы можно было пренебречь дискретным (атомным) строением вещества, т.е. эти объемы должны содержать достаточное количество одинаковых по свойствам атомов.

Центр масс а.т.т. совпадает с его центром тяжести, но является более общим понятием, справедливым и в отсутствие внешних гравитационных полей. Положение центра масс а.т.т. можно найти экспериментально, определяя положение его центра тяжести.

**Импульс системы материальных точек. Закон сохранения импульса как фундаментальный закон природы.**

Рассмотрим систему, состоящую из  $N$  тел (на рис.6 для простоты приведена система из трех тел - м.т.).

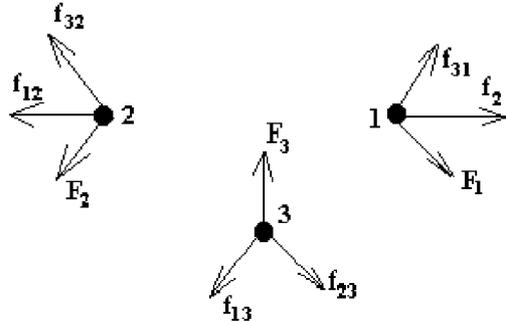


Рис.5

На каждое тело системы действуют внешние силы  $F_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) со стороны не входящих в эту систему тел (м.т.), и внутренние силы  $f_{ik}^{вн}$  ( $i, k = 1, \dots, N$ ) со стороны других тел системы. Внутренние силы системы связаны между собой третьим законом Ньютона, т.е. попарно равны.

$$f_{ik} = f_{ki}$$

Запишем уравнения второго закона Ньютона для всех тел системы и затем сложим эти уравнения:

$$\frac{dP_1}{dt} = \vec{F}_1 + \sum_k \vec{f}_{1k}; \quad \frac{dP_2}{dt} = \vec{F}_2 + \sum_k \vec{f}_{2k}; \quad \dots; \quad \frac{dP_N}{dt} = \vec{F}_{N1} + \sum_k \vec{f}_{Nk}$$

$$\sum_1^N \vec{P}_i = \vec{P}_c; \quad \sum_{ik} \vec{f}_{ik} = 0; \quad \sum_i \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N; \quad \frac{dP_c}{dt} = \sum_i \vec{F}_i$$

Векторная сумма всех внутренних сил равна нулю и поэтому векторная сумма импульсов тел системы равна сумме внешних сил, действующих на систему.

Итак, согласно векторная сумма импульсов тел системы (или импульс системы) изменяется за счет действия внешних сил.

Если взять **замкнутую систему**, т.е. систему, на которую не действуют

внешние силы ( $F_{\text{т.}} = 0$ ), то тогда выполняется **закон сохранения импульса**:

*векторная сумма импульсов тел замкнутой системы остается постоянной или импульс  $P_c$  центра масс замкнутой системы остается постоянным*

Реально выделить замкнутую систему достаточно трудно. Но и в незамкнутых системах в ряде случаев можно использовать закон сохранения импульса. Перечислим их.

**1. Внешние силы компенсируют друг друга.** Например, два тела, движущиеся по гладкой горизонтальной поверхности (отсутствуют силы трения) навстречу друг другу. В этом случае внешние силы - силы тяжести:  $m_1g$ ,  $m_2g$ , нормальные силы реакции опоры компенсируют друг друга, а возникающие при столкновении тел внутренние силы, силы деформации, не могут изменить импульс системы.

**2. Внешние силы не компенсируют друг друга, но их проекция на какую-либо ось остается равной нулю.** Хотя импульс системы изменяется, но его проекция на эту ось сохраняется. Примером такой системы является система, состоящая из двух тел, одно из которых движется по гладкой поверхности, а другое падает вертикально вниз со скоростью и испытывает абсолютно неупругое столкновение с первым телом. В результате этого они движутся с одинаковой скоростью, образуя единое целое (рис.6).

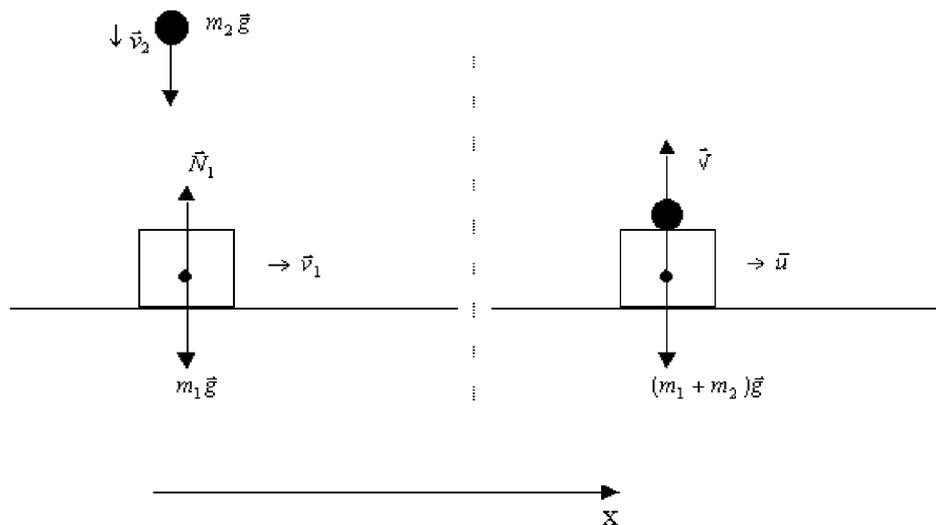


Рис. 6

3. Внешние силы значительно меньше по модулю внутренних сил, действующих между телами в системе. Это наблюдается при сильных кратковременных взаимодействиях: удар, выстрел, разрыв снаряда и т.д. В этих случаях изменение импульса каждого тела системы, в основном, определяется внутренними силами системы.

### Твёрдое тело в механике. Момент импульса вращающегося тела.

Моментом импульса  $L$  м.т. массы  $m$ , движущейся со скоростью  $v$  относи-

тельно оси вращения, называют вектор, определяемый по формуле

$$L = [r; P] = [r; mv]; \quad L = r \cdot P \cdot \sin \alpha$$

где  $P$  - импульс м.т.;  $r$  - радиус-вектор, соединяющий м.т. с осью вращения и перпендикулярный к этой оси. Направлен вектор момента импульса по правилу векторного произведения (по оси вращения).

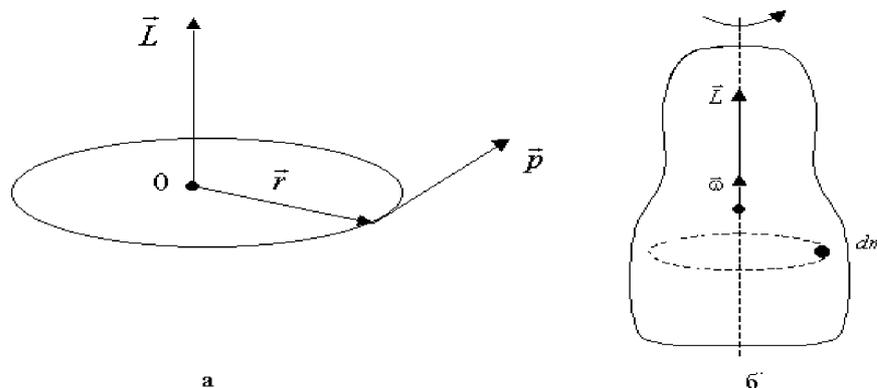


Рис.7

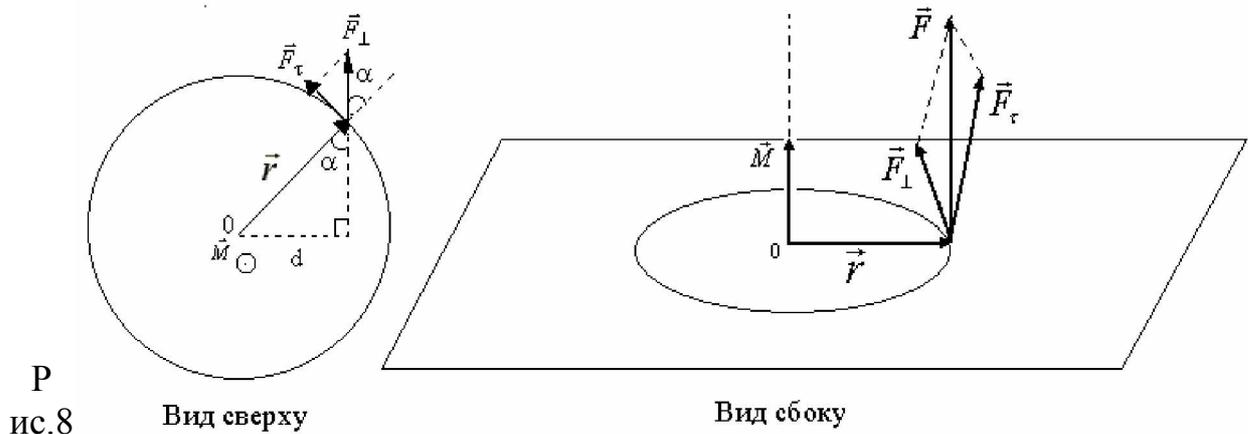
### Момент силы.

Пусть к материальной точке массы  $m$  приложена сила  $F$ ; ее составляющая в плоскости, перпендикулярной к оси вращения, обозначена как  $F_{\perp}$ .

Моментом силы  $F$  относительно оси вращения называют вектор, определяемый формулой:

$$M = [r; F]; \quad M = r \cdot F \cdot \sin \alpha; \quad M = F \cdot d$$

где  $r$  - это вектор, проведенный от оси вращения к м.т. (рис.8, ось вращения проходит через точку  $O$  перпендикулярно к вектору);  $d = r \cdot \sin \alpha$  - плечо силы кратчайшее расстояние от линии действия силы до оси вращения;



Р  
ис.8

Вид сверху

Вид сбоку

В

ктор момента силы направлен вдоль оси вращения.

е

### Момент инерции твёрдого тела.

Величина  $I$ , называемая **моментом инерции м.т. относительно оси вращения**, определяется соотношением:

$$I = m \cdot R^2$$

В случае однородного тела момент инерции относительно оси вращения можно определить по формуле:

$$I = \int_V \rho R^2 dV$$

Где  $\rho$  – плотность вещества.

Приведем формулы для моментов инерции  $I$  тел правильной геометрической формы относительно оси вращения  $OO_1$ , проходящей через их центр тяжести.

1. **Сплошной однородный диск** (или цилиндр) массы  $m$ , радиуса  $R$  и высоты  $h$

$$I = \frac{1}{4} mR^2$$

2. **Однородный шар** массы  $m$  и радиуса  $R$

$$I = \frac{2}{5} mR^2$$

3. **Тонкий однородный стержень** массы  $m$  и длины  $l$

$$I = \frac{1}{12} ml^2$$

Для расчета момента инерции тела относительно произвольной оси вращения можно воспользоваться формулой **теоремы Штейнера**

$$I = I_0 + ma^2,$$

где  $I, I_0$  - моменты инерции тела массы  $m$  относительно оси, проходящий через центр масс тела ( $I_0$ ) и параллельной ей произвольной оси ( $I$ ), отстоящей на расстоянии  $a$ .

### **Уравнение динамики вращающегося тела.**

Если на м.т. действует момент сил, то происходит вращение вокруг оси, относительно которой создан момент вращения. При этом м.т. будет иметь момент импульса, направленный вдоль той же оси. По аналогии со вторым законом Ньютона можно записать:

$$\frac{dL}{dt} = \vec{M} \quad \text{или} \quad \vec{\varepsilon} = \frac{\vec{M}}{I};$$

Две формы записи основного закона динамики вращательного движения.

### **Закон сохранения момента импульса.**

Рассмотрим систему, состоящую из  $N$  взаимодействующих между собой материальных точек, вращающихся вокруг какой-либо оси. Запишем для каждой м.т. основное уравнение динамики вращательного движения, выделяя отдельно моменты внешних  $\vec{M}$  и внутренних  $\vec{M}_{ik}$  сил.

$$\frac{dL_1}{dt} = \sum_k \vec{M} + \sum_k \vec{M}_{1k}; \quad \frac{dL_2}{dt} = \sum_k \vec{M} + \sum_k \vec{M}_{2k}; \dots; \quad \frac{dL_N}{dt} = \sum_k \vec{M} + \sum_k \vec{M}_{Nk};$$

Просуммируем уравнения по всем м.т. системы, введем момент импульса  $L$  системы и учтем что согласно третьему закону Ньютона векторная сумма моментов внутренних сил, действующих на м.т., относительно оси вращения, равна нулю.

$$\sum_i \frac{dL_i}{dt} = \sum_k \vec{M}_{ik} + \sum_k \vec{M}; \quad \sum_i \frac{dL_i}{dt} = \frac{dL}{dt}; \quad \sum_i \vec{M}_{ik} = 0$$

$$\frac{dL}{dt} = M$$

Из формулы следует **закон сохранения момента импульса**, согласно которому момент импульса замкнутой системы остается постоянным относительно любой оси вращения

$$L = const \quad \text{или} \quad L = I \cdot \omega = const$$

где  $I$ ;  $\omega$ ; - момент инерции и угловая скорость вращения  $i$ - й м.т. системы.

При вращательном движении, как и при поступательном, общая масса тел замкнутой системы остается постоянной, но при вращательном движении внутренние силы могут изменить распределение массы относительно оси вращения, т.е. моменты инерции тел системы. Это при неизменном моменте импульса замкнутой системы приводит к изменению угловой скорости вращения входящих в нее тел.

Приведем ряд примеров, подтверждающих это явление. Учтем, что во всех этих примерах моменты внешних сил (силы тяжести, реакции опоры) относительно вертикальной оси вращения равны нулю и поэтому момент импульса системы остается постоянным.

**Пример 1.** При переходе человека (м.т.) массы  $m_x$  в центр платформы (однородный диск радиуса  $R$ ) массы  $m_2$  угловая скорость вращения платформы увеличивается.

**Пример 2.** При вращении фигуристки изменение положения ее рук приводит к изменению момента инерции фигуристки относительно вертикальной оси вращения и соответственно к изменению угловой скорости ее вращения.

Если фигуристка прижимает руки к телу, то тем самым она уменьшает свой момент инерции ( $I_2 < I_1$ ) и увеличивает угловую скорость вращения.



**Пример 3. Скамья Жуковского.** Человек стоит на скамье (их общий момент инерции относительно оси вращения равен  $I_1$ ) и держит в руках колесо (его момент инерции  $I_2$ ), способное вращаться вокруг вертикальной оси, совпадающей с осью вращения скамьи. Человек приводит во вращение колесо с угловой скоростью  $\omega_2$ . Тогда он

со скамьей начнет вращаться в противоположную сторону с угловой скоростью  $\omega_1$ .

В этом опыте моменты инерции тел системы не изменяются, но внутренние силы совершают работу по изменению угловой скорости вращения входящих в систему тел.

### **Гироскопы**

Под гироскопом понимают быстро вращающееся симметричное твердое тело, ось вращения которого (ось симметрии) может произвольно изменять свое положение в пространстве. Например, гироскопами являются детский волчок и массивный диск, закрепленный так, чтобы он мог свободно вращаться вокруг трех взаимно перпендикулярных осей  $AA_1$ ,  $BB_1$  и  $CC_1$  (рис. 9а).

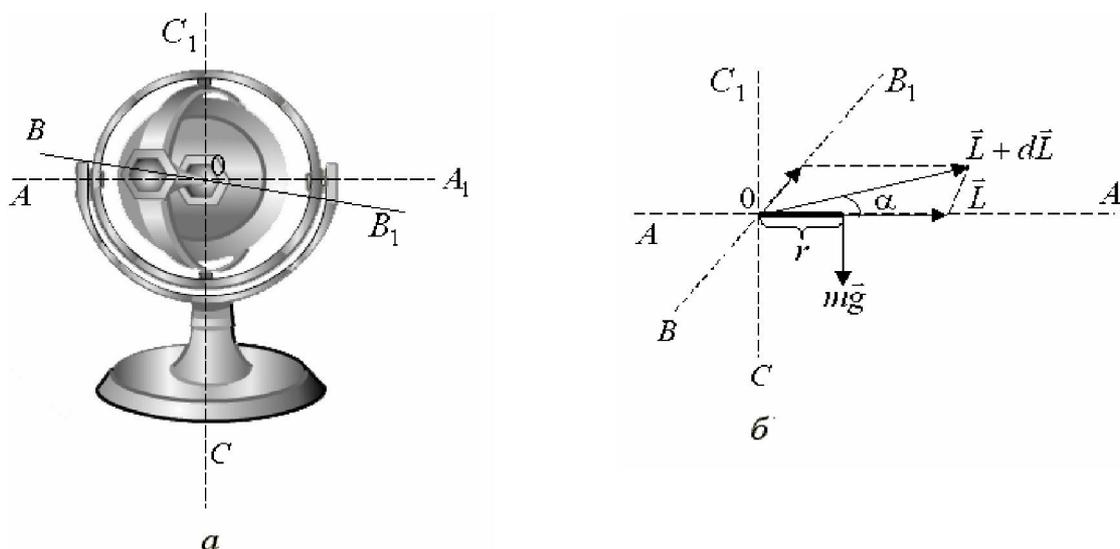


Рис. 9

Применяемые в технике гироскопы обычно являются уравновешенными, т.е. их центры тяжести совпадают с центром подвеса (точка  $O$ ) и поэтому моменты сил тяжести, действующих на них относительно любой оси вращения, равны нулю. В этом случае гироскоп можно рассматривать как замкнутую систему, для которой выполняется закон сохранения момента импульса.

Если раскрутить диск вокруг оси  $AA_x$  с большой угловой скоростью  $\omega$ , то возникающий при этом момент импульса  $L$ , направленный вдоль оси вращения  $AA_1$  (рис.9,б), будет сохранять свое положение в пространстве и соответственно сохраняет свое направление и ось вращения. Так, например, при повороте подставки, на которой укреплен гироскоп, в ту или иную сторону,

положение оси  $AA_1$  останется неизменным из-за того, что момент внешних сил относительно осей вращения будет равен нулю.

Оказывается, что направление оси  $AA_1$  практически не изменится и при кратковременных внешних воздействиях, при которых момент внешних сил относительно какой-либо оси будет отличным от нуля. Пусть на гироскоп в течение малого промежутка времени  $t$  будет действовать сила тяжести  $mg$ , приложенная на расстоянии  $r$  от точки  $O$  (рис.9,б). Она создаст момент силы, направленный вдоль оси  $BB_1$ , и согласно закона вращательного движения приведет к приращению вектора момента импульса  $\Delta L$ . Вследствие этого ось вращения изменит свое положение в пространстве и установится вдоль нового направления вектора  $L + \Delta L$ . Из-за малого времени действия внешней силы и большого модуля вектора направление оси  $AA_1$  в пространстве практически не изменится.

Этот факт: сохранения первоначального направления оси вращения гироскопа при любых его перемещениях и случайных кратковременных воздействиях используется в различных навигационных приборах, в которых фиксируется определенное направление оси вращения в пространстве (вертикальное направление, направление на северный географический полюс Земли и т.д.), относительно которого затем и определяется направление движения объекта и, по мере необходимости, корректируется его курс и местоположение.

Если внешняя сила будет действовать постоянно, то тогда поворот оси  $AA_1$  будет происходить вслед за поворотом вектора  $L$ , и гироскоп будет вращаться вокруг оси с угловой скоростью, говорят, он будет совершать прецессию.

Кажущаяся на первый взгляд возможность поворота гироскопа вокруг оси  $BB_1$  под действием силы  $mg$  опровергается основным уравнением динамики вращательного движения.

При винтовой нарезке ствола ружья или орудия такое движение (прецессию) совершает пуля или снаряд вокруг оси вращения, направленной в каждый момент времени по скорости их движения, т.е. по касательной к траектории. Это увеличивает дальность и устойчивость полета пули и снаряда, способствует попаданию их в цель лобовой частью, увеличивает точность попадания ввиду отсутствия кувыркания пули и снаряда при их полете.

**ТЕМА: Закон сохранения энергии.**

**Работа силы. Кинетическая энергия тела. Теорема о кинетической энергии**

Под элементарной работой  $dA$ , совершаемой силой  $F$  на элементарном перемещении  $ds$ , называют величину, равную скалярному произведению

$$dA = Fds = Fds \cos \alpha = F_s dl,$$

где угол  $\alpha$  - угол между векторами силы  $F$  и перемещением (рис.10а);  $ds$  - вектор элементарного перемещения,

$dl$  - элементарный путь пройденный точкой приложения силы.

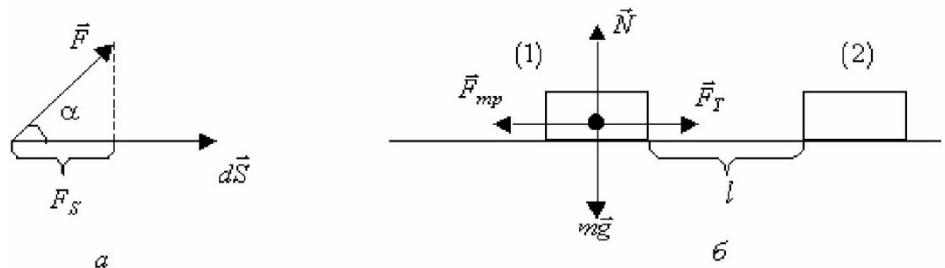


Рис.10

Работа силы на конечном перемещении равна сумме элементарных работ:

$$A = \int dA = \int F dl$$

Если сила постоянна ( $F = \text{const}$ ), то ее работа на прямолинейном участке длины запишется следующим образом:

$$A = F l \cos.$$

Работа силы может быть положительной, отрицательной или равной нулю в зависимости от выбора системы отсчета и ориентации векторов силы и перемещения.

Чтобы ввести понятие о кинетической энергии  $W_k$  тела, запишем элементарную работу  $dA$  силы  $F$  в другом виде:

$$\vec{F} = \frac{dP}{dt} = m \frac{dv}{dt} \quad ; \quad dA = m \frac{dv}{dt} \cdot dl = m \cdot v dv$$

Тогда для работы силы  $F$ , переводящей тело из состояния 1 в состояние 2 можно записать:

$$A = \int_{v_1}^{v_2} m \cdot v dv = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$$

Из полученной формулы следует, что работа силы равна разности двух величин, определяющих начальное и конечное состояния тела. При этом условия перехода из состояния 1 в состояние 2 не оказывают влияние на записанное выражение. Поэтому можно ввести функцию состояния тела, его кинетическую энергию  $W_k$  как *величину, характеризующую способность тела совершать работу за счет изменения скорости его движения и равную*

$$W = \frac{mv^2}{2} + const$$

В этом выражении постоянную выбирают, предположив, что при нулевой скорости движения тела его кинетическая энергия равна нулю.

Кинетическая энергия тел не зависит от того, как была достигнута данная скорость, она является функцией состояния тела, положительной величиной, зависящей от выбора системы отсчета.

Введение  $W_k$  позволяет сформулировать теорему о кинетической энергии, согласно которой алгебраическая сумма работ всех сил, действующих на тело, равна приращению кинетической энергии тела:

$$\Delta W_k = \Delta A$$

Эта теорема широко используется для анализа взаимодействия тел не только в механике, но и в других разделах курса физики, таких как электростатика, постоянный ток, электромагнетизм, колебания и волны и т.д.

### ***Кинетическая энергия вращающегося абсолютно твердого тела***

Соотношение для тела, совершающего вращательное движение можно получить аналогичным образом. В итоге получим следующее соотношение:

$$W_k = \frac{I\omega^2}{2} + const$$

### ***Потенциальная энергия взаимодействующих тел. Теорема о потенциальной энергии***

Под **потенциальной энергией**  $W_p$  взаимодействующих тел или частей одного тела понимают величину, характеризующую их способность совершать работу за счет изменения взаимного расположения тел или частей одного тела. Потенциальная энергия в одинаковой степени характеризует все взаимодействующие тела или их части. При этом между ними действуют

**консервативные силы**, работа этих сил не зависит от траектории движения тел, но определяется их начальными и конечными положениями.

Потенциальные взаимодействия принято обычно описывать введением силового поля, а именно, считается, что одно тело взаимодействует в месте своего расположения с силовым полем, созданным другими телами. Такой подход удобно использовать в том случае, когда движение одного тела (например, первого) слабо влияет на движение другого тела (второго). Тогда можно считать, что первое тело находится в потенциальном поле, созданном вторым телом, и потенциальную энергию их взаимодействия приписать первому телу. Так, например, говорят о потенциальной энергии тела в поле тяготения Земли, о потенциальной энергии заряда в электрическом поле и т.д. При этом движение тела (заряда) слабо влияет на силовое поле, в котором оно движется. Вспомним, что обычно говорят: тело падает на Землю, а не Земля падает на тело. Этим самым отмечают тот факт, что движение тела практически не изменяет положение Земли.

Примерами консервативных сил в механике являются силы тяготения и упругости, а неконсервативных сил - силы трения, сопротивления, тяги, силы химических реакций, возникающих при разрыве снаряда, при выстреле и т.д.

Название «консервативные» силы связано с тем, что полная механическая энергия  $W_M$  системы тел, взаимодействующих между собой посредством только консервативных сил, сохраняется.

Выведем формулы для потенциальных энергий взаимодействия тел, между которыми действуют силы тяготения и силы упругости.

### 1. Потенциальная энергия тела в поле тяготения Земли.

Между телом (м.т.) массы  $m$  и Землей (однородный шар радиуса  $R_3$ ) массы  $M_3$  действует сила тяготения:

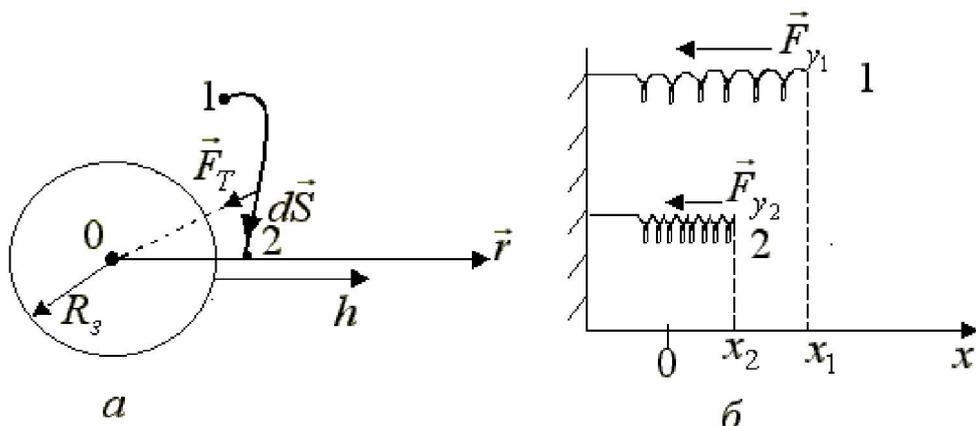


Рис.11

$$F = G \frac{mM_3}{R^2}$$

Рассчитаем работу  $A_{12}$  силы тяготения при переходе тела из точки 1 в точку 2, находящихся соответственно на расстояниях  $r_1$  и  $r_2$  от центра Земли:

$$A_{12} = \int_1^2 F dr = G \int_1^2 \frac{mM_3}{R^2} dr = GmM \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Из формулы следует, что работа силы тяготения определяется убылью величин, зависящих только от начального и конечного положения тела и Земли. Значит, силы тяготения являются консервативными силами, а сами эти величины представляют собой потенциальные энергии гравитационного взаимодействия тела и Земли:

$$W_p = G \frac{mM_3}{r} + const$$

Потенциальная энергия  $W_p$  определяется с точностью до постоянной величины; ее нулевой уровень отсчета  $W_p$  выбирается произвольно для удобства решения конкретных задач.

## 2. Потенциальная энергия упругодеформированного тела.

Рассмотрим работу силы упругости при сжатии пружины из состояния 1 до состояния 2 (рис.12б) с координатами  $x_1$  и  $x_2$  соответственно:

$$A_{12} = \int_1^2 kx \cdot dx = \frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}$$

Из соотношения следует, что сила упругости является консервативной силой.

Обобщая формулы, можно сформулировать **теорему о потенциальной энергии**: работа консервативных сил, действующих между телами или частями одного тела равна убыли их взаимной потенциальной энергии.

Для тела, движение которого слабо влияет на движение другого тела, создающего силовое поле, **теорему о потенциальной энергии** можно

сформулировать так: *работа консервативных сил, действующих на тело, равна убыли потенциальной энергии тела в поле этих сил.*

### ***Механическая энергия системы тел.***

#### ***Закон сохранения механической энергии***

**Полной механической энергией  $W$**  системы тел называют сумму кинетической энергии тел и потенциальной энергии их взаимодействия:

$$W = W_k + W_p.$$

Как уже отмечалось, для замкнутой системы из факта неунитожимости движения материи справедлив закон сохранения всех видов энергий (механической, тепловой, электромагнитной, ядерной и т.д.)

$$W + W_{\text{тепл}} + W_{\text{эл}} + \mathcal{J}_{\text{яд}} + \dots = \text{const}.$$

В такой системе механическая энергия может изменяться за счет работы неконсервативных сил: они переводят ее в другие виды энергии (механическая энергия уменьшается, происходит ее диссипация, рассеяние), и, наоборот, другие виды энергии переходят в механическую энергию (она возрастает).

Среди всех неконсервативных сил выделяют **диссипативные силы** - это силы, которые приводят к уменьшению механической энергии системы. К ним, например, относят силы трения и сопротивления. Так, например, шарик, катящийся по горизонтальной поверхности, с течением времени останавливается из-за того, что работа силы трения переводит часть его механической энергии в тепловую энергию.

Если же в замкнутой системе действуют только консервативные силы (такая система называется **замкнутой консервативной системой** - з.к.с), то тогда в ней выполняется **закон сохранения механической энергии**, который гласит: *механическая энергия замкнутой консервативной системы остается постоянной*

$$W = \text{const}$$

Если такая система, между телами которой действуют только консервативные силы, находится во внешнем поле консервативных сил (открытая консервативная система - о.к.с), то и для нее выполняется закон сохранения механической энергии

$$W = \text{const}$$

Это связано с тем, что, потенциальная энергия системы является суммой попарных потенциальных энергий взаимодействий тел друг с другом

независимо от того входят эти тела в состав системы или нет, и поэтому теорема о потенциальной энергии будет справедлива и в этом случае.

## **ТЕМА: Элементы механики сплошных сред.**

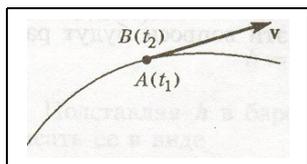
### **1. Кинематика жидкости.**

Для описания движения жидкости нужно определить движение всех частиц. Однако, если рассматривать жидкость как сплошную среду, то можно определить как изменяется течение жидкости в каждой точке существует два способа:

- 1) способ Эйлера. Определить массу жидкости, переносимую потоком.
- 2) способ Лагранжа. С помощью векторного поля.

В каждой точке пространства находится частица массой  $m$ , которая имеет определенное направление вектора скорости  $v$ .

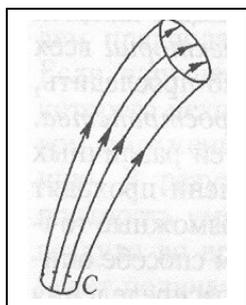
Если соединить одной линией все частицы, имеющие одинаковую скорость, то получим *линию тока*.



*Касательная совпадает с направлением скорости.*

Если поле скоростей не изменяется с течением времени, то течение называется *стационарным* или *установившимся*.

Если выделить в текущей жидкости произвольный замкнутый контур  $C$  и через каждую его точку провести линии тока в определенный момент времени, то получим *трубку тока*.



Рассмотрим трубку тока, вырезанную из пространства жидкости произвольным образом, и определим массу жидкости, проходящей через любое сечение трубки тока.

Объем жидкости, проходящий через сечение за время  $dt$

$$\Delta V = \Delta S_{\perp} v \Delta t$$

$$S_{\perp} \perp \mathbf{v}$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \Delta S_{\perp} v$$

Тогда масса жидкости

$$\Delta m = \Delta V \rho = \rho \Delta S_{\perp} \Delta t$$

$$\Delta S = \Delta S_n$$

$$v \Delta S = v \Delta S \cos \alpha = v_n \Delta S = v \Delta S_{\perp} = \Phi_v$$
 - поток вектора скорости

Согласно закону сохранения массы:

$$\Delta m_1 = \Delta m_2$$

$$\rho_1 v_1 \Delta S_1 = \rho_2 v_2 \Delta S_2$$

$$\rho \Delta S = const$$
 уравнение неразрывности

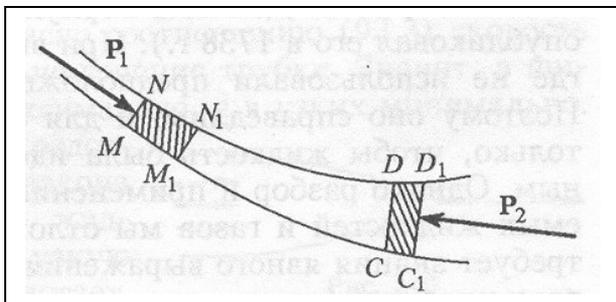
$$\rho_1 = \rho_2$$
 - жидкость несжимаемая

$$v_1 \Delta S_1 = v_2 \Delta S_2$$

$$v \Delta S = const$$

## 2. Динамика жидкости. Уравнение Бернулли.

Рассмотрим течение идеальной жидкости в поле консервативных сил. В поле сил тяжести.



В сечении  $S$  совершается работа

$$dA_1 = P_1 S_1 dl_1$$

$$dA_2 = P_2 S_2 dl_2$$

Или

$$dA_1 = P_1 dV_1, \quad dA_2 = P_2 dV_2$$

$$dV_1 = \frac{dm_1}{\rho_1}, \quad dV_2 = \frac{dm_2}{\rho_2}$$

$$dA_1 = P_1 \frac{dm_1}{\rho_1}, \quad dA_2 = P_2 \frac{dm_2}{\rho_2}$$

Полная энергия, затраченная на эту работу ( $dm_1 = dm_2 = dm$ )

$$dA_1 + dA_2 = dE$$

$$dE = \left( \frac{P_1}{\rho_1} - \frac{P_2}{\rho_2} \right) dm$$

$$\frac{dE}{dm} = \varepsilon \quad - \text{ энергия на единицу массы.}$$

$$dE = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) dm$$

$$\frac{P_1}{\rho_1} - \frac{P_2}{\rho_2} = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$$

$$\varepsilon_1 + \frac{P_1}{\rho_1} = \varepsilon_2 + \frac{P_1}{\rho_1}$$

$$\frac{P}{\rho} + \varepsilon = const \quad - \text{ уравнение Бернулли.}$$

Вдоль одной и той же линии тока при стационарном течении идеальной жидкости величина  $\varepsilon + \frac{P}{\rho}$  остается постоянной.

Справедливо и для сжимаемой жидкости.

$\varepsilon$  – энергия единицы массы, складываемая из кинетической и потенциальной в поле сил тяжести

$$\varepsilon = \frac{v^2}{2} + gh$$

Тогда уравнение Бернулли:

$$\frac{v^2}{2} + gh + \frac{P}{\rho} = const = B \quad - \text{ постоянная Бернулли}$$

Сохраняет свое значение вдоль одной и той же трубки тока.

1. Если  $v = 0$ , то  $gh + \frac{P}{\rho} = const$ , т.е. В постоянна для всего потока – жидкость в состоянии равновесия.
2. Если трубка расположена горизонтально, но имеет переменное сечение.  $h = const$

$$\frac{v^2}{2} + \frac{P}{\rho} = const$$

3. Если скорости в сечениях различны

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_2^2)$$

Поместим в поток некоторое обтекаемое тело. При этом линии тока будут расходиться. Точка А, от которой расходятся линии называется критической.

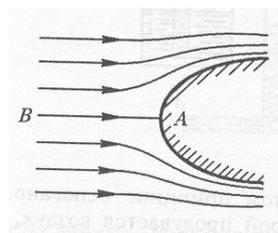
Применим уравнение Бернулли к линии ВА, получим

$$P + \frac{\rho v^2}{2} = P_0$$

$P_c$  - давление в критической точке.

$P$  – на  $\infty$ , откуда течет жидкость

$P_c$  - это максимальное давление, которое может иметь жидкость в этой линии тока.



Величина стоящая слева – полный напор,  $\frac{\rho v^2}{2}$  - динамический или скоростной напор, который в гидродинамике называется динамическим давлением.

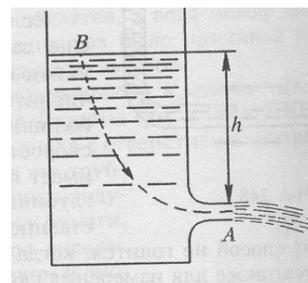
Для измерения динамического давления используют трубку Пито.

Давление определяют высотой жидкости в трубке.

Пример: истечение жидкости из отверстия.

Запишем уравнение Бернулли:

$$\frac{P_0}{\rho} + gh = \frac{P_0}{\rho} + \frac{v^2}{2}$$



В т. В скорость  $v = 0$ . Давление можно считать одинаковым и равным атмосферному, тогда  $v = \sqrt{2gzH}$  - скорость течения жидкости.

В реальных жидкостях помимо нормальных возникают и касательные напряжения, их существование обусловлено наличием сил внутреннего трения или вязкости.

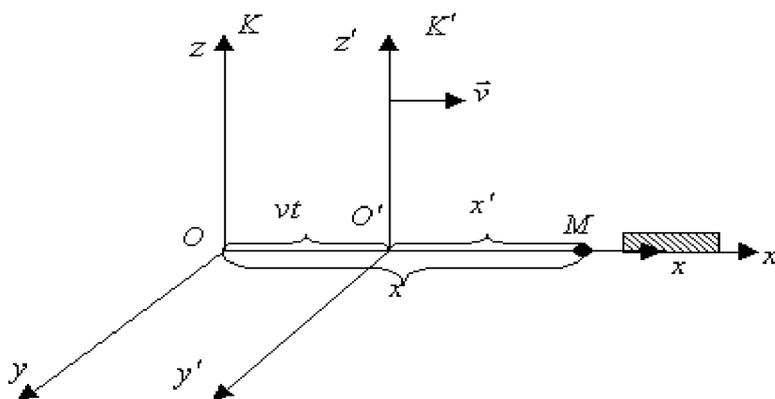
### **ТЕМА: Принцип относительности в механике.**

СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ. Специальная теория относительности (С.Т.О.) изучает свойства пространства и времени как двух форм существования материи в инерциальных системах отсчета. Обычно для удобства выбирают две ИСО – неподвижную  $K$  и подвижную  $K'$ , движущуюся относительно неподвижной с постоянной скоростью вдоль совпадающих осей  $Ox$  и  $Ox'$ . В начальный момент времени ( $t=0$ ) начала координат этих систем отсчета - точки  $O$  и  $O'$  совпадают.

Отметим общие свойства пространства и времени, подтвержденные опытными фактами и не зависящие от рассматриваемых теоретических моделей: пространство является однородным и изотропным, а время является однородным.

### ***Преобразования Галилея. Принцип относительности Галилея***

В классической механике считается, что предельная скорость передачи взаимодействий в природе является бесконечно большой, поэтому из этого предположения следуют дополнительные свойства пространства и времени: пространство и время абсолютны, не связаны друг с другом; время течет одинаково во всех ИСО ( $t=t'$ ); пространство и время не зависят от наличия вещества, пространство является пустымместилищем материальных тел.



Дополнительные свойства пространства и времени, возникающие в классической механике, позволяют получить преобразования Галилея - это формулы, связывающие координаты и время одного и того же события в разных ИСО. Под событием понимают любое явление (выстрел из ружья, рождение частицы и т.д.), происходящее в одной точке пространства в какой-либо момент времени.

Учитывая дополнительные свойства пространства и времени, запишем преобразования Галилея:

$$X = X' + vt \quad Y = Y' \quad Z = Z' \quad t = t'$$

В заключение отметим важный принцип, позволяющий существенно упростить описание механических явления в разных ИСО. Это принцип относительности Галилея, он является следствием опытных фактов и утверждает равноправие всех ИСО по отношению к происходящим в них механическим явлениям. Приведем различные эквивалентные формулировки этого принципа относительности: 1) никакими механическими опытами, находясь внутри ИСО, нельзя установить движется она равномерно и прямолинейно или покоится; 2) все законы механики выглядят, записываются одинаково во всех ИСО; 3) все механические явления протекают одинаково во всех ИСО; 4) все законы механики инвариантны относительно преобразований Галилея.

Под инвариантной величиной понимают величину, принимающую одинаковое значение во всех ИСО. Под инвариантной формулой понимают формулу, которая записывается одинаково во всех ИСО. Второй закон Ньютона инвариантен относительно преобразований Галилея. т.е. он записывается одинаково во всех ИСО:

$$F=ma, \quad F'=m'a'.$$

### ***Постулаты С.Т.О. Опытное обоснование постулатов***

Специальная теория относительности была создана А. Эйнштейном в 1905 г. В ее основе лежат два постулата - принцип относительности Эйнштейна и постулат о постоянстве скорости света в вакууме.

До начала XX века считалось, что все физические явления можно свести к механическим явлениям и поэтому принцип относительности Галилея оправдывал себя, позволяя упростить объяснение (описание) опытных фактов. После открытия электромагнитных волн, квантовой механики, ядерной физики оказалось, что разнообразные формы движения материи не сводятся к механическому движению, и поэтому вполне естественно возникло обобщение принципа относительности Га-

лилея на всю совокупность физических явлений. Это было сделано А. Эйнштейном и подтверждается всеми имеющимися опытными фактами. Приведем несколько эквивалентных формулировок **первого постулата** специальной теории относительности (**принципа относительности Эйнштейна**): 1) никакими физическими опытами, находясь внутри ИСО, нельзя установить движется она равномерно и прямолинейно или покоится; 2) все законы физики выглядят, записываются одинаково во всех ИСО; 3) все физические явления протекают одинаково во всех ИСО; 4) все законы физики инвариантны относительно преобразований Лоренца.

Из третьей формулировки первого постулата следует, что преобразования Галилея в С.Т.О. заменяются на преобразования Лоренца.

Согласно **второму постулату С.Т.О.** скорость света в вакууме одинакова во всех ИСО и не зависит от движения источника и приемника света. Этот постулат является необычным с обычной точки зрения, но он был подтвержден во многих опытах; среди которых наиболее известным является опыт Майкельсона и Морли (1881-1887 гг.).

Отвлекаясь от конкретных исторических аспектов этого опыта можно сказать, что в нем выяснялась зависимость скорости света от движения источника и приемника света. Отсюда следует вывод, что к скорости света в вакууме неприменим закон сложения скоростей, который справедлив в классической механике, она не зависит от движения источника и приемника света - скорость света одинакова во всех направлениях; свет, испущенный по всем направлениям подвижным и неподвижным источниками, будет иметь одинаковую скорость  $u = c$ .

Следствием второго постулата С.Т.О. является тот факт, что предельная скорость передачи взаимодействий в природе является конечной и равной скорости света в вакууме. Это приводит к новым дополнительным свойствам пространства и времени в С.Т.О.

### ***Преобразования Лоренца. Дополнительные свойства пространства***

***и***

#### ***времени в С.Т.О.***

Общие свойства пространства и времени остаются и в С.Т.О., поэтому преобразования Лоренца как и преобразования Галилея, будут линейными по координатам и времени. Добавится только коэффициент  $\alpha$ , учитывающий второй постулат С.Т.О. и зависящий от скорости движения тела и скорости света в вакууме. Итак, запишем преобразования Лоренца:

$$x = \frac{x' + v_0 t'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \frac{t' + \frac{v_0}{c^2} \cdot x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Коэффициент  $\beta = \frac{v^2}{c^2}$ , где  $v$  и  $c$  скорости тела и скорость света соответственно.

При малых скоростях движения тел  $v \ll c$  коэффициент  $\beta \ll 1$  и поэтому преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея. Поэтому говорят, что классическая механика - это механика малых скоростей движения тел, а релятивистская механика - механика скоростей движения тел, близких к скорости света в вакууме. Релятивистская механика включает в себя как частный случай ( $v \ll c$ ) классическую механику.

Из формул для преобразования времени следуют дополнительные свойства пространства и времени в С.Т.О.:

1) в формулы для преобразования времени входят координаты, это означает, что пространство и время как две формы существования материи существуют в неразрывном единстве, они взаимосвязаны друг с другом;

2) из формул следует, что  $t \neq t'$ , т.е. время течет по разному в разных ИСО.

Эти свойства пространства и времени приводят к необычным с обычной точки зрения эффектам как в кинематике, так и в динамике.

### Кинематика С.Т.О. Понятие «одновременность» двух событий

Пусть в С.О.  $K'$  происходят одновременно ( $t_1 = t_2$ ) два события в разных точках пространства ( $x_1 \neq x_2$ ). Необходимо выяснить, будут ли эти события одновременными в С.О.  $K$ .

Для ответа на этот вопрос используем преобразования Лоренца и найдем разность  $t_2' - t_1'$ . Эта разность отлична от нуля, т.е. эти события не будут одновременными в С.О.  $K$ . Следовательно, **понятие одновременности двух событий является относительным** - события, происходящие одновременно в одной ИСО, не будут одновременными в других ИСО.

Только в частном случае  $x_1 = x_2$  события будут одновременными во всех ИСО.

В классической механике  $v \ll c$  и поэтому  $t_2 = t_1$  т.е. понятие одновременности двух событий является абсолютным - они будут одновременными во всех ИСО.

### Понятие «длина» предмета

Пусть в С.О.  $K'$  вдоль оси  $Ox'$  располагается неподвижный стержень, длина которого может быть найдена как разность координат его концов  $l_0 = x_2 - x_1$ . Необходимо определить длину этого стержня в С.О.  $K$ , относительно которой он движется со скоростью  $v_0$ .

Для определения длины  $l$  стержня используем преобразования Лоренца, из которых получим:

$$l = l_0 \cdot \sqrt{1 - \beta^2}$$

В формуле (1.92) через  $l_0$  обозначена **собственная длина стержня**, это длина стержня в той ИСО, относительно которой он неподвижен. Собственная длина предмета является инвариантом С.Т.О.

Из формулы следует, что:

- 1) при движении предметов происходит сокращение продольных, направленных вдоль скорости, размеров предметов; поперечные, перпендикулярные к скорости движения, размеры тел не изменяются;
- 2) собственная длина предмета  $l_0$  является наибольшей из всех возможных длин предмета.

Итак, понятие «длина» предмета является относительным, т.е. зависит от выбора ИСО. В классической механике  $\mathbf{v} \ll \mathbf{c}$  и поэтому понятие «длины предмета» является абсолютным, одинаковым во всех ИСО.

### Понятие «промежуток времени» между двумя событиями

Пусть в СО  $K'$  в одной точке пространства ( $x_1 = x_2$ ) происходят два события или протекает какой-либо процесс. Промежуток времени  $t' = (t'_2 - t'_1)$  в СО  $K'$  можно измерить одними часами, находящимися в этой точке пространства. Возникает вопрос, чему равняется этот промежуток времени в СО  $K$ .

Вполне понятно, что промежуток времени  $t$  нужно измерять двумя часами, расположенными в разных точках оси  $Ox$  - в одной точке ( $x=x_1$ ) находятся часы, измеряющие время одного события ( $t=t_2$ ) или начало процесса, а во второй ( $x=x_2$ ) находятся часы, измеряющие время другого события ( $t=t_1$ ) или окончание процесса.

Для определения  $t$  используем преобразования Лоренца:

$$t' = t \cdot \sqrt{1 - \beta^2}$$

где  $t_0$  - **собственный промежуток времени**, он измеряется одними часами в той ИСО, относительно которой события происходят в одной точке пространства, это инвариант С. Т. О.

Из формулы следует, что

- 1)  $t' > t_0$ , т.е. в движущейся ИСО происходит замедление хода времени; движущиеся часы идут медленнее покоящихся;
- 2)  $t_0 < t'$ , т.е. собственный промежуток времени между двумя событиями является наименьшим из всех возможных промежутков времени для этих событий.

Замедление хода времени в движущейся СО реально подтверждается экспериментами с участием нестабильных элементарных частиц, рождающихся в ядерных реакциях со скоростями, близкими к скорости света в вакууме (например,  $v = 0,99 \cdot c$ ). В этом случае время их жизни до распада существенно различается в СО  $K'$ , связанной с ними (собственное время  $t_0$ , равное, например,  $t_0 = 25$  нс), и в СО  $K$ , связанной с Землей. Это приводит к тому, что с учетом замедления времени

частица пролетает в СО К до распада значительно большее расстояние (52 м.), чем без учета этого эффекта (7,4 м).

Такие частицы регистрируют на расстояниях  $l$  от места их рождения, значительно превышающих  $l'$ . Отметим, что в СО К', связанной с частицей, расстояние  $l'$  проходит Земля мимо неподвижной частицы за время ее жизни  $t_0$ .

В силу равноправия всех ИСО замедления времени в С.Т.О. носит относительный характер. Наблюдатель, находящийся на Земле, отметит, что движения космонавта в ракете, движущейся со скоростью, близкой к скорости света, будут замедленными по сравнению с его движениями. То же самое скажет космонавт, наблюдая за человеком на Земле. И они оба будут правы, так как космонавт может считать СО, связанную с ним, неподвижной, а СО., связанную с Землей, движущейся со скоростью  $\mathbf{u}$  в обратном направлении.

### Релятивистский закон сложения скоростей

Пусть вдоль совпадающих осей  $Ox$  и  $Ox'$  систем отсчета  $K$  и  $K'$  в их положительном направлении с постоянной скоростью движется тело. Проекции вектора скорости на координатные оси в СО  $K$  и  $K'$  соответственно равны:

$$\text{СО } K': u = (u'_x = dx'/dt', u'_y = 0, u'_z = 0);$$

$$\text{СО } K: u = (u_x = dx/dt, u_y = 0, u_z = 0).$$

Необходимо найти формулы связи между  $\mathbf{u}$  и  $\mathbf{u}'$ ; в данном случае между  $u_x$

и  $u'_x$ . Для этого в преобразованиях Лоренца возьмем бесконечно малые (элементарные) приращения координат и времени, а затем получим компоненты вектора скорости:

$$u_x = \frac{u'_x + u_0}{1 + \frac{u_0 u'_x}{c^2}}; \quad u_y = \frac{u'_y \cdot \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \frac{u_0 u'_x}{c^2}}; \quad u_z = \frac{u'_z \cdot \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \frac{u_0 u'_x}{c^2}};$$

Формулы представляют собой закон сложения скоростей в релятивистской механике. При малых скоростях движения тел ( $\mathbf{u} \ll c$ ) эти формулы переходят в закон сложения скоростей классической механики.

Из закона сложения скоростей и следует, как это и должно быть, согласно второму постулату С.Т.О., скорость движения тел не может быть больше скорости света в вакууме ( $\mathbf{u} \ll c$ ).

## Динамика С.Т.О.

### Релятивистский импульс и масса тела

Оказывается, что второй закон Ньютона не является релятивистски инвариантным, т.е. он не удовлетворяет первому постулату С.Т.О., не удовлетворяет преобразованиям Лоренца. Получить релятивистски инвариантную формулу закона

не удастся из-за усложнения в С.Т.О. взаимосвязи между действующей на тело силой и ускорением тела, они в общем случае даже не совпадают по направлению.

В СТО импульс тела, движущегося в СО К со скоростью  $\mathbf{u}$ , запишется следующим образом:

$$\vec{P} = \frac{m_0 \cdot \mathbf{u}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

где  $m_0$  - **масса покоя тела**. Это масса, измеренная в той ИСО, где тело неподвижно, это инвариант С.Т.О.

Для второго закона Ньютона в СО К запишем:

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \left( \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \cdot \vec{u} \right)$$

Эта формула является релятивистски инвариантной

Из формулы следует, что

- 1) релятивистская масса  $m$  тела возрастает с увеличением скорости его движения;
- 2) тела с отличной от нуля массой покоя ( $m_0 \neq 0$ ) не могут двигаться со скоростью света в вакууме, так как при  $u=c$   $m=m_0/0=c\infty$ , чего не может быть;
- 3) существуют частицы с нулевой массой покоя, движущиеся со скоростью  $u=c$ . Ярким примером, подтверждающим этот факт, является существование фотонов-квантов электромагнитного поля.

Отметим, что в теоретической физике принята другая точка зрения на массу тела, а именно, масса тела обозначается буквой  $m$  и считается не зависящей от скорости движения тела; масса покоя  $m_0$  и релятивистская масса тела не вводятся.

### ***Кинетическая энергия тела в С.Т.О.***

Пусть на тело, движущееся в СО К со скоростью  $\mathbf{u}$ , действует сила  $\mathbf{F}$ . Запишем теорему о кинетической энергии для этого тела

$$dW_k = dA$$

Перепишем полученную формулу в другом виде, используя выражение для второго закона Ньютона в релятивистской механике:

$$dW_k = \frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 u}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) \cdot u \cdot dt; \quad dA = F \cdot dr; \quad dr = u \cdot dt$$

откуда следует:

$$W_k = (m - m_0)c^2 + const$$

Постоянная в этом уравнении выбирается из условия равенства нулю кинетической энергии неподвижного тела, и в релятивистской механике для кинетической энергии тела получается окончательное выражение

$$W_k = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right).$$

При малых скоростях движения тела ( $u \ll c$ ) первое слагаемое можно разложить в ряд и ограничиться первыми двумя его членами, что приводит к хорошо известному в классической механике выражению для кинетической энергии тела

$$W_k = \frac{m u^2}{2}$$

### ***Закон взаимосвязи массы и энергии тела***

Анализируя соотношение для кинетической энергии, Эйнштейн предположил, что полная энергия тела должна складываться из энергии его движения (кинетической энергии) и энергии покоящегося тела, его внутренней энергии, т.е. определяет полную энергию. Поэтому он отождествил второе слагаемое в этой формуле с внутренней энергией тела и назвал ее **энергией**

покоя тела  $W_0$ , а сумму  $(W_k + m_0 c^2)$  назвал полной энергией  $W$  тела:

$$W_0 = m_0 c^2$$

$$W = m c^2$$

Тогда можно получить окончательное соотношение:

$$W = m_0 c^2 + W_k$$

Это и есть закон взаимосвязи между массой и энергией.

Нужно отметить, что энергия покоя  $W_0$  и полная энергия  $W$  тела не включают в себя потенциальной энергии тела во внешних полях.

**Закон взаимосвязи, пропорциональности массы и энергии тела:** *полная энергия тела равна произведению релятивистской массы тела на квадрат скорости света в вакууме.*

В соответствии с ним любое изменение энергии тела сопровождается изменением его массы и наоборот.

Формулы нашли свое подтверждение во многих экспериментальных фактах, особенно в области физики атомного ядра и элементарных частиц. Протекание ядерных реакций сопровождается выделением или поглощением

### ***Роль С.Т.О. в современной естественнонаучной картине мира***

В отличие от теоретических моделей и теорий, предлагаемых для объяснения конкретных физических явлений, специальная теория относительности затрагивает наиболее общие представления о материи и формах ее существования - пространства и времени. Она наполняет эти понятия новым содержанием и дает

более реалистичную картину мира. То, что раньше считалось неизменным, абсолютным, оказалось изменяющимся, относительным: пространство и время взаимосвязаны, время течет по-разному в разных ИСО, понятия - длина предмета, одновременность двух событий, промежутки времени между событиями - являются относительными и т.д.

Но это не означает, что все в природе относительно: С.Т.О. предложила вместо старого новый набор инвариантных, абсолютных величин, таких как: 1) скорость света  $c$  в вакууме; 2) собственная длина  $l_0$  предмета; 3) собственный промежуток времени  $\Delta t_0$  между двумя событиями; 4) масса  $m_0$  покоя тела; 5) энергия  $W_0$  покоя тела; 6) причинно-следственная связь; 7) электрический заряд  $q$ ;

8) пространственно-временной интервал

$$\Delta s = jc^2At^2 - (Ax^2 + Ay^2 + Az^2);$$

9) величина  $(W^2 - c^2p^2)$ .

Последние (8 и 9) инварианты С.Т.О. связаны с модулями четырехмерного радиус-вектора и четырехмерного импульса в четырехмерном пространстве координат и времени (пространство и время в С.Т.О. взаимосвязаны и поэтому вводится такое пространство). В этом пространстве при переходе от одной ИСО к другой, т.е. при преобразованиях Лоренца, происходит поворот этих векторов, при котором составляющие векторов изменяются, а их модули остаются неизменными.

Конечно, в повседневной жизни скорости движения различных тел существенно меньше скорости света в вакууме и поэтому, в основном, используются формулы классической механики. Но для частиц малой массы (микрочастиц, таких как электрон, нейтрон, протон, атомы и т.д.) при анализе их движения необходимо учитывать релятивистские эффекты, и это подтверждает справедливость теории.

Логическим завершением С.Т.О. явилось создание А. Эйнштейном в 1916 г. общей теории относительности (О.Т.О.), которая является современным учением о влиянии тел, их полей тяготения на свойства пространства и времени.

В основе этой теории лежит принцип эквивалентности инертной и гравитационной массы тела. Согласно этому принципу масса тела, определяемая вторым законом Ньютона (инертная масса) и законом всемирного тяготения (гравитационная масса) эквивалентны. Это означает, что, находясь в лифте человек не может сказать почему он давит на его пол: либо лифт неподвижен и находится во внешнем поле тяготения, либо лифт движется равноускоренно в отсутствие внешних гравитационных полей. Этот принцип позволил учесть в уравнениях движения наличие тел, полей тяготения как фактор, искривляющий пространство и время.

Решение этих сложных уравнений, в частности, привело к созданию модели расширяющейся Вселенной, подтвержденной рядом косвенных доказательств (разбегание галактик от определенного центра, реликтовое излучение и т.д.) и к предсказанию целого ряда конкретных фактов, впоследствии обнаруженных на опыте, таких как искривление траектории световых лучей вблизи массивных тел,

замедление хода времени в гравитационных полях, открытие черных дыр, в которые может превратиться звезда, израсходовав запас своего термоядерного горючего.

Общая теория относительности и механика движения частиц малой массы, квантовая механика являются в настоящее время наиболее современными теориями, находящимися на передовом крае познания естественнонаучной картины мира.

## **ТЕМА: ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ**

### **1. Статистический и термодинамический методы исследования.**

*Молекулярная физика и термодинамика* — разделы физики, в которых изучаются зависимости свойств тел от их строения, взаимодействия между частицами, из которых состоят тела, и характера движения частиц.

Для исследования физических свойств макроскопических систем, связанных с огромным числом содержащихся в них атомов и молекул, применяют два качественно различных и взаимно дополняющих друг друга метода: *статистический* (молекулярно-кинетический) и *термодинамический*.

**Статистический метод** — это метод исследования систем из большого числа частиц, оперирующий *статистическими* закономерностями и *средними* (усредненными) значениями физических величин, характеризующих всю систему.

Этот метод лежит в основе **молекулярной физики** — раздела физики, изучающего строение и свойства вещества исходя *из молекулярно-кинетических* представлений, основывающихся на том, что *все тела состоят из атомов, молекул или ионов находящихся в непрерывном хаотическом движении*.

В дальнейшем мы будем использовать термин «*молекула*» имея ввиду мельчайшую структурную единицу (элемент) данного вещества.

**Термодинамический метод** — это метод исследования систем из большого числа частиц, оперирующий величинами, характеризующими *систему в целом* (например, давление, объем, температура) при различных превращениях энергии, происходящих в системе, *не учитывая* при этом внутреннего строения изучаемых тел и характера движения отдельных частиц.

Этот метод лежит в основе **термодинамики** — раздела физики, изучающего общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями.

## **2. Термодинамическая система.**

Термодинамика имеет дело с **термодинамической системой** — совокупностью макроскопических тел, которые взаимодействуют и обмениваются энергией как между собой, так и с другими телами (внешней средой).

Термодинамические системы, не обменивающиеся с внешней средой ни энергией, ни веществом, называются **замкнутыми**.

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 объем*.

Параметры состояния системы могут изменяться. Любое *изменение* в термодинамической системе, связанное с изменением хотя бы одного из ее термодинамических параметров, называется **термодинамическим процессом**. Если для данной системы внешние условия не изменяются и состояние системы с течением времени не меняется, то эта система находится в **термодинамическом равновесии**.

## ТЕМА: ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИ

### 1. Температура.

Температура — одно из основных понятий, играющих важнейшую роль в физике в целом.

- **Температура** — физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы и определяющая направление теплообмена между телами. Тела, находящиеся в тепловом равновесии между собой, имеют одинаковую температуру. Понятие температуры неприменимо к системе из небольшого числа атомов.

В настоящее время используют две температурные шкалы.

**Международная практическая шкала (шкала Цельсия)** градуированная в градусах Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ) по двум **реперным точкам** — температурам замерзания и кипения воды при давлении  $1,013 \cdot 10^5$  Па, которые принимаются соответственно  $0^{\circ}\text{C}$  и  $100^{\circ}\text{C}$ .

**Термодинамическая температурная шкала (шкала Кельвина).** градуированная в градусах Кельвина (К)) определяется по одной реперной точке — **тройной точке воды** — температуре, при которой лед, вода и насыщенный пар при давлении 609 Па находятся в термодинамическом равновесии. Температура этой точки по данной шкале равна 273,16 К. Температура  $T = 0 \text{ K}$  называется **нулем Кельвина**.

Термодинамическая температура (Т) и температура (t) по Международной практической шкале связаны соотношением

$$T = 273,15 + t^{\circ}$$

**Нормальные условия:**  $T_0 = 273,15 \text{ K} = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $p_0 = 101325 \text{ Па}$ .

### 2. Идеальный газ. Газовые законы.

В термодинамике *идеальными* называются газы строго подчиняющиеся закону:

$$\frac{PV}{T} = \text{const}$$

Все прочие газы называются *реальными*. Опыт показывает, что для 1 моля любого идеального газа это отношение равно:

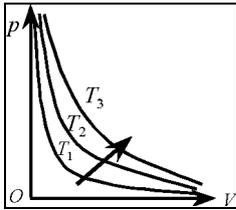
$$\frac{PV}{T} = R$$

Где  $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{K})$  – универсальная газовая постоянная.

Для  $\nu$  молей:

$$PV = \nu RT$$

#### Закон Бойля-Мариотта.



Для данной массы газа  $m$  при постоянной температуре  $T$  произведение давления  $p$  на объем  $V$  есть величина постоянная:

$$PV = const \text{ при } T = const \text{ и } m = const$$

Кривая, изображающая зависимость между  $P$ ,  $T$  и  $V$ , характеризующая свойства вещества при постоянной температуре, называется **изотермой**. Изотермы — гиперболы, расположенные на графике тем выше, чем выше температура происходящего процесса.

### Закон Авогадро.

*Моли любых газов при одинаковой температуре и давлении занимают одинаковые объемы.*

**Количество вещества  $\nu$**  — физическая величина, определяемая числом специфических структурных элементов — молекул, атомов или ионов, из которых состоит вещество.

**Единица количества вещества — моль** — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится в 0,012 кг изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ .

В одном моле различных веществ содержится одно и то же число молекул  $N_A$ , называемое **числом Авогадро**:

$$N = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

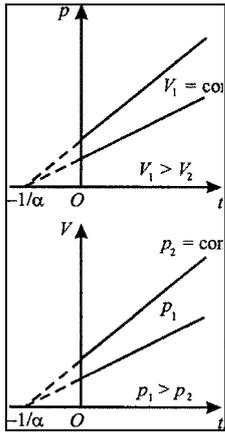
### Закон Дальтона.

*Давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений  $p_1, p_2, \dots, p_n$  входящих в нее газов:*

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_i \quad P = \sum P_i$$

**Парциальное давление** — давление, которое производил бы газ, входящий в состав газовой смеси, если бы он один занимал объем, равный объему смеси при той же температуре.

### Закон Гей-Люссака



Объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется линейно с температурой:

$$V = V_0(1 + \alpha t), \text{ при } P = \text{const}, m = \text{const}.$$

### Закон Шарля

Давление данной массы газа при постоянном объеме изменяется линейно с температурой:

$$p = p_0(1 + \alpha t), \text{ при } V = \text{const}, m = \text{const}.$$

### Уравнение состояния

Опыт показывает, что в состоянии термодинамического равновесия  $P, V$  и  $T$  находятся в функциональной зависимости не только для идеальных газов, но и для реальных газов, а также для любых физически однородных тел:

$$F(P, V, T) = 0$$

Вид этой функции зависит от свойств системы (тела):

Для идеальных газов:  $PV = \nu RT$

Для реальных газов:  $(P + a/V^2)(V - b) = RT$  - для 1 моля.

Таким образом:

1. Давление идеального газа при данной температуре прямо пропорционально концентрации его молекул.
2. При одинаковых температуре и давлении все газы содержат в единице объема одинаковое число молекул.

Число молекул, содержащихся в  $1 \text{ м}^3$  газа при нормальных условиях, называется числом Лошмидта.

### 3. Макроскопические параметры:

Внешние ( $V, E, B$  и др.)

Внутренние ( $P, \rho, \gamma$  и др.)

В состоянии термодинамического равновесия каждый внутренний параметр является функцией внешних параметров и температуры системы.

**ТЕМА: ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ВЕЩЕСТВА.**

В начале XIX века атомно-молекулярная гипотеза получила подтверждение в химии (закон постоянства состава вещества, закон кратных отношений и др.), в физике: работы Клаузиуса, Лавуазье, Максвелла, Больцмана заложили основы МКТ. В них использовались упрощенные модели атомов и молекул (материальные точки, связанные друг с другом центральными силами), широко использовались принципы классической механики Ньютона и математической теории вероятности.

### 1. Число ударов молекул о стенку сосуда.

До XX века считалось, что атомы – неделимые частицы вещества. Позже выяснилось, что атомы обладают собственной сложной внутренней структурой. Однако атомизм проявляется в том, что атомы одного вида *тождественны* (в макром мире нет тождественных тел!). Внутренние состояния атомов – дискретны.

В газах при нормальных условиях среднее расстояние между молекулами велики по сравнению с их эффективным диаметром. Для достаточно разреженного газа можно пренебречь размерами молекул. Такое приближение приводит нас к *модели идеального газа*.

Определим число ударов молекул о стенку сосуда в единицу времени. В силу хаотичности теплового движения молекулы летят к стенке в разных направлениях. Разделим все молекулы на множество групп. В каждой  $i$ -ой группе они летят под углом  $\theta$  к нормали площадки. Пусть  $n_i$  – концентрация молекул  $i$ -ой группы,  $v_i$  – их скорость. За время  $dt$  до стенки долетит  $dN_i$  молекул:

$$dN_i = n_i \sigma v_i \cos \theta dt$$

Тогда число столкновений, приходящихся на единицу площади  $\sigma$  в единицу времени  $t$ :

$z_i = \frac{dN_i}{\sigma dt} = n_i v_i \cos \vartheta_i$  - для  $i$ -ой группы молекул. Для нахождения полного числа столкновений  $z$  необходимо просуммировать по всем группам молекул:

$$z = \int_0^{\pi/2} dz = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{2} n v \sin \vartheta \cos \vartheta d\theta = \frac{1}{4} n v$$

Учитывая распределение молекул по скоростям в последней формуле следует принять  $\langle v \rangle$ :

$$\langle z \rangle = \frac{1}{4} n \langle v \rangle$$

## 2. Давление газа на стенки сосуда. Основное уравнение МКТ.

Пусть газ заключен в закрытый сосуд и молекулы его все одинаковы. Возьмем на стенку сосуда малую площадку  $\sigma$ . При столкновении с площадкой молекула изменит свой импульс на противоположный:

$$\Delta p^* = 2 p \cos \theta$$

По II закону Ньютона  $F = \Delta p / \Delta t$  – сила, действующая на стенку со стороны молекул со скоростью  $v$  в интервале углов  $\theta \div \theta + d\theta$ .

Имеем: 
$$dF_i = \frac{2p \cos \vartheta \cdot dN}{dt}$$

Давление, производимое молекулами указанной группы:

$$dP_i = \frac{dF_i}{\sigma} = \frac{2p \cos \vartheta \cdot dN}{\sigma dt}$$

Полное давление найдем интегрированием по всем группам молекул:

$$P = \int_0^{\pi/2} npv \cos^2 \vartheta \sin \vartheta d\vartheta = \frac{1}{3} npv$$

С учетом распределения по скоростям:  $P = \frac{1}{3} n \langle vp \rangle$  или:

$$P = \frac{1}{3} m_0 n \langle v^2 \rangle$$

## 3. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы молекул.

### Поступательное движение.

Молекула имеет 3 поступательные степени свободы. Ввиду хаотичности теплового движения все направления скорости равновероятны, поэтому в среднем одинаковы кинетические энергии, связанные с этими направлениями. Т.о., в состоянии теплового равновесия на каждую поступательную степень свободы молекулы приходится одна и та же энергия:

$$\langle \varepsilon_i \rangle = \frac{1}{2} k T$$

### Вращательное движение.

Учитывая, что молекулы имеют собственную структуру, и кроме поступательного движения могут еще вращаться, вычистим их кинетическую энергию вращения подобно кинетической энергии твердого тела.

Если тело, состоящее из  $N$  частиц, вращается с угловой скоростью  $\omega$ , то его момент импульса:  $L = \omega \cdot J$ , или  $L = \sum m_i r_i v_i$ . Тогда средняя кинетическая энергия вращения:

$$\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle = \frac{J \omega^2}{2} = \frac{L^2}{2J}$$

После преобразований получаем:

$$\langle \varepsilon_{\text{вр } i} \rangle = \frac{1}{2} kT \cdot \frac{1}{J} \sum m_i r_i^2 = \frac{1}{2} kT$$

Следовательно, на одну вращательную степень свободы так же приходится энергия  $\frac{1}{2} kT$ .

Закон (классический) равномерного распределения энергии по степеням свободы:

*Если система молекул находится в тепловом равновесии при температуре  $T$ , то средняя кинетическая энергия равномерно распределена между всеми степенями свободы и для каждой степени свободы она равна  $\frac{1}{2} kT$ .*

### Колебательное движение.

Между атомами в молекуле возможны колебания вдоль химических связей. Если их амплитуды достаточно малы, то колебания можно считать гармоническими. Атомы в этом случае являются гармоническими осцилляторами, которые обладают механической энергией  $E = E_k + E_n$ , средние значения которых равны между собой:

$$\langle \varepsilon_k \rangle = \langle \varepsilon_n \rangle = \frac{1}{2} kT$$

Следовательно на каждую колебательную степень свободы приходится средняя энергия  $\langle \varepsilon_{\text{колеб}} \rangle = 2 \cdot \frac{1}{2} kT = kT$ .

## **ТЕМА: ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ**

### **1. Квазистатические процессы.**

I начало термодинамики выражает *принцип сохранения энергии* в макроскопических явлениях, протекающих в термодинамических системах. Он был сформулирован в 40-х годах 19 в., когда было установлено, что теплота – это не вещество (теплород), а какое-то внутреннее движение. Позже оно было объяснено, как тепловое движение атомов и молекул, что позволило расширить понятие «энергия» на внутренние процессы: работа диссипативных сил приводит к образованию энергии из механической во *внутреннюю*.

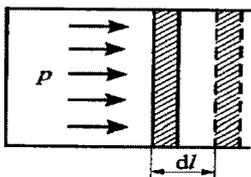
Однако в феноменологической термодинамике понятие теплоты выводилось из опытных фактов и общих принципов, без обращения к атомистическим представлениям.

В теоретической термодинамике широко используют *квазистатические процессы*.

**Квазистатический процесс** – есть идеализированный процесс, состоящий из непрерывно следующих друг за другом состояний равновесия.

Чтобы заставить газ расширяться или сжиматься квазистатически, необходимо осуществлять процесс бесконечно медленно. В строгом смысле квазистатические процессы в природе не реализуются, т.к. протекают с конечной скоростью, поэтому они  $\approx$  квазистатичны. Однако не всякий медленный процесс является равновесным (например, теплопроводность и др.).

## 2. Работа газа в термодинамике.



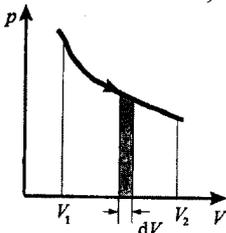
Рассмотрим газ в цилиндре под поршнем. Вычислим малую работу  $\delta A$ , совершаемую газом при квазистатическом расширении  $dV$ :

$$\delta A = F \cdot dl, \quad \text{где } F = P \cdot S.$$

$$\text{Тогда: } \delta A = P \cdot S \cdot dl = P \cdot dV$$

$$\delta A = P \cdot dV$$

Это равенство справедливо и в общем случае квазистатического расширения любого тела, находящегося под внешним давлением.



Работа внешних сил:  $\delta A_{\text{внеш}} = - \delta A$ . В случае неравновесных процессов это равенство несправедливо.

Для любого конечного процесса:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

Т.к. функции  $P=P(V,T)$  различны для разных процессов, поэтому работа – функция процесса:

1)Изотермический процесс:  $A = \nu RT \ln (V_2/V_1)$

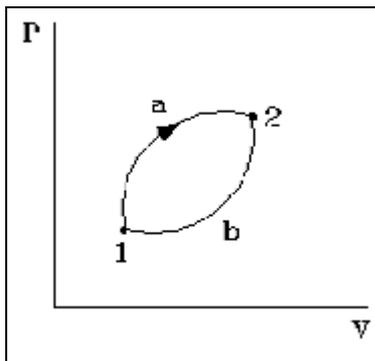
2)Изобарный процесс:  $A = P(V_2 - V_1)$

3)Изохорный процесс:  $A = 0$

Равновесные процессы можно изображать *графически* в координатах  $(p,V)$ . Так работа  $\delta A = p dV$  определяется площадью заштрихованной полоски, а полная работа — площадью под кривой между  $V_1$  и  $V_2$ . При *неравновесных процессах* значения параметров в разных частях системы различны и не существует  $(p,V)$ -точек, характеризующих состояние всей системы. Поэтому графическое изображение неравновесного процесса невозможно.

### 3. Круговые процессы.

**Круговым процессом** (или циклом) называют процесс, при котором, пройдя ряд состояний, система возвращается в исходное термодинамическое состояние.



В круговом процессе  $A = A_{расш} - A_{сжат}$

$$A = \oint P dV$$

### 4. Внутренняя энергия.

Исторически считалось, что изменение  $T$  тела происходит из-за подведения (отвода) к телу теплоты при контакте с другим телом или путем излучения. Джоуль показал, что нагреть воду в калориметре можно не только в результате теплообмена, но и при совершении над ней работы. Тем самым доказано, что никакой разницы между  $Q$  и  $A$  не существует, поэтому они должны измеряться в одинаковых единицах – Дж. 1 калория это такая энергия, подвод которой вызывает нагревание 1 гр. воды при  $P_0 = 10^5 \text{ Па}$  на  $1^\circ\text{C}$ . В опытах Джоуля было показано, что  $Q$  есть некая форма внутреннего движения, которая может быть сообщена телу путем теплообмена или при совершении механической работы. Меру этого движения называют *внутренней энергией* тела.

*Внутренней энергией* системы называется функция состояния, приращение которой во всяком процессе, совершаемом системой, в адиабатической оболочке, равно работе внешних сил над системой при переходе ее из начального равновесного состояния в конечное так же равновесное состояние.

#### 5. 1 начало термодинамики.

Рассмотрим произвольный процесс, в котором принимает участие термодинамическая система. Приращение энергии системы в этом процессе обозначим через  $\Delta U$  ( $\Delta U$  равно разности энергий конечного и начального состояний системы), работу всегда обозначают буквой  $A$ , количество теплоты - буквой  $Q$ . Таким образом, первое начало термодинамики можно выразить следующим уравнением:

$$\Delta U = A + Q$$

Бесконечно малое приращение энергии в процессе бесконечно малой длительности представляет собой дифференциал энергии, которую следует рассматривать как функцию параметров состояния системы. Однако в том же процессе бесконечно малые значения работы и количества теплоты нельзя рассматривать как дифференциалы функций, поскольку ни работа, ни количество теплоты не являются функциями состояния. Поэтому для бесконечно "короткого" процесса уравнение мы представим в виде

$$dU = dA + dQ$$

Символ  $d$  означает дифференциал, тогда как символ указывает, что речь идет о бесконечно малой величине. Итак, *первому началу термодинамики* можно придать следующую формулировку:

*Приращение энергии системы в термодинамическом процессе равно сумме работы и количества теплоты.*

Несколько слов по поводу знаков работы и количества теплоты. Согласно уравнению, работа и количество теплоты больше нуля, если система получает энергию (и меньше нуля, если система отдает энергию). Это означает, что при расширении газа, когда газ совершает работу и отдает энергию, работу следует считать отрицательной. Это в физике так и принято. Но в технической термодинамике работа расширения газа обычно считается полезной и положительной. Поэтому первое начало обычно записывают в виде уравнения

$$Q = \Delta U + A$$

Его формулировка выглядит следующим образом: полученная системой теплота идет на увеличение внутренней энергии и на работу (так что изменение энергии равно разности количества теплоты и работы).

Если процесс круговой, то  $U_1 = U_2$ , то  $A=Q$ . В круговом процессе все количество теплоты, полученное системой, идет на производство внешней работы. Поэтому невозможен процесс, единственным результатом которого является производство работы без подведения тепла (каких либо изменений в других телах), т.е. невозможен *вечный двигатель I рода*.

## 6. Функции состояния и функции процесса.

Рассмотрим переход термодинамической системы из 1 состояния во 2 состояние различными путями. Приращение  $\Delta U$  не связано со способом перехода из 1 в 2. Такая функция называется *функцией состояния*.

**Функция состояния** – любая однозначная функция параметров, определяющих состояние термодинамической системы. Функция состояния не зависит от способа перехода системы в это состояние (пример:  $U, S, I, F$ )

**Функция процесса** – величина, имеющая смысл только при изменении параметров и теряющая смысл при их фиксации (пример:  $Q, A, C$ ).

## 7. Теплоемкость

**Теплоемкостью тела  $C$**  называют отношение количества теплоты  $\delta Q$ , полученному телом, к соответствующему приращению  $dT$  его температуры:

$$C = \delta Q / dT$$

Различают удельную и молярную теплоемкости:

$$C_{y0} = \delta Q / (m \cdot dT);$$

$$C_v = \delta Q / (\nu \cdot dT)$$

Как следует из определения,  $C$  зависит от способа, каким систему переводят из одного состояния в другое. Следовательно, теплоемкость есть функция процесса.

- 1) Изотермический процесс  $dT=0, \delta Q \neq 0 \rightarrow C_T = \pm \infty$ .
- 2) Адиабатический процесс  $\delta Q=0 \rightarrow C=0$ .
- 3) Изохорный процесс  $C_V = (\partial U / \partial T)_V$ , т.к.  $dV=0$ .
- 4) Изобарный процесс  $C_p = C_v + R$

Одноатомный газ.

Молекулы – материальные точки, могут совершать только поступательное движение.  $i_{\text{пост}}=3$ . Энергия молекулы:

$$\langle \varepsilon \rangle = i \cdot 1/2 kT = 3/2 kT$$

Тогда внутренняя энергия газа равна:  $U = 3/2 R T$  – для 1 моля.

Для  $\nu$  молей:  $U = 3/2 \nu R T$ .

Молярная изохорная теплоемкость:

$$C_v = \frac{dU}{dT} = \frac{3}{2} R \approx 12,5 \frac{\text{Дж}}{\text{моль К}} \left( 3 \frac{\text{кал}}{\text{моль К}} \right)$$

#### Двухатомный газ.

Для жестких молекул:  $i_{\text{пост}}=3$ ,  $i_{\text{вр}}=2$ ,  $\langle \varepsilon \rangle = i \cdot 1/2 kT = 5/2 kT$

Для упругих молекул:  $i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вр}} + 2i_{\text{колеб}}$ ,  $\langle \varepsilon \rangle = i \cdot 1/2 kT = 7/2 kT$

#### Многоатомный газ.

Полное число степеней свободы системы из  $N$  несвязанных частиц равно:  $i = 3N$ , из них :  $i_{\text{пост}}=3$ ,  $i_{\text{вр}}=3$ ,  $i_{\text{колеб}}=3N-6$ .

Тогда полная энергия одной молекулы:  $\langle \varepsilon \rangle = i \cdot 1/2 kT$ , где  $i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вр}} + 2i_{\text{колеб}}$

$$i = 6 + 2(3N-6) = 6N-6$$

Изохорная теплоемкость:  $C_v = \frac{i}{2} R$ ,

Изобарная теплоемкость:  $C_p = C_v + R = \frac{i+2}{2} R$

Показатель адиабаты:  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$

Внутренняя молярная энергия многоатомных газов с жесткими молекулами:

$$U = N_A \cdot 3 k T = 3RT$$

#### Внутренняя энергия идеального газа

Рассмотрим приложение I начала термодинамики к идеальным газам. Исследуем зависимость  $U(V)$  для идеальных газов. Для определения этой функции рассмотрим опыт Гей-Люссака и Джоуля, состоящего в расширении адиабатически изолированного газа в пустоту. В данном опыте установлено:

Т после релаксации системы осталась прежней, что говорит о независимости внутренней энергии идеальных газов от объема:

$$A_{\text{внеш}} = 0, Q = 0 \rightarrow dU = 0 \rightarrow U = \text{const} (T = \text{const})$$

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T dV + \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V dT = 0$$

Т.к.  $dT = 0$ , то  $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T dV = 0$ , но  $dV \neq 0 \rightarrow \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_T = 0$

Таким образом, внутренняя энергия идеального газа *не зависит* от  $V$ . Внутренняя энергия идеального газа есть только функция его температуры:  $U = U(T)$ :  $C_V = dU/dT \rightarrow U = \int C_V dT$ , т.к.  $C_V = \text{const}$ , то  $U = C_V T$ .

Для  $\nu$  молей:  $U = \nu C_V T$ .

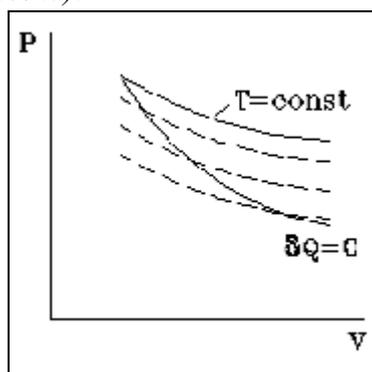
## 8. Применение I начала термодинамики к различным процессам

- 1) Изохорный процесс:  $dA = 0 \rightarrow dU = dQ$ , где  $dQ = C_V T$ .
- 2) Изобарный процесс:  $dU = dQ + PdV$ . Преобразовывая это равенство, приходим к уравнению Р.Майера:

$$C_P = C_V + R$$

- 3) Изотермический процесс:  $T = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$ ,  $dU = 0 \rightarrow dU = dA$
- 4) Адиабатический процесс:  $dQ = 0 \rightarrow dU = -dA \rightarrow dU = -PdV$ .

Преобразовывая это уравнение, получим закон, описывающий адиабатический процесс (закон Пуассона):



$$PV^\gamma = \text{const}$$

$\gamma = 1,67$  – для одноатомных газов

$\gamma = 1,4$  – для двухатомных газов

$\gamma = 1,33$  – для многоатомных газов

Связь между  $C$  и  $\gamma$ :  $C_V = \frac{R}{\gamma - 1}$ ,  $C_P = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$ .

## ТЕМА: ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

### 1. Обратимые и необратимые процессы

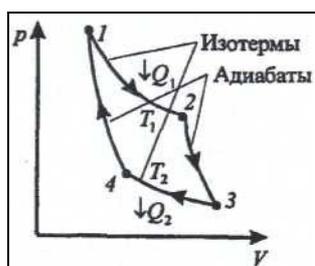
Если в результате какого-либо процесса система переходит из состояния А в состояние В и если возможно ее вернуть в исходное состояние А, так, чтобы во всех остальных телах не произошло никаких изменений, то этот процесс называется **обратимым**.

Неквасистатический процесс идет с конечной скоростью, которая при этом входит в число внутренних параметров системы. В прямом и обратном процессах  $v$  отличается направлением. Эти различия исчезают только в бесконечно медленном процессе.

I начало термодинамики не дает ответа на вопрос о направленности тепловых процессов. На основании этого закона нельзя предсказать, будет ли система переходить из 1 в 2 или из 2 в 1.

II начало термодинамики позволяет судить о направленности процессов, которые могут происходить в действительности. II начало термодинамики позволяет решить вопрос о количественной мере температуры и построить рациональную температурную шкалу, не зависящую от выбора термометрического тела. Основоположник II начала т.д. французский инженер С.Карно. Он исследовал условия превращения тепла в работу.

## 2. Цикл Карно



**Тепловой двигатель** — это периодически действующий двигатель, совершающий работу за счет полученной извне теплоты.

**Термостатом** называется термодинамическая система, которая может обмениваться теплотой с телами практически без изменения собственной температуры.



**Рабочее тело** — это тело, совершающее круговой процесс и обменивающееся энергией с другими телами.

**Принцип работы теплового двигателя:** от термостата с более высокой температурой  $T_1$ , называемого *нагревателем*, за цикл *отнимается* количество теплоты  $Q_1$ , а термостату с более низкой температурой  $T_2$ , называемому *холодильником*, передается количество теплоты  $Q_2$ , при этом за цикл совершается полезная работа, равная  $A = Q_1 - Q_2$ .

Цикл Карно состоит из двух изотерм и двух адиабат.

Вычислим КПД цикла Карно.

$$(1-2) \text{ изотермическое расширение } Q_{12} = A_{12} = \nu RT \ln (V_2/V_1)$$

$$(2-3) \text{ адиабатическое расширение } Q_{23} = 0$$

$$(3-4) \text{ изотермическое сжатие } Q_{34} = A_{34} = \nu RT \ln (V_4/V_3) < 0$$

$$(4-1) \text{ адиабатическое сжатие } Q_{41} = 0$$

За весь цикл: Работа, совершаемая в результате кругового процесса,

$$A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41} = Q_1 - Q_2$$

Для адиабат 2-3 и 4-1 из уравнения Пуассона находим:  $T_1 V_2^r = T_2 V_3^r$ ,

$T_1 V_1^r = T_2 V_4^r$ , откуда  $V_1 V_2 = V_3 V_4$ .

Тогда работа за цикл:  $A = \nu R \ln \frac{V_2}{V_1} (T_1 - T_2)$

КПД цикла Карно:  $\eta = \frac{A}{Q_1}$

$$\eta = \frac{\nu R \ln \frac{V_2}{V_1} (T_1 - T_2)}{\nu RT \ln (V_2/V_1)}$$

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

Проблема тепловой машины Карно состоит в том, что существует принципиально неконвертируемая в работу часть от  $Q_1$  (равная  $Q_2$ ), которая зависит от разности температур  $T_1$  и  $T_2$ .

### **3. Основные формулировки II начала термодинамики.**

Формулировка Клаузиуса (1850 г.):

*Теплота не может самопроизвольно переходить от тела менее нагретого к телу более нагретому. Под  $Q$  подразумевается  $U$ .*

Такой процесс возможен лишь при совершении внешней работы (т.е. при изменениях в окружающих телах, а не самопроизвольно). Устройство, работающее по обратному циклу, совершающее работу по отбору тепла  $Q_2$  у менее нагретых тел и передачи большего количества тепла  $Q_1$  более нагретым телам, называется *холодильной машиной*. Ее КПД определяется формулой:

$$\eta = \frac{Q_2}{A}$$

Формулировка Томсона (Кельвина) (1851г.):

*Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счет охлаждения теплового резервуара.*

Под тепловым резервуаром понимают тело (систему тел), находящихся в состоянии термодинамического равновесия и обладающего запасом внутренней энергии. Если конкретизировать, каким способом должна совершаться работа  $A$ , то можно получить множество разнообразных формулировок. Одна из них принадлежит Планку.

Формулировка Планка:

*Невозможно построить периодически действующую машину, единственным результатом которой было бы поднятие груза за счет охлаждения теплового резервуара.*

Из невозможности процесса Томсона-Планка (т.е. гипотетически допускающего отрицаемую возможность) следует невозможность процесса Клаузиуса и наоборот. Таким образом, формулировки эквивалентны друг другу.

#### **4. Теоремы Карно**

Реальные холодильные установки, как и тепловые машины, не работают по циклу Карно (используются другие циклы). Надо сказать, что машин Карно вообще не строят. Тем не менее, идеальная машина Карно играет важную роль в теплотехнике. Оказывается, при заданных значениях максимальной температуры нагревателя и минимальной - холодильника, машина Карно имеет максимальный коэффициент полезного действия среди

всех возможных тепловых машин. Таким образом, машина Карно устанавливает теоретический предел для КПД реальных машин.

**I Теорема Карно.** Коэффициент полезного действия машины Карно не зависит от рода рабочего тела и определяется только температурами нагревателя и холодильника.

### **II Теорема Карно.**

КПД произвольного (необратимого) теплового двигателя не может быть выше КПД обратимого цикла Карно.

Для доказательства теоремы рассмотрим две машины Карно. Пусть у них общие нагреватель и холодильник, а рабочие тела разные. Все характеристики одной машины будем обозначать нештрихованными буквами, а характеристики другой - штрихованными. предположим, что  $\eta > \eta'$ . Пусть машина с нештрихованными обозначениями работает в прямом направлении, а машина со штрихованными обозначениями - в обратном (обе машины обратимы, и их КПД при обратном ходе равен КПД при прямом). Подберем режим работы машин так, чтобы выполнялось условие  $|Q_2| = |Q'_2|$ . ( $|Q_2|$  есть теплота, которую холодильник получает, а  $|Q'_2|$  - теплота, которую он отдает). Следовательно, машины работают так, что в холодильнике никаких  $\eta$  изменений не происходит. Из условия о неравенстве КПД ( $\eta > \eta'$ ) следует, что

$$\frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} > \frac{|Q'_1| - |Q'_2|}{|Q'_1|}, \quad \text{или} \quad \frac{|Q_2|}{|Q_1|} < \frac{|Q'_2|}{|Q'_1|}, \quad |Q_1| > |Q'_1|,$$

В результате, если рассматривать обе машины как одну, то она будет представлять собой вечный двигатель второго рода, т.к. полезная работа (работа над внешними телами)  $\Delta A = |A| - |A'|$  больше нуля. Поэтому наше предположение о том, что  $\eta > \eta'$ , неверно а именно,  $\eta = \eta'$ , тем самым теорема будет доказана. Аналогично доказывается вторая теорема. Таким образом, для любого процесса:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

## **5. Неравенство Клаузиуса**

Из I начала термодинамики:  $Q_1 + Q_2 = A$  ( $Q_2 < 0$ ). На основании II теоремы Карно:

$$\frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Или

$$\frac{Q_2}{T_2} \leq -\frac{Q_1}{T_1}$$

Откуда находим

$$\frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_1}{T_1} \leq 0$$

Это соотношение называется Неравенством Клаузиуса.

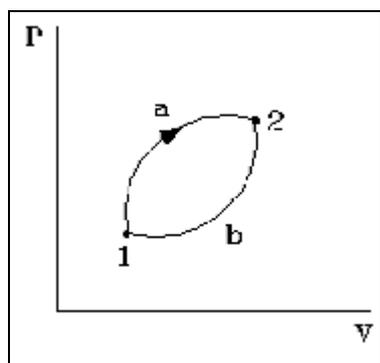
Обозначим  $Q^* = \frac{Q}{T}$  - данное отношение называется приведенной теплотой. Ее приращение в малом процессе:

$$\delta Q^* = \frac{\delta Q}{T}$$

При суммировании приведенной теплоты по всем малым циклам в итоге получаем приведенную теплоту по внешней границе цикла. Обобщая сказанное, имеем:  $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$ . Это неравенство Клаузиуса для общего случая (произвольного цикла):

*Суммарное приведенное количество теплоты, полученное системой в произвольном циклическом процессе всегда  $\leq 0$ .*

## 6. Энтропия



Рассмотрим квазистатический круговой процесс. Покажем, что система в результате каких-либо изменений состояния обратимым путем, переходит из 1 в 2, то величина

$$\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

не зависит от пути, по которому происходит переход 1-2.

В прямом процессе  $\int \frac{\delta Q}{T} \leq 0$

В обратном процессе  $-\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$

В совокупности:  $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$ . Представим это в виде суммы:

$$\int_{1-a}^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_{2-b}^1 \frac{\delta Q}{T} = 0$$

Но вследствие необратимости

$$\int_{2-b}^1 \frac{\delta Q}{T} = - \int_{1-b}^2 \frac{\delta Q}{T}$$

Тогда  $\int_{1-a}^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_{1-b}^2 \frac{\delta Q}{T}$ .

Таким образом, приведенное количество тепла, полученное системой в квазистатическом процессе, не зависит от пути (процесса), а зависит только от начального и конечного состояния.

Можно записать:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

Величина  $S$  называется энтропией.

**Энтропия** – функция состояния системы, изменение которой равно приведенному количеству теплоты, полученному системой в любом квазистатическом процессе. Энтропия определяется с точностью до произвольной постоянной  $S_0$ .

$S=S(P, V, T)$  - энтропия – однозначная функция параметров, аддитивна.

## 7. Закон возрастания энтропии.

*В теплоизолированной системе возможны только такие процессы, при которых энтропия возрастает или остается неизменной. В теплоизолированной системе не возможны процессы с убыванием энтропии.*

Закон возрастания энтропии эквивалентен II началу термодинамики.

## ТЕМА: ОСНОВЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

### 1. Элементы теории вероятностей.

#### Определения.

- **Событием** называют всякое явление, которое может произойти или не произойти.
- Событие называют **случайным**, если в результате испытания оно может как произойти, так и не произойти.
- **Суммой двух событий** А и В называется событие, состоящее в появлении либо события А, либо события В.
- **Произведением событий** А и В называется событие, состоящее в появлении как А, так и В.
- События  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  являются **единственно возможными**, если при данном испытании одно из них обязательно должно произойти.
- **Независимые события** – такие события, для которых появление данного события не зависит от появления другого события.
- **Взаимоисключающие события** – если появлением одного из них полностью исключается возможность появления любого другого из них.

#### Вероятность.

- **Вероятность случайного события** есть количественная мера ожидаемой возможности его появления.
- **Вероятность достоверного события** принимается равной 1.
- Пусть  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  - равновероятные события. Тогда вероятностью каждого из них считается отношение :

$$P_i = \frac{1}{n}$$

- **Теорема сложения вероятностей:** вероятность суммы взаимоисключающих событий равна сумме вероятностей этих событий:

$$P(A+B) = P(A) + P(B)$$

- **Теорема умножения вероятностей:** Вероятность произведения двух событий А и В равна произведению вероятностей одного из них  $P(A)$  на вероятность другого, вычисленную в предположении, что первое событие произошло.

$$P(A \cdot B) = P(A) \cdot P(B | A)$$

## Случайные величины.

Пусть некоторая случайная величина  $X$  может принимать ряд дискретных значений  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots$ . Величина  $P_i = \frac{N_i}{N}$  называется вероятностью того, что величина  $x$  в произвольном испытании примет значение  $x_i$ . Такое определение справедливо для большого числа испытаний.

Так как  $\sum N_i = N$ , то  $\sum P_i = \frac{\sum N_i}{N} = 1$ , то есть сумма вероятностей всех возможных значений величины  $x$  равна 1.

## Среднее значение величины $X$ .

Если вероятность значения  $x_i$  для величины  $x$  равна  $P_i$ , то в  $N_i = P_i \cdot N$  испытаниях  $x$  имеет значения  $x_i$ . Тогда сумма значений  $x$  в этих  $N_i$  испытаниях равна:  $x_i N_i = x_i P_i N$ , а сумма значений  $x$  во всех  $N$  испытаниях:

$$\langle x \rangle = \frac{\sum x_i N_i}{N} = \sum x_i P_i$$

## **2. Непрерывно распределенная величина.**

Рассмотрим случай непрерывного распределения величины  $x$  в интервале от  $a$  до  $b$  (в частном случае  $-\infty, +\infty$ ). Пусть  $x$  – некоторая характеристика молекулы. Число значений  $x$  бесконечно велико, а кол-во молекул хоть и велико, но ограничено. Поэтому понятие вероятности для молекулы иметь какое-то конкретное значение  $x_i$  теряет свой смысл. Здесь правомерен другой вопрос: какова вероятность того, что у любой случайно взятой молекулы величина  $x$  имеет значение, лежащее в интервале от  $x$  до  $(x+dx)$ ? Эта вероятность:  $dP_x = f(x)dx$

- или функция *плотности вероятности*.
- Физический смысл функции  $f(x)$ : она определяет вероятность величины  $x$  для единичного интервала  $dx$  в окрестности точки  $x$ .
- Условие нормировки:  $\int_a^b f(x)dx = 1$
- Функция  $f(x)$  называется *функцией распределения вероятности*  
Среднее значение величины  $x$  и любой функции, зависящей от  $x$ :  
 $\langle x \rangle = \int_a^b x f(x)dx$ ,  $\langle x^2 \rangle = \int_a^b x^2 f(x)dx$

- Знание функции распределения позволяет определить вероятность для любого интервала  $(x_1 \div x_2)$ :

$$P(x_1 \div x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$$

Функция  $f(x)$  зависит от природы случайной величины  $x$ .

### 3. Закон Максвелла для распределения молекул по скоростям.

Применим статистический подход к исследованию распределения молекул газа по скоростям. Примем, что в состоянии статистического равновесия все направления скоростей молекул равновероятны.

Пусть в закрытом сосуде находится большое число  $N$  молекул газа. Внешние силовые поля отсутствуют.

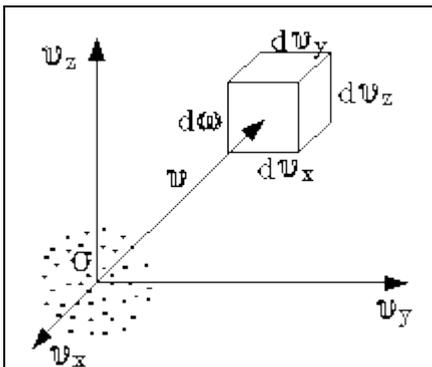
#### Распределение молекул по проекциям скорости.

Определим вероятность того, что проекция  $v_x$  скорости молекулы попадет в заданный интервал:  $dP(v_x \div v_x + dv_x) = \varphi(v_x) dv_x$ , где  $\varphi(v_x)$  искомая плотность вероятности. Для определения функции  $\varphi(v_x)$  следует положить, что столкновения молекул не нарушают общего равновесия (выполняется принцип детального равновесия). Применение данного принципа позволило Максвеллу получить формулу для  $\varphi(v_x)$ :

$\varphi(v_x) = A_1 e^{-\frac{mv_x^2}{2kT}}$  - плотность вероятности, приходящаяся на одну степень свободы молекулы. Значение константы  $A_1$  находят из условия

нормировки:  $A_1 = \left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{\frac{1}{2}}$ .

#### Распределение молекул по векторам скорости.



Какова вероятность того, что все три компоненты скорости молекулы попадут в заданный интервал значений? Будем искать попадание в скоростные интервалы:  $(v_x \div v_x + dv_x)$ ,  $(v_y \div v_y + dv_y)$ ,  $(v_z \div v_z + dv_z)$ . Им соответствуют функции плотности вероятности:  $\varphi(v_x)$ ,  $\varphi(v_y)$ ,  $\varphi(v_z)$ .

Вопрос о распределении молекул по скоростям сводится к вопросу о распределении молекул в пространстве скоростей. В отличие от обычного пространства в таком пространстве молекулы распределены неравномерно. Далее введем понятие плотности молекул в пространстве скоростей как числа молекул в единице объема этого пространства  $n_v$ . Эта величина является функцией скорости молекулы. Она должна быть определена следующим образом. Рассмотрим в пространстве скоростей малый параллелепипед с ребрами  $dv_x, dv_y, dv_z$ . Его объем  $dw = dv_x dv_y dv_z$ . Число молекул, попадающих в параллелепипед обозначим через  $dn_v$ . Тогда плотность распределения  $n$  - число молекул в единице объема пространства скоростей - можно определить как отношение  $dn/dw$ . Именно плотность распределения молекул в пространстве скоростей и будем искать.

Попадание вектора  $\mathbf{v}$  в элемент скоростного пространства есть сложное событие, являющееся произведением событий А,В,С. Его вероятность определим по теореме о умножении вероятности:

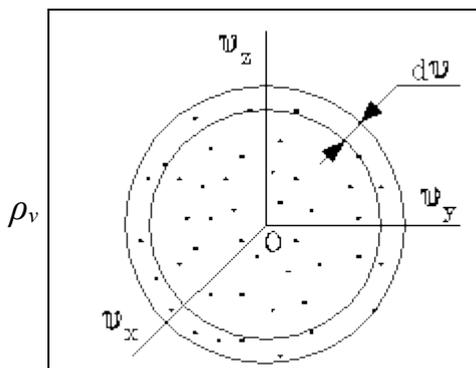
$$dP(\mathbf{v}, dw) = dP_x dP_y dP_z = A^3 e^{-\frac{m_0}{2kT}(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)} \cdot dv_x dv_y dv_z$$

Обозначим:  $f(\mathbf{v}) = \frac{dP}{dw}$  - плотность вероятности заданного вектора

скорости. Тогда эта функция примет вид:  $f(\mathbf{v}) = \left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}}$

### Распределение газа по абсолютным значениям скорости.

Какова вероятность того, что модуль скорости  $v$  будет иметь заданное значение в бесконечно малой окрестности  $dv$ ?



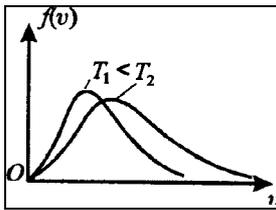
Плотность распределения точек в фазовом пространстве скоростей зависит от числа  $N$  и от расстояния от центра (т.е. от модуля  $v$ ):  $=N \cdot f(v)$ . Выделим шаровый слой радиуса  $v$  шириной  $dv$ . Во всем объеме этого слоя плотность постоянна. Тогда число молекул в этом слое:

$$dN_v = N \cdot f(v) \cdot dv \cdot 4\pi v^2$$

Разделим на N и найдем вероятность:

$$\frac{dN_v}{N} = f(v) \cdot 4\pi v^2 \cdot dv = F(v) dv$$

Находим функцию Максвелла:  $F(v) = \frac{m_0}{2\pi kT} \frac{3}{2} 4\pi v^2 \cdot e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}}$



Вид кривой распределения зависит от T и массы молекул (форма и положение максимума кривой). Площадь под кривой равна 1 (условие нормировки). Функция  $F(v)$  ассиметрична, проходит через начало координат. При повышении T максимум смещается вправо. Физический смысл: функция  $F(v)$  есть вероятность того, что случайно взятая частица попадет в единичный интервал скоростей в окрестности некоторого значения v.

Функция имеет максимум:

$$v_H = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$$

Среднее значение модуля скорости: —

$$\langle v \rangle = \int_0^{\infty} v F(v) dv$$

Вычисляя, находим

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}$$

Эта скорость называется средней арифметической.

Найдем среднеквадратичную скорость:

$$v_{KB} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

#### 4. Распределение Больцмана. Барометрическая формула.

Найдем распределение давления воздуха в атмосфере в предположении, что температура атмосферы не меняется по высоте. На малом перепаде высот  $dh$  давление падает на величину веса столба воздуха с сечением в единицу площади и высотой  $dh$ , т.е.

$$dp = -\rho g dh$$

Это уравнение можно переписать в виде

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\mu g dh}{RT}$$

Проинтегрируем обе части полученного уравнения, полагая, что давление на "нулевой" высоте равно  $p_0$ . Получим

$$p = p_0 e^{-\frac{\mu g h}{RT}}$$

Полученная формула называется барометрической: давление в изотермической атмосфере падает с высотой по показательному закону. Так как молекулярная плотность при постоянной температуре пропорциональна давлению газа, то этот же закон имеет место и для плотности газа:

$$n_\alpha = C e^{-\frac{E(\alpha)}{kT}}$$

В этом уравнении показатель степени получен с учетом преобразований:

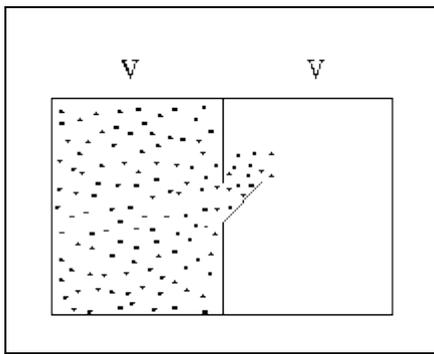
$$\frac{\mu g h}{RT} = \frac{m N_A g h}{k N_A T} = \frac{m g h}{RT}$$

где  $m$  - масса молекулы.

Формула для концентрации является выражением некоторого общего закона, лежащего в основе всей теории идеального газа - закона Больцмана. Суть этого закона заключается в следующем. Допустим, что в формуле для энергии молекулы газа можно выделить слагаемое, зависящее от какого-то одного параметра. (В рассмотренном случае это потенциальная энергия молекулы в поле тяжести  $mgh$ , зависящая от высоты  $h$ .) Можно поставить вопрос о распределении молекул газа по этому параметру, так же как был рассмотрен вопрос о распределении молекул газа по высоте.

**Закон Больцмана** гласит: молекулы идеального газа распределены по данному параметру по экспоненциальному закону вида  $\exp(-E(h)/kT)$ . Постоянная  $C$  называется нормировочной постоянной. Обычно она находится из условия нормировки. Мы рассмотрели случай, когда выделенное слагаемое в энергии молекулы газа зависит от одного параметра. Однако закон Больцмана распространяется и на случай, когда данный вид энергии молекулы газа зависит от двух, трех и вообще нескольких параметров. В этом случае статистические суммы будут включать в себя суммирование по всем этим параметрам.

## 5. Энтропия. Статистический смысл.



Дадим статистическое толкование понятию энтропия. Будем рассматривать макроскопическое тело как конгломерат движущихся молекул. Движение молекул сложно и запутанно. Если первоначально в системе имеется какая-то упорядоченность, то тепловое движение молекул будет непременно размывать и ликвидировать эту упорядоченность. Состояние же

равновесия, к которому неизбежно приходит любая, предоставленная сама себе макросистема, соответствует максимально возможному беспорядку. Энтропия, очевидно, является какой-то количественной мерой молекулярного беспорядка. Проиллюстрируем некоторые виды беспорядка на примере идеального газа и попытаемся их связать с энтропией газа.

Пример: расширение газа в вакуум. Пусть одна половина сосуда заполнена газом, а другая - пустая. Перегородка в сосуде имеет окно, которое открывается и позволяет газу заполнить пустую половину. В таком процессе газ не совершает работу. Его внутренняя энергия не изменяется, следовательно, не изменяется и температура. Однако объем газа увеличивается. Изменение энтропии будет равно:

$$S_2 - S_1 = \nu R \ln 2V - \nu R \ln V = \nu R \ln 2 > 0.$$

Беспорядок в распределении молекул по пространству усиливается - энтропия возрастает.

Состояние механической системы можно задать, указав координаты и скорости всех частиц системы. Такое состояние называется *микроскопическим* (или «микросостоянием»). Каждая частица занимает ячейку в фазовом пространстве  $\omega(x, v)$ . Следовательно, указать микросостояние системы - значит указать совокупность ячеек в фазовом пространстве, которые занимает каждая частица персонально.

*Макросостояние* системы предполагает указание ее макропараметров:  $P, T, V$ . Оно требует ответа: сколько частиц в данной ячейке не зависимо от того, какие это частицы.

Число микросостояний, которыми может быть реализовано данное макросостояние, называется *термодинамической вероятностью* или *статистическим весом* -  $\Omega$ . Чем ближе система к равновесному состоянию, тем больше ее статистический вес. В состоянии термодинамического равновесия ее статистический вес максимален. Следовательно, величина  $\Omega$  ведет себя как  $S$ . Она служит мерой неупорядоченности системы. При максимальной упорядоченности  $\Omega=1$ . Однако  $\Omega$  - неаддитивная величина :  $\Omega = \Omega_1 \cdot \Omega_2 \cdot \Omega_3 \cdot \Omega_4 \cdot \Omega_5 \dots$ , где  $\Omega_i$  – статвеса частей системы. Больцман предложил в качестве меры неупорядоченности использовать функцию:

$$S = k \ln \Omega$$

Её свойства:

- $S$  – мера беспорядка;
- $S = \sum S_i$  – аддитивная величина;
- $S$  – функция макросостояния;
- В статистической физике: все состояния равновероятны, поэтому если система переходит в какое-то макросостояние, то наиболее вероятным будет ее переход в состояние с большим статистическим весом, т.е. с большей энтропией  $S$ .

## **6. Третье начало термодинамики.**

Теорема Нернста: при понижении температуры до абсолютного нуля энтропия любой системы стремится к некоторому пределу, не зависящему от параметров системы.

### Следствие 1.

Невозможно достичь абсолютного нуля температур за конечное число процессов (циклов).

### Следствие 2.

При  $T=0$  все процессы происходят при  $S=S_0=const$ :

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$$

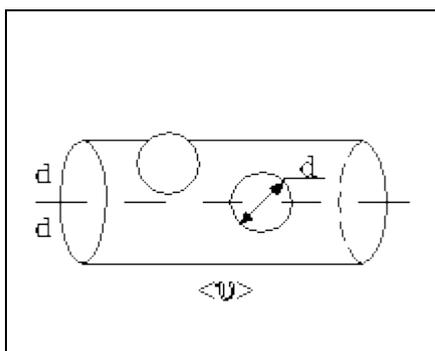
При  $T \rightarrow 0$  для всех тел должны стремиться к 0 температурный коэффициент объемного расширения и температурный коэффициент давления.

## ТЕМА: ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В НЕРАВНОВЕСНЫХ СИСТЕМАХ.

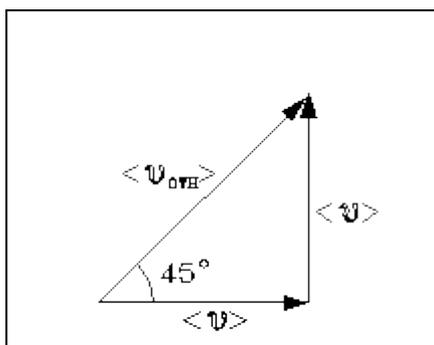
Ранее рассматривались равновесные состояния и квазистационарные процессы. Нарушение равновесия происходит под действием внешних сил или процессов. Оно сопровождается возникновением градиентов температуры, импульса или концентрации примеси. В системах с  $\text{grad } T$  возникают потоки тепла (теплопроводность),  $\text{grad } u$  – перенос импульса упорядоченного движения (вязкость),  $\text{grad } n$  – диффузионные потоки частиц (диффузия).

- Явления теплопроводности, вязкости и диффузии имеют общую природу, связаны с кинетикой теплового движения, поэтому их объединяют под общим названием: **явления переноса**.

### Длина свободного пробега и эффективный диаметр молекул.



Найдем среднее число столкновений молекулы газа с другими молекулами в одну секунду. За секунду молекула в среднем пройдет путь, равный средней скорости. Столкновения "искажают" ее путь, но это обстоятельство для нашего расчета несущественно. "Спрявим" путь, проходимый молекулой в секунду, и изобразим его на рисунке.



Обозначим эффективный диаметр молекулы через  $d$  и молекулу представим как шар. Тогда число столкновений  $z$  молекулы с другими молекулами в секунду будет равно числу молекул, центры которых находятся в цилиндре

длиной, численно равной  $\langle v \rangle$ , и диаметром  $2d$ . Это число выражается формулой

$$z = \langle v \rangle \cdot \pi d^2 \cdot n$$

В эту формулу нужно внести поправку на то, что данная молекула сталкивается не с неподвижными молекулами, а с движущимися. Это обстоятельство будет учтено, если вместо средней абсолютной скорости в формуле записать среднюю относительную скорость. Таким образом, число столкновений за 1 с можно оценить по формуле:

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

Опираясь на эту формулу, нетрудно найти и среднюю длину свободного пробега молекулы. Это - путь, который проходит молекула между двумя столкновениями (или приходящийся на одно столкновение). В секунду молекула пройдет путь, равный  $\langle v \rangle$ , и столкнется  $z$  раз. Следовательно,

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

Длина свободного пробега молекул не зависит от температуры. Зная длину свободного пробега, можно рассчитать так называемые коэффициенты переноса: диффузии, теплопроводности и внутреннего трения (вязкости). Все три явления подчиняются общему по форме закону. Установим этот закон.

При диффузии газов речь идет о проникновении одного газа в другой за счет теплового движения. При диффузии переносится масса некоторого компонента в смеси газов.

Опыт показывает, что плотность потока диффузии (число диффундирующих молекул в секунду через единичную площадку, ориентированную перпендикулярно потоку диффузии) пропорциональна градиенту молекулярной плотности данного компонента смеси.

То есть

$$j_{\delta} = -D \frac{dn}{dx}$$

Коэффициент  $D$  называется коэффициентом диффузии.

При теплопроводности газа речь идет о переносе энергии в виде теплоты. Плотность потока теплоты (количество проходящей в секунду через

$$j_m = -\chi \frac{dE}{dx} \quad 284$$

единичную площадку теплоты) пропорциональна градиенту температуры . То есть:

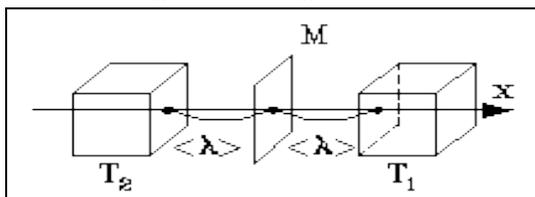
Коэффициент  $\chi$  называется коэффициентом теплопроводности. Наконец, в случае внутреннего трения определяется сила трения, а сила есть поток импульса , так что в этом случае речь идет о переносе импульса упорядоченного движения газа. Плотность потока импульса (сила внутреннего трения, рассчитанная на единицу площади слоя газа) пропорциональна градиенту скорости движения газа, т.е.

$$j_u = -\mu \frac{dU}{dx} .$$

Коэффициент  $\mu$  называется вязкостью,  $u$  - скорость упорядоченного движения слоев газа.

Таким образом, во всех трех случаях речь идет о переносе какой-то величины (массы, энергии, импульса). Во всех трех случаях плотность потока переносимой величины пропорциональна градиенту некоторой другой величины (плотности, температуры, скорости). В этом заключается общность законов диффузии, теплопроводности и внутреннего трения.

Проведем расчет для теплопроводности, а результат для диффузии и



внутреннего трения запишем по аналогии. Пусть в направлении оси  $x$  отмечается падение температуры. Рассчитаем поток энергии через единичную площадку  $S$ .

Вследствие теплового движения поток энергии идет и слева-направо и справа-налево. Но первый преобладает над вторым, т.к. молекулы слева имеют более высокую температуру, чем молекулы справа. Разница в этих потоках и дает результирующий поток теплоты через площадку  $S$ . Отступая от единичной площадки  $S$  на длину свободного пробега вправо и влево, построим куб единичного объема. В среднем одна шестая часть молекул этих кубиков летит в направлении к площадке. Обозначим число степеней свободы молекулы газа через  $i$ . Каждая молекула несет тепловую энергию  $ikT/2$ , но из правого кубика она несет  $ikT_1/2$ , а из левого -  $ikT_2/2$ , ( $T_2 > T_1$ ). Учитывая, что кубики расположены на расстояниях  $\langle l \rangle$  от площадки, то в среднем каждая молекула долетит до площадки и пройдет через нее без столкновения с

другими молекулами. Поток частиц к площадке равен  $1/6 \langle v \rangle n$ . Следовательно, разность потоков теплоты через площадку слева направо и справа налево в расчете на единицу ее площади ( $S=1\text{м}^2$ ), равна:

$$j_m = \frac{1}{6} \langle v \rangle n \frac{i}{2} k T_2 - \frac{1}{6} \langle v \rangle n \frac{i}{2} k T_1$$

Градиент температуры  $\Delta T / \Delta x$  равен  $(T_2 - T_1) / 2 \langle \lambda \rangle$ . Следовательно, поток теплоты через площадку  $S$  можно представить в виде

$$j_m = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle \frac{i}{2} kn \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{точнее не } \frac{\Delta T}{\Delta x}, \text{ а } \frac{dT}{dx} \quad \text{т.е.}$$

действительно, плотность потока теплоты пропорциональна градиенту температуры.

Коэффициент перед градиентом температуры есть теплопроводность газа:

$$\chi = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle \frac{i}{2} kn$$

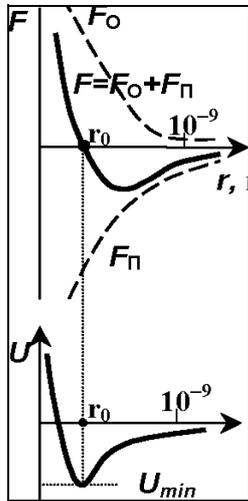
Рассуждая аналогично, можно доказать законы диффузии и вязкости и для коэффициентов диффузии и вязкости найти следующие формулы:

$$D = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle \quad , \quad \eta = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle mn \quad ,$$

где  $m$  - масса молекулы.

## ТЕМА: РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

## 1. Силы межмолекулярного взаимодействия.



В модели идеального газа пренебрегали взаимодействием молекул (вне столкновений). При понижении температуры и при повышении давления наблюдается отступление от закона Клапейрона-Менделеева, что объясняется интенсивным взаимодействием молекул в плотных газах.

Молекулярные силы имеют электрическую природу. В целом молекулы электрически нейтральны, но заряды в них пространственно разделены, что и приводит к существованию кулоновского притяжения и отталкивания. На далеких расстояниях эти силы являются силами притяжения (силы Ван-дер-Ваальса). Взаимная поляризация молекул и дипольное взаимодействие приводит к возникновению дисперсионных сил. Кроме того, возникают дипольно-ориентационные силы, зависящие от  $T$  газа. Если расстояние между молекулами велико по сравнению с  $d$ , то дисперсионные и дипольно-ориентационные силы убывают  $\sim r^{-7}$ . На близких расстояниях преобладает отталкивание. Из квантовой механики известно, что силы отталкивания велики и экспоненциально убывают с ростом расстояния между молекулами. Взаимодействие молекул удобно описывать потенциальной энергией  $W(r)$ . Молекулы будем считать сферическими. На рисунке изображен графически потенциал Ленарда-Джонса, представляющий собой аппроксимацию зависимости  $W(r)$  для реальных газов:

$$W(r) = \frac{a}{r^{12}} - \frac{b}{r^6}$$

## 2. Уравнение Ван-дер-Ваальса.

Каждая молекула окружена как бы сферой непроницаемости для других молекул. Это приводит к тому, что свободный объем для движения молекул фактически оказывается меньше, чем объем сосуда, в котором находится газ, на некоторую величину  $b$ , равную сумме собственных объемов молекул.

Отталкивание молекул будет учтено, если в уравнении Клапейрона вместо объема  $V$  подставить  $V-b$ . Уравнение состояния для моля газа примет вид:

$$P = \frac{RT}{V - b}$$

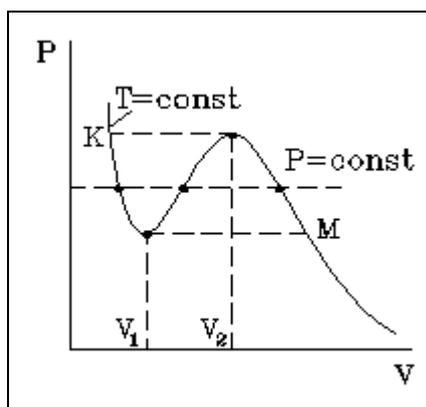
Учтем теперь притяжение молекул, возникающее на расстояниях, превышающих радиус сближения. Притяжение молекул уменьшает давление. Вблизи стенки сосуда на каждую молекулу действует направленная от стенки сила, образованная от суммарного действия других молекул (вблизи стенки каждая молекула с одной стороны, со стороны газа окружена другими). Эта сила тем больше, чем ближе молекулы друг к другу, т.е. чем больше плотность газа  $n$ . Приблизительно можно считать, что сила, оттягивающая каждую молекулу от стенки, пропорциональна  $n$ . Но давление газа создается не одной молекулой, а их множеством, и поэтому оно, в свою очередь, тем больше, чем больше плотность газа  $n$  (пропорционально  $n$ ). В связи с этим можно считать, что общий эффект уменьшения давления за счет притяжения молекул друг к другу пропорционален  $n^2$ . Но  $n = N/V$ . Поэтому, поправка, уменьшающая давление за счет притяжения молекул, будет пропорциональна  $N^2/V^2$ . Итак, окончательное уравнение состояния для моля неидеального газа может быть представлено в виде:

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V^2}$$

Это и есть уравнение Ван-дер-Ваальса. Постоянные  $b$  и  $a$  называются поправками Ван-дер-Ваальса. Для каждого газа они определяются из опыта, поэтому и называются полуэмпирическими.

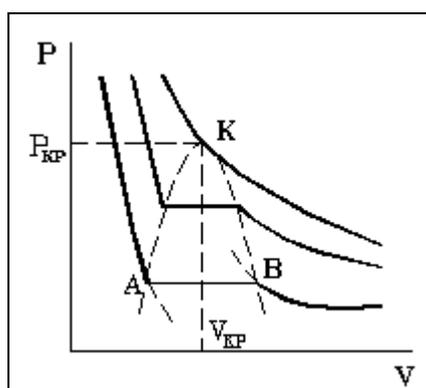
### **3. Изотермы Ван-дер-Ваальса.**

Достоинством уравнения Ван-дер-Ваальса является то обстоятельство, что оно при очень больших плотностях приближенно описывает и свойства жидкости, в частности плохую ее сжимаемость. Поэтому есть основание полагать, что уравнение Ван-дер-Ваальса позволит отразить и переход от жидкости к газу (или от газа к жидкости). В дальнейшем этот переход будет на-ходиться в центре нашего внимания.



Рассмотрим поведение изотермы Ван-дер-Ваальса для реального газа. Уравнение изотермы совпадает непосредственно с уравнением, указанным выше, в предположении, что температура газа постоянна. Представим это уравнение в виде степенного, для чего умножим обе части уравнения на  $V^2(V-b)$ . Тогда оно примет вид уравнения третьей степени по объему:

$$pV^3 - pbV^2 = RTV^2 - aV - ab$$



Уравнение третьей степени имеет либо один, либо три действительных корня. Более внимательный анализ этого уравнения показывает, что оно имеет три действительных корня при достаточно низких температурах (при высоких же температурах при всех давлениях имеет место один корень). Рассмотрим этот случай. Существование трех действительных корней для

объема при фиксированных температуре и давлении означает, что изотерма в некоторой области давлений пересекает изобару в трех местах. Такая ситуация может возникнуть, если изотерма имеет вид, изображенный на рисунке. В области "извилины" (участок КМ) изотерма трижды пересекает изобару. На участке  $[V_1, V_2]$  давление растет с увеличением объема. Такая зависимость совершенно нереальна. Это может означать, что в данной области с веществом происходит что-то необычное. Что именно это, к сожалению, невозможно увидеть из приближенного уравнения Ван-дер-Ваальса. Необходимо обратиться к опыту. Опыт показывает, что в области "извилины" на изотерме в состоянии равновесия вещество расслаивается на две фазы: на жидкую и газообразную. Обе фазы сосуществуют одновременно и находятся в фазовом равновесии.

В фазовом равновесии протекают процессы испарения жидкости и конденсации газа. Они идут с такой интенсивностью, что полностью компенсируют друг друга: количество жидкости и газа с течением времени остается неизменным. Газ, находящийся в фазовом равновесии со своей жидкостью, называется насыщенным паром. Если фазового равновесия нет, нет компенсации испарения и конденсации, то газ называется ненасыщенным паром.

Опыт показывает, что в области "извилины" изотермы Ван-дер-Ваальса при изменении объема давление остается постоянным. График изотермы идет параллельно оси  $V$ . С уменьшением объема системы идет увеличение количества жидкости и уменьшение количества пара, пока весь пар не превратится в жидкость. После наступления такого состояния (полного исчезновения пара) изотерма идет круто вверх, в соответствии с плохой сжимаемостью жидкости (даже для слабого уменьшения объема жидкости необходимо весьма большое увеличение давления.) Таким образом, участок изотермы левее точки А соответствует жидкости, участок правее точки В - газу, а участок АВ - двухфазному состоянию жидкость - газ. Проследим еще раз процесс превращения жидкости в газ и газа в жидкость при равновесном изотермическом процессе. Начиная с состояния А, в жидкости на инородностях, как на центрах испарения, появляются пузырьки пара. По мере увеличения объема системы пузырьки растут и под действием силы Архимеда поднимаются вверх, образуя над жидкостью сплошную область пара. В состоянии В вся жидкость превратится в пар. Если процесс вести в обратном направлении - от газа к жидкости - то, начиная с состояния В, в газовой среде на инородностях, как на центрах конденсации, образуются мелкие капли жидкости, выпадает туман. С уменьшением объема системы туман "сгущается" и появляются капли, они седиментируют вниз, образуя в нижней части сосуда сплошную область жидкости. В состоянии А весь пар превращается в жидкость. На начальных стадиях того и другого процесса (испарения и конденсации) существенно наличие неоднородностей (пылинок, ионов). Если вещество тщательно очистить от них, то начало процессов испарения и конденсации можно несколько сместить. Однофазная область системы будет растянута.

При этом изотерма пройдет через так называемые метастабильные состояния (на рис. они изображены пунктиром).

Это - состояния неустойчивого равновесия: перегретая жидкость (жидкость должна бы закипеть, но не закипает) и переохлажденный пар (должен был бы выпасть туман, но из-за отсутствия центров конденсации он не выпадает).

По мере увеличения температуры участок двухфазных состояний на изотермах сужается, пока не превратится в точку. Это особая точка К, в которой исчезает различие между жидкостью и паром. Она называется критической точкой. Параметры, соответствующие критическому состоянию, называются критическими (критическая температура, критическое давление,

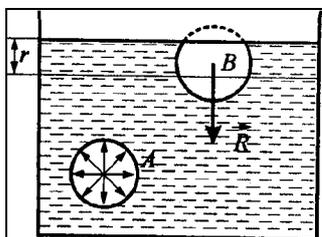
критическая плотность вещества). Наличие критической точки для двухфазных систем жидкость - газ является примечательным свойством вещества. Оно свидетельствует о том, что газ в жидкость (и наоборот, жидкость в газ) можно превратить двумя способами: через процессы испарения и конденсации (фазовый переход) и, минуя последние, непрерывно. При фазовом переходе вещество так или иначе попадает в область двухфазного состояния (на рис. заштрихованная область). При непрерывном превращении газа в жидкость процесс идет в обход критической точки. Где-то вблизи критической изотермы газ постепенно приобретает свойства жидкости. Поэтому при давлениях выше критических границей раздела, несколько размытой, между газом и жидкостью можно считать критическую изотерму.

Параметры критической точки газа Ван-дер-Ваальса:

$$V_k = 3b, \quad P_k = \frac{a}{27k}, \quad T_k = \frac{8a}{27b}.$$

## ТЕМА: ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ.

### 1. Коэффициент поверхностного натяжения.



Жидкость является агрегатным состоянием вещества, промежуточным между газообразным и твердым. В газах нет закономерности во взаимном расположении молекул (хаотическое расположение). В твердых телах наблюдается *дальний порядок* — молекулы образуют кристаллическую решетку. В жидкостях дальний порядок отсутствует, а имеет место *ближний порядок* в расположении молекул — их упорядоченное расположение повторяется на расстояниях, сравнимых с межатомными. Тепловое движение молекулы в жидкости это ее колебание около определенного положения равновесия в течение некоторого времени, после чего молекула скачком переходит в новое положение, отстоящее от исходного на расстояние порядка межатомного. *Радиус  $r$  молекулярного действия* — расстояние (порядка  $10^{-9}$  м), при котором можно пренебречь силами притяжения между молекулами жидкости. Сфера радиусом  $r$  называется *сферой молекулярного действия*.

Силы, действующие на молекулу  $A$  внутри объема жидкости со стороны окружающих молекул, в среднем скомпенсированы. Для молекулы

$B$ , расположенной на поверхности равнодействующая сил  $R$  направлена внутрь жидкости. Результирующие силы всех молекул поверхностного слоя оказывают на жидкость *молекулярное (внутреннее) давление*.

Молекулы поверхностного слоя жидкости обладают большей потенциальной энергией, чем молекулы внутри жидкости. Эта дополнительная энергия, называемая *поверхностной энергией*, пропорциональна площади поверхности:  $\Delta E = \sigma \Delta S$ , где  $\sigma$  — **коэффициент поверхностного натяжения**.

Так как равновесное состояние характеризуется минимумом потенциальной энергии, то жидкость при отсутствии внешних сил будет принимать такую форму, чтобы при заданном объеме она имела минимальную поверхность, т.е. форму шара.

Поверхностный слой жидкости аналогичен растянутой упругой пленке, в которой действуют силы  $\sigma$  натяжения. Пусть под действием сил поверхностного натяжения поверхность жидкости стянулась, при этом силы, действующие на элемент  $\Delta l$  контура, совершают работу  $\Delta A = f \Delta l \Delta x$ , где  $f$  — сила поверхностного натяжения, действующая на единицу длины контура поверхности жидкости. Поскольку эта работа совершается за счет уменьшения поверхностной энергии  $\Delta A = \Delta E$ , то  $\sigma = f$ , т.е. *поверхностное натяжение  $\sigma$*  равно силе поверхностного натяжения приходящейся на единицу длины контура, ограничивающего поверхность.

Единица поверхностного натяжения — ньютон на метр (Н/м) или джоуль на квадратный метр (Дж/м<sup>2</sup>).

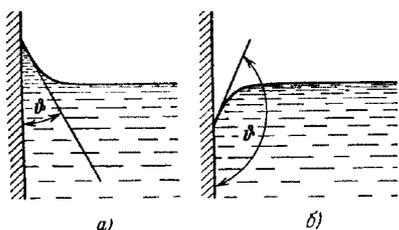
## **2. Краевые углы. Смачивание. Несмачивание**

*Смачиванием* называется явление *искривления свободной поверхности жидкости* при соприкосновении жидкости с поверхностью твердого тела.

Поверхность жидкости, искривленная на границе с твердым телом, называется *мениском*.

Линия, по которой мениск пересекается с твердым телом, называется *периметром смачивания*.

Явление смачивания характеризуется **краевым углом  $\theta$**  между поверхностью твердого тела и мениском в точках их пересечения (в точках



периметра смачивания). Жидкость называется **смачивающей** твердое тело, если краевой угол острый:  $0 < \theta < \pi/2$  (рис.а) и **несмачивающей**, если  $\pi/2 < \theta < \pi$  (рис.б).

Если  $\theta = 0$  смачивание считается *идеальным (полным)*. Случай  $\theta = \pi$ — это *идеальное (полное) несмачивание*. Если силы притяжения между молекулами твердого тела и жидкости больше, чем силы притяжения молекул жидкости друг к другу, то жидкость будет смачивающей. Если молекулярное притяжение в жидкости превышает силы притяжения молекул жидкости к молекулам твердого тела, то жидкость не смачивает твердое тело

### 3. Давление под искривленной поверхностью. Формула Лапласа.

Сферическая выпуклая поверхность производит на жидкость дополнительное давление, вызванное силами внутреннего натяжения, направленными внутрь жидкости,  $\Delta P = 2 \frac{\sigma}{R}$ , где R – радиус сферы. Если поверхность жидкости вогнутая, то сила поверхностного натяжения направлена из жидкости и давление внутри жидкости:

$$\Delta P = -2 \frac{\sigma}{R}.$$

Избыточное давление внутри мыльного пузыря радиуса R вызывается действием обоих поверхностных слоев тонкой сферической мыльной пленки:

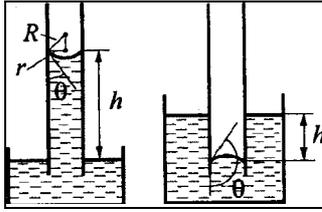
$$\Delta P = 4\sigma/R.$$

В общем случае избыточное давление для произвольной поверхности жидкости выражается *формулой Лапласа*:

$$\Delta P = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

Где  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны двух любых взаимно перпендикулярных сечений поверхности жидкости в данной точке.

### 4. Капиллярные явления.



**Капиллярами** называются узкие цилиндрические трубки с диаметром менее миллиметра.

**Капиллярностью** называется явление изменения уровня жидкости в капиллярах.

Жидкость в капилляре поднимается или опускается на такую высоту  $h$ , при которой давление столба жидкости (*гидростатическое давление*)  $\rho gh$  уравнивается избыточным давлением  $\Delta p$  :

$$\frac{2\sigma}{R} = \rho gh$$

Высота поднятия (глубина опускания) жидкости в капилляре:

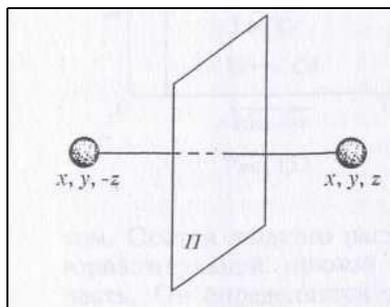
$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R} = \frac{2\sigma}{\rho g r} \cos \theta$$

где  $\rho$  — плотность жидкости,  $r$  — радиус капилляра,  $R$  — радиус кривизны мениска,  $g$  — ускорение свободного падения.

*Высота поднятия (опускания) жидкости в капилляре обратно пропорциональна его радиусу.*

## **ТЕМА: ТВЕРДЫЕ ТЕЛА.**

### **1. Симметрия твердых тел. Кристаллические решетки.**



Симметрия тела выражает свойства его совмещаться с самим собой при определенных перемещениях, называемых *преобразованиями* или *операциями симметрии*. Эти перемещения не должны сопровождаться растяжениями, сжатиями, сдвигами и другими деформациями, при которых изменяются расстояния между точками тела. К преобразованиям симметрии относятся: 1) *параллельный перенос* всех точек тела на определенное расстояние (*трансляция*); 2) *поворот тела* вокруг некоторой оси на определенный угол; 3) *отражение в плоскости*; 4) *инверсия* или *отражение в точке*, а также все комбинации таких преобразований.

Все операции симметрии могут быть сведены к последовательно выполняемым операциям отражения в плоскости. Определенные

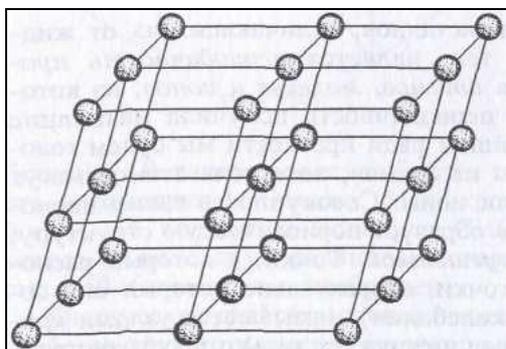
геометрические точки, прямые и плоскости, симметрично расположенные относительно тела, называются его *элементами симметрии*. К ним относятся *ось симметрии*, *плоскость симметрии*, *зеркально-поворотная ось*, *центр симметрии* и пр. Совокупность всех элементов симметрии тела называется его *группой симметрии*. Группы симметрии, содержащие только операции отражения, поворота и инверсии, но не содержащие трансляций, называются *точечными группами*. Такие группы оставляют на месте по крайней мере одну точку тела и описывают симметрию *конечных фигур*: атомов, молекул, многогранников и пр. Группы симметрии, содержащие, наряду с перечисленными операциями, также трансляции, описывают симметрию *бесконечных систем* с периодической структурой. Они называются *пространственными группами*.

Основной особенностью кристаллов, отличающих их от жидкостей и аморфных твердых тел, является *периодичность пространственного расположения атомов, молекул и ионов*, из которых состоит кристалл. Такая периодичность получила название *дальнего порядка*. В дальнейшем ради краткости мы будем говорить, что кристаллы построены из атомов, хотя роль атомов могут выполнять также молекулы или ионы. Совокупность таких периодически расположенных атомов образует периодическую структуру, называемую *кристаллической решеткой*. Точки, в которых расположены сами атомы (точнее, точки, относительно которых они совершают тепловые и нулевые колебания), называются *узлами кристаллической решетки*. Если нас интересует только пространственная периодичность в расположении атомов, то можно отвлечься от их внутренней структуры и рассматривать атомы как геометрические точки. В этом смысле говорят о *пространственной решетке*. Представление о пространственной решетке в кристаллографии было введено французским кристаллографом и математиком Огюстом Браве (1811 — 1863). Тем самым были заложены основы для систематического теоретического исследования симметрии кристаллов.

Чтобы выявить внутреннюю симметрию кристалла, мы будем предполагать, что кристаллическая решетка неограниченная. Периодичность решетки проявляется в так называемой *трансляционной симметрии*.

Основной особенностью кристаллов, отличающих их от жидкостей и аморфных твердых тел, является *периодичность пространственного расположения атомов, молекул и ионов*, из которых состоит кристалл.

Трансляционная симметрия означает, что существуют три некопланарных вектора  $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$ , характеризующиеся тем, что при смещении решетки на вектор

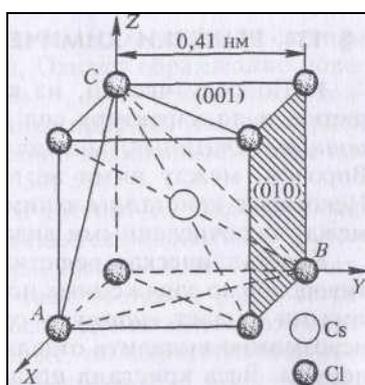


$$\mathbf{T} = n_1\mathbf{a}_1 + n_2\mathbf{a}_2 + n_3\mathbf{a}_3,$$

где  $n_1, n_2, n_3$  — целые числа (в том числе и нули), она переходит сама в себя. Такие смещения называются *трансляциями*, а вектор  $\mathbf{T}$  — *вектором трансляции*. Если при неизменных направлениях векторов  $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$  выбрать их длины минимальными, чтобы трансляциями вдоль этих направлений можно было получить всю кристаллическую решетку, то векторы  $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$  называются *основными*, или *базисными*, векторами, а их совокупность — *базисом решетки*. Параллелепипед с ребрами  $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$  называют основным, или базисным, параллелепипедом. Вместе с находящимися в нем атомами он образует так называемую элементарную ячейку кристаллической решетки. Длины ребер  $a, b, c$  называются основными периодами решетки.

Если элементарная ячейка содержит восемь атомов в вершинах основного параллелепипеда, но не содержит ни одного атома внутри объема или на гранях этого параллелепипеда, то она называется примитивной. Все прочие ячейки называются сложными. Теми же терминами пользуются для названия соответствующих решеток и параллелепипедов. Поскольку к каждой вершине параллелепипеда примыкает восемь элементарных ячеек, на каждую примитивную ячейку приходится один атом. Примитивная пространственная решетка называется также решеткой Браве. Она может быть получена из одной точки, если подвергнуть последнюю всевозможным трансляциям параллельно ребрам основного параллелепипеда  $a, b, c$ . Сложную кристаллическую решетку можно рассматривать как совокупность решеток Браве, вставленных друг в друга.

## 2. Кристаллографические системы координат. Индексы Миллера.



Для определения положения атомов в кристаллической решетке пользуются специальными прямолинейными системами координат, называемыми *кристаллографическими*. За начало

координат принимается один из узлов решетки, а за координатные оси — ребра соответствующего параллелепипеда Браве. Для моноклинных и триклинных кристаллов выбор параллелепипеда Браве не однозначен. В гексагональных кристаллах за оси  $X$  и  $Y$  принимают стороны основания основного параллелепипеда, образующие угол  $120^\circ$ , а за ось  $Z$  — ребро, перпендикулярное к этому основанию. В моноклинных кристаллах за ось  $Z$  принимают ребро, перпендикулярное к основанию параллелепипеда Браве. Мы видим, что в кубических, тетрагональных и ромбических кристаллах системы координат прямоугольные, в остальных кристаллах — косоугольные. Ребра параллелепипеда Браве принимаются за единицы длины в направлениях координатных осей. Такие единицы длины называются *осевыми*. Таким образом, в направлениях различных осей координат единицы длины разные. Так, атом в центре основного параллелепипеда Браве ромбического кристалла имеет координаты  $(1/2, 1/2, 1/2)$ , а атом в центре грани  $XY$  того же параллелепипеда — координаты  $(1/2, 1/2, 0)$ . Кристаллографические координаты применяются и для характеристики направлений кристаллических плоскостей и узловых линий решетки.

*Кристаллической, или узловой, плоскостью* называется всякая плоскость, в которой находится бесконечное множество атомов решетки. Практическое значение имеют только плоскости, усеянные атомами достаточно густо. Именно они служат *естественными гранями кристалла*. кристаллические плоскости имеют большое значение для методов рентгеноструктурного и нейтроноструктурного анализа кристаллов. *Узловой линией* называется прямая, на которой расположено бесконечное множество атомов решетки. Основное значение имеют опять узловые линии, на которых атомы расположены достаточно густо.

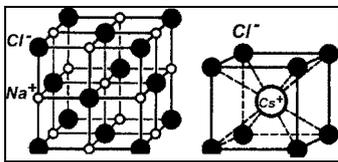
Опишем теперь, как характеризуются направления кристаллических плоскостей в кристалле. Все параллельные плоскости имеют по определению одно и то же направление. Из них всегда можно выбрать плоскость, проходящую через любой узел решетки. Поэтому, не теряя общности, можно при рассмотрении вопроса о направлении кристаллических плоскостей ограничиться примитивными решетками. В таких решетках координаты всех узлов целочисленны. Каждую кристаллическую плоскость можно представить уравнением

$$\frac{x}{A} + \frac{y}{B} + \frac{z}{C} = \pm 1$$

где  $A, B, C$  — длины отрезков (в осевых единицах), отсекаемые этой плоскостью на координатных осях. Эти длины всегда выражаются *рациональными числами* (положительными или отрицательными). Для доказательства выберем в плоскости какие-либо три узла, не расположенные на одной прямой. Подставляя их в уравнение, получим три линейных уравнения с неизвестными  $1/A, 1/B, 1/C$  и целочисленными коэффициентами. Эти уравнения однозначно определяют рассматриваемые неизвестные как рациональные числа. Следовательно, уравнение всегда может быть приведено к виду

$$hx + ky + lz = D,$$

в котором коэффициенты  $h, k, l$  являются *целыми числами*. Можно считать, что они не имеют общего множителя, так как на таковой всегда можно сократить. Полученные таким образом целые числа  $h, k, l$  однозначно определяют направление кристаллической плоскости и называются *миллеровскими индексами*, или просто *индексами*, этой плоскости. Совокупность миллеровских индексов кристаллической плоскости принято заключать в круглые скобки, например  $(hkl)$ . Если какой-либо индекс отрицателен, то знак минус пишут над ним.

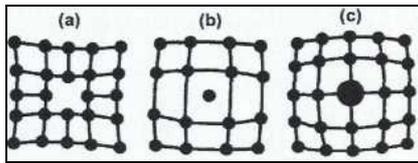


В качестве примера рассмотрим кубическую решетку. Заштрихованная грань куба представляется уравнением  $y = 1$  или  $Ox + ly + Oz = 1$ . Значит, ее миллеровскими индексами будут  $(010)$ . Индексы остальных граней:  $(100)$  и  $(001)$ . Диагональная плоскость  $OBC$  представляется уравнением  $x - y = 0$  и, следовательно, имеет индексы  $(\bar{1}00)$ . Индексами плоскости  $ABC$  будут  $(111)$ .

### 3. Дефекты в кристаллах.

Дефектами кристаллической решетки называются отклонения от упорядоченного расположения частиц в узлах решетки. Дефекты делятся на *макроскопические*, возникающие в процессе образования и роста кристаллов (например, трещины, поры, инородные макроскопические включения), и *микроскопические*, обусловленные микроскопическими отклонениями от периодичности.

Микродефекты делятся на *точечные* и *линейные*. Точечные дефекты бывают трех типов:

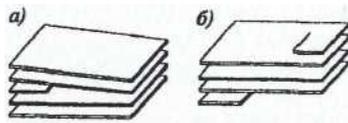


1) **вакансия** — отсутствие атома в узле кристаллической решетки (а);

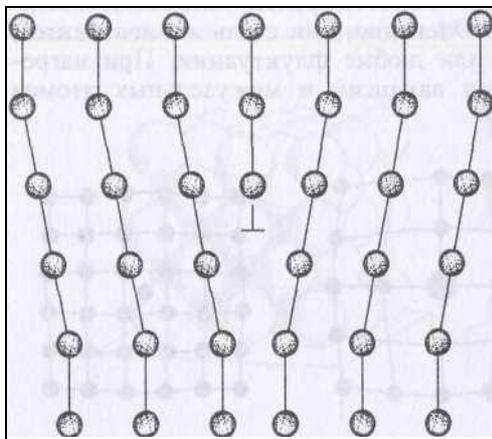
2) **междоузельный атом** — атом, внедрившийся в междоузельное пространство (б);

3) **примесный атом** — атом примеси, либо замещающий атом основного вещества в кристаллической решетке (примесь замещения (с)), либо внедрившийся в междоузельное пространство (примесь внедрения). Точечные дефекты нарушают только ближайший порядок в кристаллах.

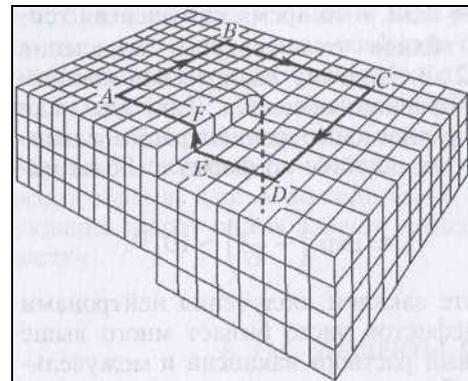
Линейные дефекты нарушают дальний порядок. Особое место среди линейных дефектов занимают дислокации — линейные дефекты,



нарушающие правильное чередование атомных плоскостей. Различают краевые (край атомной плоскости, обрывающейся в кристалле (а)), и винтовые (атомные плоскости образуют винтовую поверхность (б)) дислокации.



(а)



(б)

Для определения вида дислокации пользуются *методом Бюргера*. Назовем *контуром Бюргера* контур, составленный из основных векторов трансляции решетки так, чтобы он замыкался в идеальном кристалле. В дефектном кристалле при обходе вокруг линии дислокации контур Бюргера окажется разомкнутым. Вектор, соединяющий его конечную точку с начальной, называется *вектором Бюргера*. В случае *краевой дислокации* вектор Бюргера перпендикулярен, а в случае *винтовой* — параллелен линии дислокации.

Дефекты в кристаллах оказывают сильное влияние на их физические свойства (механические, магнитные, электрические и пр.).

## ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ.

### 1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

#### ТЕМА: Электрический заряд. Закон Кулона

В отличие от гравитационного, в электромагнитное взаимодействие вступают не все тела и частицы. Тем из них, которые участвуют в таких взаимодействиях, приписывается новое свойство - **электрический заряд**. Он может быть положительным или отрицательным, отражая тот факт, что электромагнитное взаимодействие может быть в виде взаимного притяжения разноименных зарядов или отталкивания одноименных зарядов. Итак, *электрический заряд характеризует способность тел вступать в электромагнитные взаимодействия и его величина определяет интенсивность этих взаимодействий.*

В природе в свободном состоянии существуют частицы, имеющие минимальный по модулю заряд, равный  $q_{min} = 1.6 \cdot 10^{19}$  Кл. Поэтому заряды всех тел и частиц, вступающих в электромагнитные взаимодействия, состоят из целого числа таких зарядов

$$Q = \pm Nq_{min},$$

где  $N$  - целое число. В этом заключается **дискретность электрического заряда**. Заряд электрона считается отрицательным, что позволяет достаточно просто установить знаки зарядов других частиц.

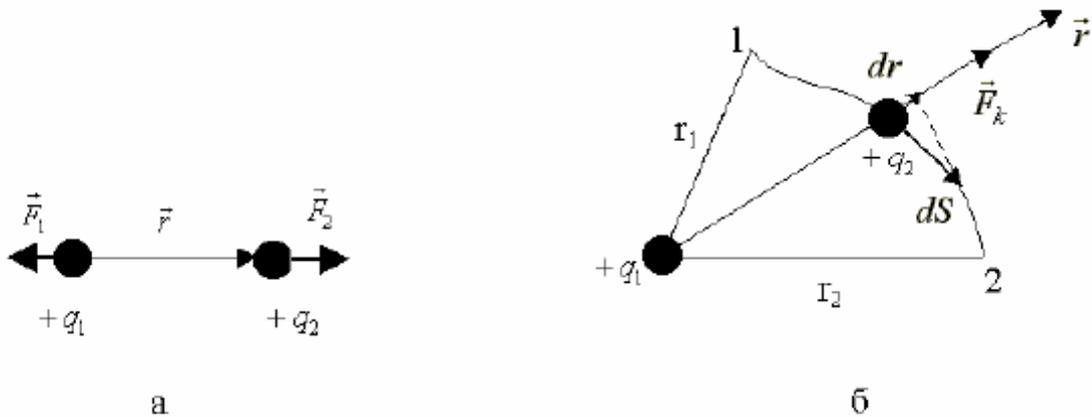
В замкнутых системах выполняется **закон сохранения электрического заряда**, который формулируется следующим образом: *алгебраическая сумма электрических зарядов частиц замкнутой системы остается постоянной*

$$q_1 + q_2 + \dots = \text{const.}$$

Этот закон является важным, так как позволяет анализировать процессы, происходящие в замкнутых системах при изменении в них числа частиц.

Введение электрического заряда позволило сформулировать **закон Кулона**: силы, с которыми взаимодействуют два неподвижных точечных заряда в вакууме, прямо пропорциональны произведению их зарядов и обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними; силы направлены вдоль прямой, соединяющей эти заряды:

$$\vec{F}_2 = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r}, \quad F_1 = F_2 = F_k = \frac{|q_1 q_2|}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$



Этот закон был экспериментально установлен в 1785 г. французским ученым Ш. Кулоном с помощью изобретенных им крутильных весов. Ранее в 70-х гг. 18 века этот закон был открыт английским ученым Г. Кавендишем, но его труды были опубликованы лишь в 1879 г.

Известно, что по сравнению с вакуумом взаимодействие между зарядами в среде ослабевает и поэтому в закон Кулона вводят новую характеристику -

*относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  среды*

$$\vec{F}_k = \frac{|q_1 q_2|}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2}.$$

Для вакуума  $\epsilon=1$ , для всех сред  $\epsilon>1$ , но с достаточной степенью точности при проведении многих расчетов можно принять  $\epsilon$  для газов, равную единице.

## **2. Потенциальная энергия взаимодействия точечных зарядов.** **Потенциальный характер электростатического поля**

Взаимодействие между неподвижными зарядами осуществляется посредством электростатического поля: взаимодействуют не заряды, а один заряд в месте своего расположения взаимодействует с полем, созданным другим зарядом. В этом заключается идея близкодействия - идея передачи взаимодействий через материальную среду, через поле.

Покажем, что электростатическое поле является потенциальным полем. Для этого рассчитаем работу кулоновской силы при перемещении точечного положительного заряда  $q_2$  из точки 1 в точку 2 (рис.2.1,б) в электростатическом поле, созданном положительным точечным зарядом  $q_1$ ,

$$A_{12} = \int_1^2 \vec{F}_k d\vec{s} = \int_1^2 F_k dl \cos \alpha = \int_1^2 F_k dr = \\ = \frac{|q_1||q_2|}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_1^2 \frac{dr}{r^2} = \frac{|q_1||q_2|}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1} - \frac{|q_1||q_2|}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_2} = W_{p1} - W_{p2}.$$

Как видно из формулы, в этом интегральном выражении входят величины, описывающие только начальное и конечное положение заряда  $q_2$ , т.е. работа сил поля не зависит от пути перехода из точки 1 в точку 2. Это означает, что кулоновская сила будет консервативной силой, а электрическое поле является потенциальным. В таком поле заряд обладает потенциальной энергией  $W_p$ . Она представляет собой потенциальную энергию точечного заряда  $q_2$  в электрическом поле заряда  $q_1$  или потенциальную энергию заряда  $q_1$  в электрическом поле заряда  $q_2$ , или взаимную потенциальную энергию взаимодействующих точечных зарядов.

На основе выражения для работы для  $W_p$  можно записать следующее выражение:

$$W_p = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} + \text{const}.$$

Как видно из этого выражения,  $W_p$  определяется с точностью до постоянной величины. Ее выбор осуществляется наиболее удобным для решения задач способом. В данном случае для электрического поля точечного заряда принято выбирать  $\text{const}$  так, чтобы на бесконечно большом расстоянии между зарядами их взаимная потенциальная энергия обращалась в ноль:  $r \rightarrow \infty, W_p = 0$ . Следовательно,

$$W_p = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

### **3. Вектор напряженности $E$ и потенциал $\phi$ электростатического поля, расчет $E$ и $\phi$ для электростатического поля точечного заряда.**

Из предыдущего рассмотрения следует, что на точечный заряд  $q$ , помещенный в электростатическое поле, действует кулоновская сила  $F_k$  и заряд  $q$  обладает в этом поле потенциальной энергией  $W_p$ . Для расчета этих величин вводят две характеристики поля - вектор напряженности  $E$  и потенциал  $\phi$ . Зная эти величины в каждой точке поля, можно оценить  $F_k$  и  $W_p$  по формулам:

$$\vec{F}_k = q\vec{E}, \quad W_p = q\Phi.$$

Для произвольного электрического поля можно  $E$  и  $\Phi$  определить экспериментально. Для этого нужно в каждую точку поля помещать пробный положительный заряд  $q_0$ , найти из опыта  $F_k$  и  $W_p$ , а затем рассчитать  $E$  и  $\Phi$  по формулам:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_k}{q_0}, \quad \Phi = \frac{W_p}{q_0}.$$

Эти выражения являются формулами - определениями характеристик  $E$  и электростатического поля, а именно:

$E$  - векторная физическая величина, являющаяся силовой характеристикой поля и равная отношению кулоновской силы, действующей на пробный положительный заряд, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда;

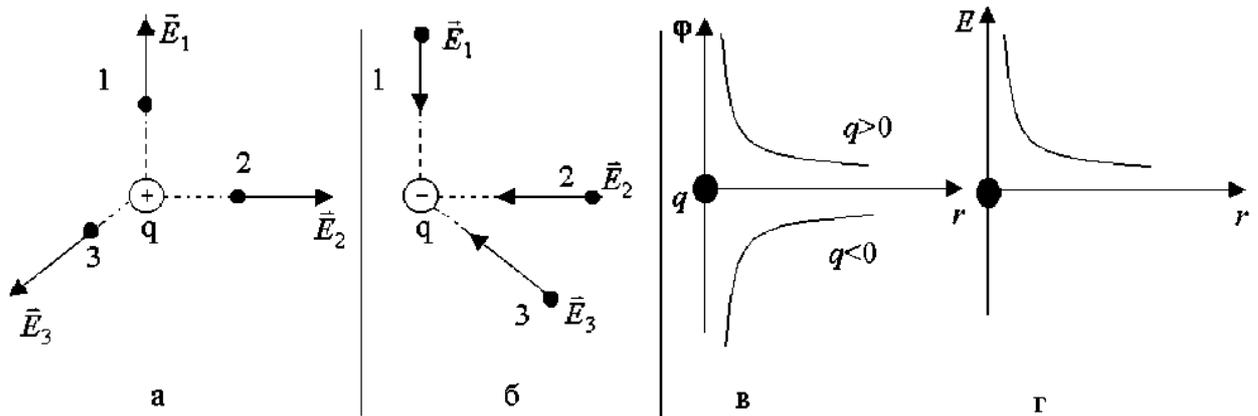
$\Phi$  - скалярная физическая величина, являющаяся энергетической характеристикой поля и равная отношению потенциальной энергии пробного заряда, помещенного в данную точку поля, к величине этого заряда.

При известном распределении зарядов, создающих электрическое поле, можно достаточно просто рассчитать  $E$  и  $\Phi$  на основе закона Кулона и принципа суперпозиции. В этом параграфе на основе закона Кулона приводится оценка характеристик  $E$  и  $\Phi$  поля, созданного точечным зарядом.

Будем считать, что точечный заряд  $q_1$  создает электрическое поле, а точечный заряд  $q_2$  находится в этом поле. Тогда из выше приведенных формул следует

$$\begin{aligned} \vec{F}_{12} &= q_2\vec{E}_1 = \frac{q_1q_2}{4\pi\epsilon_0r^3}\vec{r} \Rightarrow \\ \Rightarrow \vec{E}_{м.з.} &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0r^3}\vec{r}; & E_{м.з.} &= \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0r^2}; \\ W_p &= q_2\Phi_1 = \frac{q_1q_2}{4\pi\epsilon_0r} \Rightarrow \Phi_{м.з.} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0r}. \end{aligned}$$

Согласно этим формулам нулевой уровень потенциала  $\Phi$  электростатического поля точечного заряда выбирается на бесконечно большом расстоянии от него ( $r \rightarrow \infty, \Phi \rightarrow 0$ ).



Нужно также помнить, что потенциал  $\varphi$  является алгебраической величиной ( $\varphi > 0$ ,  $\varphi < 0$ ), и чем меньше расстояние до положительного заряда, создающего поле, тем больше  $\varphi$ , (образно говоря, происходит подъем на потенциальную горку) и соответственно, чем ближе к отрицательному заряду, тем меньше  $\varphi$  (происходит спуск в потенциальную яму).

#### 4. Принцип суперпозиции электростатических полей.

Примеры расчета  $E$  и  $\varphi$  для некоторых частных случаев распределения зарядов

Для расчета  $E$  и  $\varphi$  поля, созданного системой зарядов или макроскопическим заряженным телом, используют принцип суперпозиции, а

именно: вектор напряженности  $E$  (потенциал  $\varphi$ ) электрического поля, созданного несколькими зарядами, равен векторной сумме напряженностей (алгебраической сумме потенциалов) полей, созданных каждым зарядом в отдельности ( $E_1, E_2, \dots$ ;  $\varphi = \varphi_1, \varphi_2, \dots$ )

$$E = E_1 + E_2 + \dots, \quad \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots$$

$$\vec{E}_A = \int_V d\vec{E}; \quad d\vec{E} = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r};$$

$$\varphi_A = \int_V d\varphi; \quad d\varphi = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Принцип суперпозиции позволяет также рассчитывать потенциальную энергию взаимодействия зарядов. Так, для системы точечных зарядов  $q_i$

( $i = 1, \dots, N$ ) можно записать

$$W_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N q_i \Phi_i,$$

где  $\Phi_i$  - потенциал поля, созданного всеми зарядами, кроме  $i$  - го заряда, в месте расположения  $i$  - го заряда; коэффициент (1/2) входит в формулу из-за того, что взаимодействие двух зарядов в сумме учитывается дважды.

Рассмотрим ряд конкретных примеров расчета электростатических полей.

1. Поле диполя. Под электрическим диполем понимают электронейтральную систему близкорасположенных двух точечных зарядов, отстоящих друг от друга на расстояние  $l$  (рис.2.3,б). Для описания электрического поля, созданного диполем, вводят понятие дипольного момента  $p$ : это вектор, направленный по прямой от заряда (+ $q$ ) к заряду (- $q$ ), т.е. по оси диполя, и равный по модулю произведению модуля одного из зарядов на расстояние  $l$  между ними

$$p = ql.$$

Обычно при описании поля диполя рассматривают точки, находящиеся на расстоянии  $r$ , значительно превышающем расстояние  $l$  между зарядами диполя ( $r \gg l$ ).

Рассчитаем модуль вектора  $E$  и потенциал  $\phi$  в точках  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , отстоящих от центра диполя (точка  $O$ ) на расстоянии  $r$ ; линии  $OA$ ,  $OB$  и  $OC$  составляют с осью диполя углы  $0$ ,  $90^\circ$  и произвольный угол  $\alpha$

Используя принцип суперпозиции, найдем направление и модули векторов  $E_A, E_B, E_C$ , а также потенциалы  $\phi_A, \phi_B, \phi_C$  в этих точках.

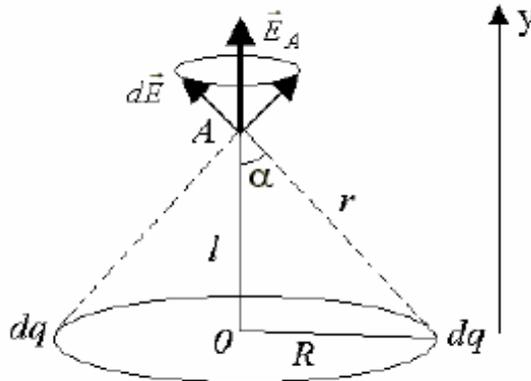
Для точки  $C$ , расположенной под произвольным углом  $\alpha$ , можно получить общее выражение, включающее в себя частные случаи для точек  $A$  и  $B$ :

$$E_C = \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^3} \sqrt{1 + 3\cos^2 \alpha}, \quad \phi_C = \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \cos \alpha.$$

Из формул следует, что модуль вектора напряженности  $E$  и потенциал  $\phi$  поля диполя на расстояниях  $r \gg l$  определяются модулем его дипольного момента  $p$ , причем они уменьшаются в зависимости от расстояния  $r$  быстрее, чем для поля точечного заряда.

2. Электрическое поле на оси равномерно заряженного кольца. Пусть равномерно заряженное по длине кольцо радиусом  $R$  несет заряд  $q$ . Найдем

направление и модуль вектора  $E$ , а также потенциал  $\phi$  поля кольца в точка  $A$ , расположенной на оси кольца на расстоянии  $l$  от его центра.



Для этого разбиваем кольцо на малые участки - точечные заряды  $dq$ , определяем направление векторов  $dE$  от всех зарядов  $dq$  в точке  $A$  и используем для расчета  $E_A$  формулу. Из симметрии задачи видно, что все вектора  $dE$  образуют конус векторов с углом  $\alpha$  при его вершине и суммарный вектор  $E_A$  будет направлен вдоль оси, вверх. Тогда

$$\vec{E}_A = \int d\vec{E};$$

$$\text{Оу: } E_A = \int dE \cos \alpha = \int \frac{dq \cos \alpha}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} = \frac{\cos \alpha}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \int dq = \frac{q \cos \alpha}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} = \frac{ql}{4\pi\epsilon\epsilon_0 (R^2 + l^2)^{3/2}};$$

$$\Phi_A = \int d\Phi = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 \sqrt{R^2 + l^2}}.$$

Итак,

$$E_A = \frac{ql}{4\pi\epsilon\epsilon_0 (R^2 + l^2)^{3/2}}; \quad \Phi_A = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 \sqrt{R^2 + l^2}}.$$

$$E_0 = 0, \quad \Phi_0 = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R}.$$

На расстояниях  $l$ , значительно превышающих радиус  $R$  кольца ( $l \gg R$ ), его можно рассматривать как материальную точку, а электрическое поле кольца как поле точечного заряда. Действительно, пренебрегая в формулах  $R^2$  по сравнению с  $l^2$ , получим:

$$l \gg R: \quad E_A = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l^2}, \quad \Phi_A = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l}.$$

## 5. Работа сил электрического поля. Разность потенциалов. Формула связи вектора $\vec{E}$ и потенциала $\varphi$

Запишем формулы для работы сил электростатического поля по перемещению точного заряда из точки 1 в точку 2.

$$A_{12} = q \int_1^2 E dl \cos \alpha, \quad \alpha = (\vec{E}, d\vec{S});$$
$$A_{12} = W_{p1} - W_{p2} = q(\varphi_1 - \varphi_2),$$

$$\vec{E}_A = \int d\vec{E};$$

$$\text{Оу: } E_A = \int dE \cos \alpha = \int \frac{dq \cos \alpha}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} = \frac{\cos \alpha}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \int dq = \frac{q \cos \alpha}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} = \frac{ql}{4\pi\epsilon\epsilon_0 (R^2 + l^2)^{3/2}};$$

$$\varphi_A = \int d\varphi = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 \sqrt{R^2 + l^2}}.$$

Итак,

$$E_A = \frac{ql}{4\pi\epsilon\epsilon_0 (R^2 + l^2)^{3/2}}; \quad \varphi_A = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 \sqrt{R^2 + l^2}}.$$

Величину  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  называют разностью потенциалов. Она характеризует работу сил электростатического поля по перемещению заряда из одной точки поля в другую и равна отношению этой работы к величине переносимого заряда

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}.$$

Отметим, что непосредственный физический смысл имеет не сам потенциал, определяемый подобно потенциальной энергии с точностью до произвольной постоянной, а разность потенциалов.

Из выражений, приведенных выше, можно получить интегральную формулу связи  $E$  и  $\varphi$ , в которую входят две точки поля:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E dl \cos \alpha.$$

Дифференциальную формулу связи  $E$  и  $\varphi$ , справедливую для малой окрестности какой-либо точки поля, можно вывести из выражений для элементарной работы:

$$dA = qE dl \cos \alpha = qE_l dl = -q d\varphi;$$

$$E_l = -\frac{d\varphi}{dl},$$

где  $E_l$  - проекция вектора  $E$  на направление  $l$  в пространстве.

В наиболее общем векторном виде выражение, связывающее  $E$  и  $\phi$ , записывается из полученного в механике соотношения между консервативной силой и потенциальной энергией.

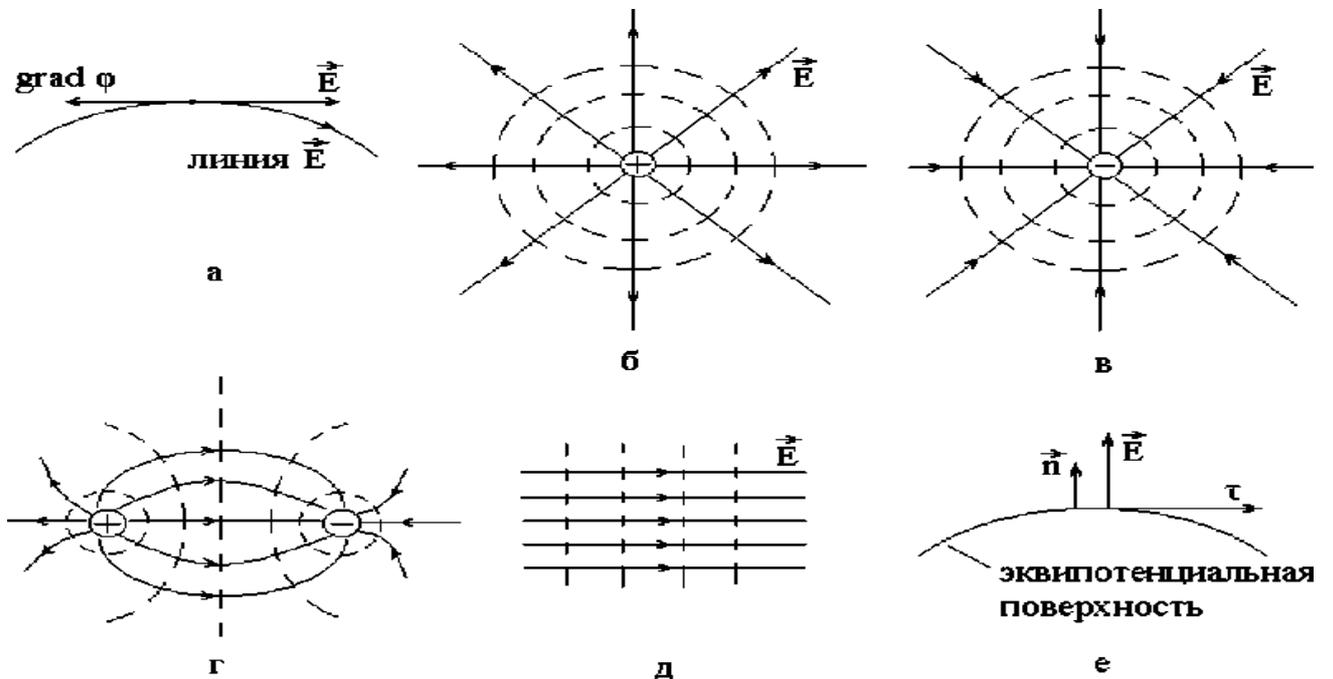
$$\vec{F}_k = q\vec{E} = -gradW_p = -grad(q\vec{E});$$

$$\vec{E} = -grad\phi = -\nabla\phi, \quad E_l = \frac{d\phi}{dl}.$$

Итак, в каждой точке поля вектор  $E$  равен по модулю и противоположен по направлению вектору градиента потенциала, т.е. вектор  $E$  в каждой точке указывает направление наиболее быстрого убывания потенциала.

### **6. Графическое изображение электростатических полей.**

1. Линии вектора  $E$ . Для графического изображения электростатических полей используют линии вектора  $E$  - они проводятся так, чтобы в каждой точке линии вектор  $E$  был направлен по касательной к ней. Линии  $E$  нигде не пересекаются, они начинаются на положительных зарядах, заканчиваются на отрицательных или уходят в бесконечность. Примеры графического изображения полей точечных зарядов приведены на рис.



Видно, что для одного точечного заряда линии  $E$  представляют собой прямые линии, выходящие или входящие в заряд. В случае однородного электрического поля, в каждой точке которого вектор  $E$  одинаков и по

модулю и по направлению, линии  $\vec{E}$  представляют собой прямые линии, параллельные друг другу и отстоящие друг от друга на одинаковом расстоянии.

Графическое изображение полей с помощью линий  $\vec{E}$  позволяет наглядно видеть направление кулоновской силы, действующей на точечный заряд, помещенный в данную точку поля, что является удобным для качественного анализа поведения заряда.

Обычно линии  $\vec{E}$  проводят так, чтобы их густота (количество линий, пронизывающих перпендикулярную к ним плоскую поверхность фиксированной площади) в каждой точке поля определяла числовое значение вектора  $\vec{E}$ . Поэтому по степени близости линий  $\vec{E}$  друг другу можно судить об изменении модуля  $E$  и соответственно об изменении модуля кулоновской силы, действующей на заряженную частицу в электрическом поле.

2. Эквипотенциальные поверхности. Эквипотенциальная поверхность - это поверхность равного потенциала, в каждой точке поверхности потенциал  $\varphi$  остается постоянным. Поэтому элементарная работа по перемещению заряда  $q$  по такой поверхности будет равна нулю:  $dA = -dq\varphi = 0$ . Из этого следует, что вектор  $\vec{E}$  в каждой точке поверхности будет перпендикулярен к ней, т.е. будет направлен по вектору нормали. Действительно, если бы это было не так, то тогда существовала бы составляющая

$$(E_{\tau} = -\frac{d\varphi}{d\tau} \neq 0 \Rightarrow \varphi \neq \text{const})$$

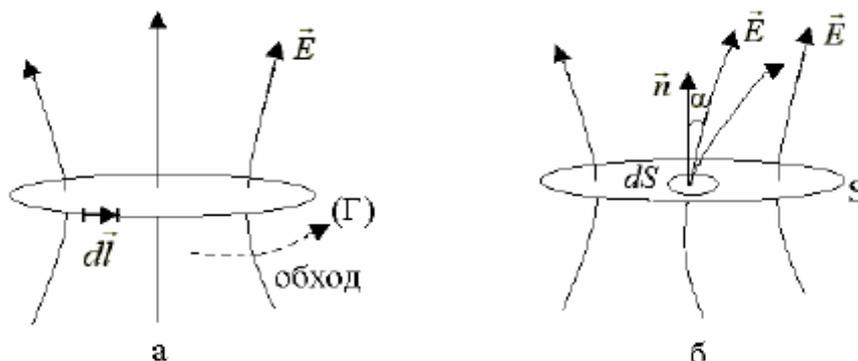
вектора  $\vec{E}$  ( $E_{\tau}$ ), направленная по касательной к поверхности, и, следовательно, потенциал в разных точках поверхности был бы разным, что противоречит определению эквипотенциальной поверхности.

Условились проводить эквипотенциальные поверхности так, чтобы разность потенциалов между соседними поверхностями была одинаковой. Это позволяет наглядно видеть изменение потенциальной энергии заряда при его движении в электрическом поле.

Тот факт, что вектор  $\vec{E}$  перпендикулярен к эквипотенциальной поверхности в каждой ее точке, позволяет достаточно просто переходить от графического изображения электрического поля с помощью линий  $\vec{E}$  к эквипотенциальным поверхностям, и наоборот.

## 7. Поток и циркуляция вектора $\vec{E}$ электростатического поля. Теорема Гаусса для вектора $\vec{E}$ .

Возьмем произвольный контур ( $\Gamma$ ) и произвольную поверхность  $S$  в неоднородном электростатическом поле



Тогда циркуляцией вектора  $E$  по произвольному контуру ( $\Gamma$ ) называют интеграл вида:

$$\oint_{(\Gamma)} \vec{E} d\vec{l} = \oint_{(\Gamma)} E dl \cos \alpha, \quad \alpha = (\vec{E}, d\vec{l}),$$

а потоком  $\Phi_E$  вектора  $E$  через произвольную поверхность  $S$  следующее выражение:

$$\Phi_E = \int_S d\Phi_E = \int_S \vec{E} d\vec{S} = \int_S E dl \cos \alpha, \quad \alpha = (\vec{E}, \vec{n}).$$

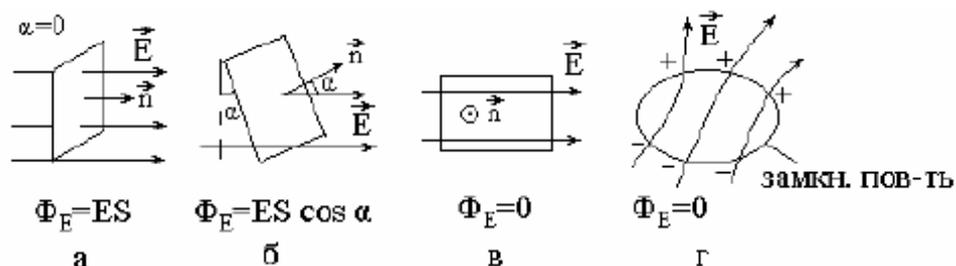
Входящие в эти формулы вектора  $d\vec{l}$  и  $d\vec{S}$  определяются следующим образом. По модулю они равны элементарной длине  $dl$  контура ( $\Gamma$ ) и площади  $dS$  элементарной площадки поверхности  $S$ . Направление вектора  $d\vec{l}$  совпадает с направлением обхода контура ( $\Gamma$ ), а вектор  $d\vec{S}$  направлен по вектору нормали  $\vec{n}$  к площадке  $dS$ .

В случае электростатического поля циркуляция вектора  $E$  по произвольному замкнутому контуру ( $\Gamma$ ) равна отношению работы  $A_{\text{круг}}$  сил поля по перемещению точечного заряда  $q$  по этому контуру к величине заряда будет равна нулю

Этот факт является признаком потенциальности электростатического поля, т.е. если циркуляция вектора  $E$  по произвольному замкнутому контуру ( $\Gamma$ ) равна нулю, то это поле является потенциальным. Следовательно, электрические заряды в электростатическом поле обладают потенциальной энергией.

Если учесть, что густота линий  $E$  определяет модуль вектора  $E$  в данной точке поля, то тогда поток вектора  $E$  будет численно равен количеству  $N$  линий  $E$ , пронизывающих поверхность  $S$ .

На рисунке приведены примеры расчета потока  $\Phi_E$  через различные поверхности  $S$  В последнем случае поток  $\Phi_E$  через замкнутую поверхность равен нулю, так как количество линий  $E$ , входящих ( $N_+$ ) и выходящих ( $N_-$ ) из нее, одинаково, но они берутся с противоположными знаками ( $\cos \alpha_+ > 0$ ,  $\cos \alpha_- < 0$ ).



Для вектора  $E$  можно сформулировать теорему Гаусса, определяющую поток вектора  $E$  через произвольную замкнутую поверхность.

Теорема Гаусса в отсутствие диэлектрика (вакуум) формулируется следующим образом: поток вектора  $\vec{E}$  через произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме свободных зарядов  $q_{\Sigma}$ , охватываемых этой поверхностью, и деленной на  $\epsilon_0$ :

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{q_{\Sigma}}{\epsilon_0}.$$

Эта теорема является следствием закона Кулона и принципа суперпозиции электростатических полей.

Покажем справедливость теоремы для случая поля точечного заряда. Пусть замкнутая поверхность представляет собой сферу радиусом  $R$ , в центре которой находится точечный положительный заряд  $q$ .



Тогда 
$$\oint_S E dS \cos \alpha = \oint_S \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} dS \cos \alpha = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \oint_S dS = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} 4\pi R^2 = q / \epsilon_0.$$

Полученный результат не изменится, если вместо сферы выбрать произвольную замкнутую поверхность, так как поток вектора  $\vec{E}$  численно равен количеству линий  $\vec{E}$ , пронизывающих поверхность, а число таких линий  $\vec{E}$  в случаях (а) и (б) одинаково.

Такие же рассуждения с использованием принципа суперпозиции электростатических полей можно привести и в случае нескольких зарядов, попадающих внутрь замкнутой поверхности, что и подтверждает теорему Гаусса.

Теорема Гаусса для вектора  $\vec{E}$  в присутствии диэлектрика. В этом случае помимо свободных зарядов  $q$  необходимо учитывать и связанные заряды  $q'$ , появляющиеся на противоположных гранях диэлектрика при его поляризации во внешнем электрическом (подробнее см. раздел диэлектрики). Поэтому теорема Гаусса для вектора в присутствии диэлектрика запишется таким образом

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{q_{\Sigma} + q'}{\epsilon_0},$$

где в правую часть формулы входит алгебраическая сумма свободных и связанных зарядов, охватываемых поверхностью  $S$ .

Из формулы вытекает физический смысл теоремы Гаусса для вектора  $\mathbf{E}$ : источниками электростатического поля вектора  $\mathbf{E}$  являются свободные и связанные заряды.

В частном случае симметричного расположения зарядов и диэлектрика, при наличии осевой или сферической симметрии или в случае изотропного однородного диэлектрика, относительная диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon$  остается постоянной величиной, не зависящей от рассматриваемой внутри диэлектрика точки, и поэтому можно учесть наличие диэлектрика в формуле не только введением связанных зарядов  $q'$ , но и параметром  $\epsilon$ , что является более удобным при практических расчетах. Так, можно записать

$$\frac{q_{\Sigma} + q}{\epsilon_0} = \frac{q_{\Sigma}}{\epsilon\epsilon_0}.$$

Тогда теорема Гаусса для вектора  $\mathbf{E}$  в этом случае запишется так:

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{q_{\Sigma}}{\epsilon\epsilon_0},$$

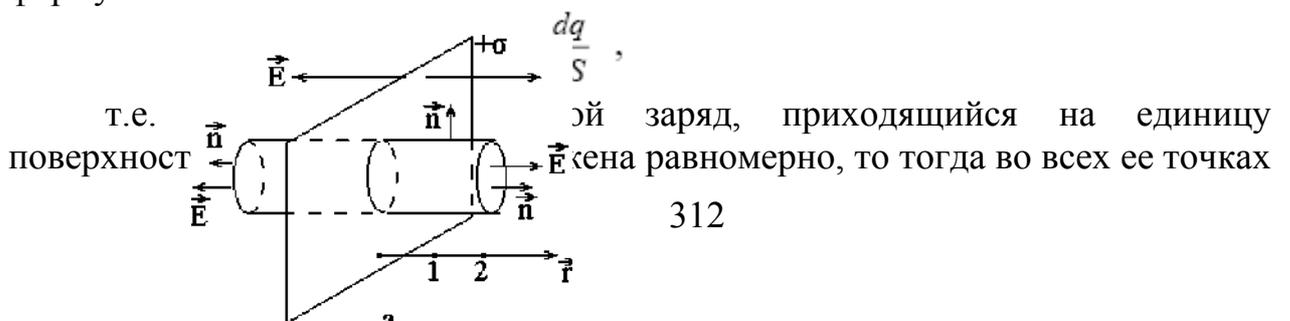
где  $\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится поверхность  $S$ .

### 8. Применение теоремы Гаусса для расчета электростатических полей.

В случае электростатических полей, обладающих той или иной симметрией (осевая и сферическая симметрия, однородное поле), теорема Гаусса позволяет достаточно просто получить выражение для модуля вектора  $\mathbf{E}$ . При применении теоремы Гаусса выделяют следующие этапы: 1) из симметрии распределения зарядов определяют направление вектора  $\mathbf{E}$  в каждой точке поля; 2) выбирают произвольную замкнутую поверхность и рассчитывают поток вектора  $\mathbf{E}$  через нее. Поверхность должна содержать внутри себя заряд (часть заряда), создающий поле, и отражать симметрию поля (цилиндр, сфера); 3) рассчитывают заряд, попадающий внутрь поверхности; 4) применяют теорему Гаусса для определения модуля вектора  $\mathbf{E}$ . Рассмотрим конкретные примеры применения теоремы Гаусса.

#### Пример 1. Электрическое поле равномерно заряженной по поверхности бесконечно протяженной плоскости. Поле плоского конденсатора.

1 этап. Введем поверхностную плотность заряда  $\sigma$ . Для этого на заряженной поверхности вблизи какой-либо ее точки выбирают элементарную площадку  $dS$ , содержащую заряд  $dq$ , и рассчитывают  $\sigma$  по формуле



$\sigma$  будет одинаковой ( $\sigma = \text{const}$ ), и поэтому поле такой бесконечно протяженной плоскости является однородным - линии  $E$  представляют собой прямые, перпендикулярные к ней; во всех точках поля модуль  $E$  одинаков.

2 этап. Выбираем замкнутую поверхность в виде цилиндра, образующая которого перпендикулярна к плоскости (рис.2.10,а). Тогда поток ФЕ через боковую поверхность будет равен нулю ( $\alpha = 90$  град, линии  $E$  не пересекают боковой поверхности) и поэтому остается поток только через основания площади  $S_1 = S_2 = S$

$$\Phi_e = \oint E dS \cos \alpha = \int_{S_1} E dS \cos \alpha + \int_{S_2} E dS \cos \alpha = 2ES$$

3 этап. Рассчитаем заряд плоскости, попадающий внутрь цилиндра

$$q_{\Sigma} = \int_S dq = \int_S \sigma dS = \sigma S$$

4 этап. Применяем теорему Гаусса для расчета модуля вектора  $E$ , где учтен случай отрицательно заряженной плоскости.

$$2ES = \frac{\sigma S}{\epsilon \epsilon_0};$$

$$E = \frac{|\sigma|}{2\epsilon \epsilon_0},$$

Разность потенциалов между двумя точками поля, находящимися на расстояниях  $r_1$  и  $r_2$  от плоскости.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E dl \cos \alpha = \pm E(r_2 - r_1) = \pm \frac{|\sigma|}{2\epsilon \epsilon_0}(r_2 - r_1),$$

где знак «+» берется для положительно заряженной плоскости.

Эта формула также позволяет провести расчет поля плоского конденсатора как поля двух параллельных плоскостей с равными по модулю и противоположными по знаку поверхностными плоскостями зарядов

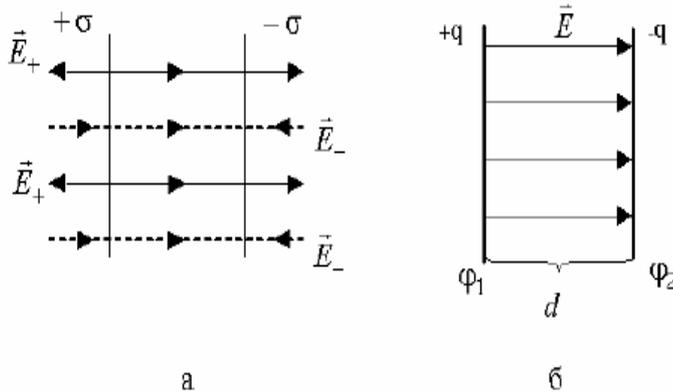
Используя принцип суперпозиции электростатических полей, можно сделать вывод о том, что поле конденсатора существует между его пластинами, а модуль вектора  $E$  этого поля равен

$$E = E_+ + E_- = \frac{|\sigma|}{2\epsilon \epsilon_0} = \frac{|q|}{S\epsilon \epsilon_0}$$

где  $|\sigma|$  - модуль заряда одной из пластин конденсатора площади  $S$ .

Оценим разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$  (или напряжение  $U$ ) между обкладками конденсатора, находящимися на расстоянии  $d$  друг от друга. Для этого используем формулы .

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E dl \cos \alpha = Ed = \frac{|\sigma|}{\epsilon \epsilon_0} d = \frac{q}{s \epsilon \epsilon_0} d .$$



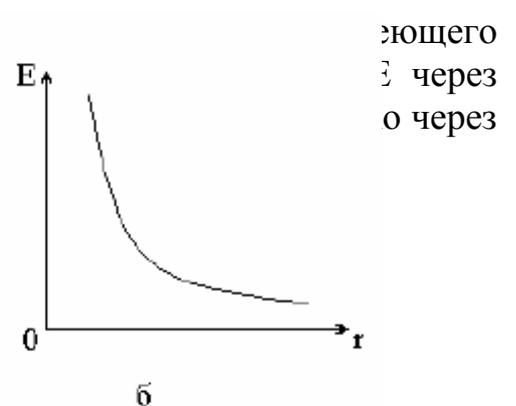
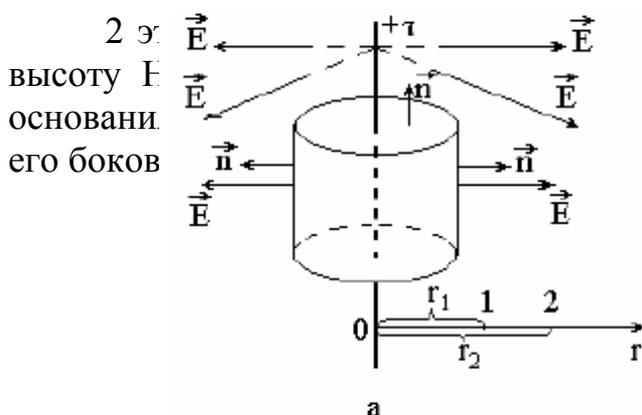
### Пример 2. Поле равномерно заряженной бесконечно длинной прямолинейной нити.

1 этап. Введем линейную плотность  $\tau$  заряда нити. Для этого на заряженной нити выбираем элемент длины  $dl$ , содержащий заряд  $dq$  , и рассчитываем  $\tau$  по формуле

$$\tau = \frac{dq}{dl} ,$$

т.е.  $\tau$  представляет собой заряд, приходящийся на единицу длины нити. Для равномерно заряженной нити во всех ее точках  $\tau$  будет одинаковой ( $\tau = \text{const}$ ), поэтому поле такой нити обладает осевой симметрией - линии  $E$  представляют собой прямые, выходящие из нити и лежащие в плоскостях, перпендикулярных к ней (рис 2.12 а). Примем на одинаковых расстояниях от нити, т.е.

$$\Phi_E = \oint E dS \cos \alpha = \int_{S_{\text{бок}}} E dS \cos \alpha = ES_{\text{бок}} = E2\pi rH . \quad \text{б.м.}$$



## ТЕМА: Проводники в электрическом поле.

### 1. Распределение избыточного заряда на проводниках в состоянии равновесия

К проводникам относятся вещества, проводящие электрический ток. В них имеются свободные заряды, которые способны перемещаться по проводнику под действием внешнего электрического поля. В металлических проводниках свободными зарядами являются электроны, они образуют газ, заполняющий кристаллическую решетку положительно заряженных ионов.

Рассмотрим, что произойдет, если проводнику сообщить избыточный заряд. При этом положительному заряду металлического проводника соответствует недостаток свободных электронов, а отрицательному заряду - их избыток. В условиях равновесия избыточного заряда справедливы следующие утверждения:

1. Электрическое поле внутри проводника отсутствует, а объем проводника

и его поверхность являются эквипотенциальными

$$E_{\text{вн}} = 0, \quad \varphi_{\text{вн}} = \text{const.}$$

Действительно, если эти равенства не выполняются, то тогда свободные заряды в проводнике будут перемещаться, так как работа сил электрического поля не будет равна нулю:

$$(dA = qEdl \cos \alpha = -q d\varphi \neq 0)$$

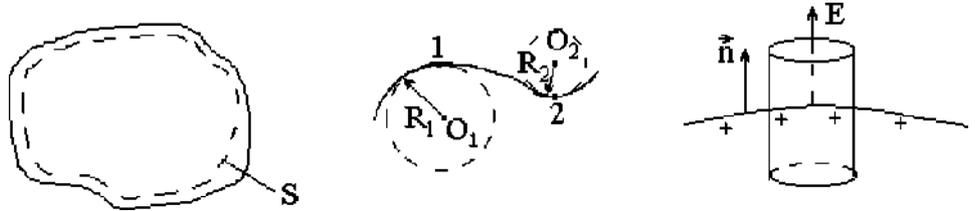
Это противоречит условию равновесия избыточного заряда: в условиях равновесия они должны быть неподвижными.

2. Избыточный заряд распределяется только по внешней поверхности проводника, так как из-за кулоновского отталкивания одноименных зарядов они стараются разойтись на максимально возможные расстояния друг от друга, т.е. внутри такой поверхности избыточного заряда нет, так как этот заряд одного знака. Следовательно, он располагается только на внешней поверхности проводника.

### 3. Распределение избыточного заряда по внешней поверхности проводника

является неравномерным: модуль вектора  $E$  и поверхностная плотность заряда  $\sigma$  больше в тех точках поверхности проводника, где ее кривизна больше.

Кривизну поверхности в какой-либо ее точке можно определить радиусом  $R$  вписанной вблизи этой точки сферы, а именно, кривизна поверхности обратно пропорциональна  $R$ .

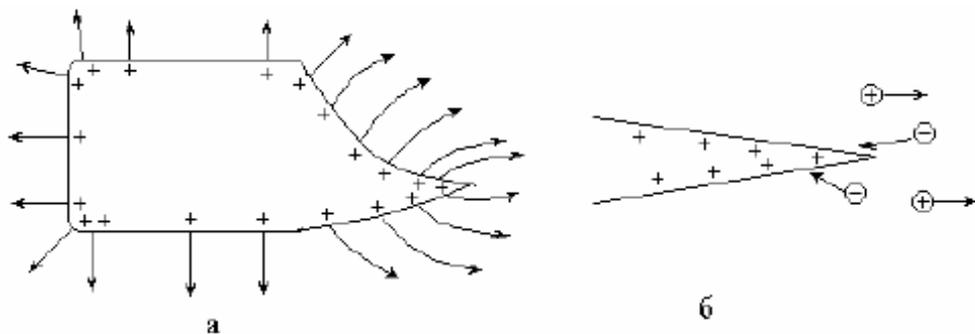


Модуль вектора  $E$  вблизи какой-либо точки поверхности заряженного проводника пропорционален поверхностной плотности заряда  $\sigma$  в этой точке.

Нужно учесть, что линии  $E$  во всех точках перпендикулярны к поверхности металла, так как она является эквипотенциальной поверхностью.

Вблизи острия модуль вектора  $E$  может превысить значение, соответствующее ионизации молекул воздуха ( $E$  иониз  $\approx 3 \cdot 10^6$  В/м при атмосферном давлении), и тогда возникает явление стекания зарядов, сопровождающееся электрическим ветром.

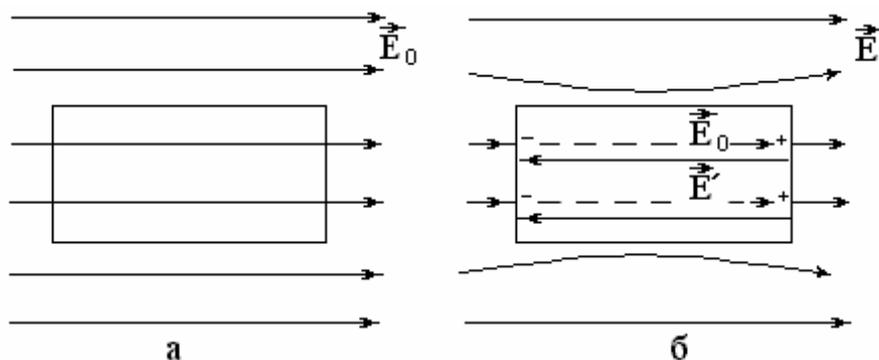
Образующиеся при ионизации молекул электроны движутся к острию и компенсируют на нем часть заряда, равновесие зарядов на проводнике нарушается и к острию подходят заряды с других участков поверхности проводника. Это движение продолжается до тех пор, пока модуль напряженности электрического поля вблизи острия будет превышать  $E_{\text{иониз}}$ .



В то же время положительные ионы молекул воздуха движутся в противоположном направлении от острия, увлекают за собой нейтральные молекулы, создавая движения воздуха - электрический ветер.

## 2. Незаряженный проводник во внешнем электрическом поле

Поместим во внешнее электрическое поле напряженности  $E$  незаряженный проводник (рис.а), начальный момент времени  $t=0$ ).



Под действием сил поля свободные заряды в проводнике приходят в движение и на его противоположных сторонах появляются индуцированные заряды, (такое явление получило название явления электростатической индукции), которые в условиях равновесия создают свое поле  $E$  и оно компенсирует внешнее электрическое поле внутри проводника ( $E_{\text{внутри}} = E' + E_0 = 0$ ), и искажают это поле снаружи, вблизи поверхности (рис.б).

Итак, внешнее электрическое поле не проникает внутрь металла. Это позволяет использовать металлическую оболочку, сплошную или в виде сетки, для защиты (экранировки) различных приборов от внешних электрических полей.

### 3. Электроемкость уединенного проводника. Электроемкость конденсатора.

Рассмотрим уединенный проводник, т.е. в окружающем его пространстве нет других тел - диэлектриков ( $\epsilon=1$ , вакуум) и проводников. Из формул электростатики следует, что заряд  $q$  проводника и его потенциал  $\Phi$ , который в условиях равновесия будет одинаковым внутри и на поверхности проводника, пропорциональны друг другу, поэтому коэффициент пропорциональности между ними

$$C = \frac{q}{\Phi}$$

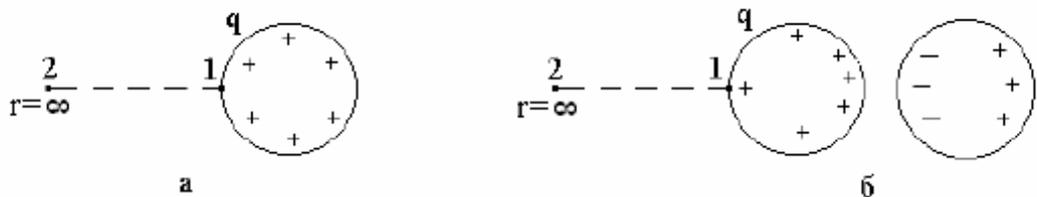
не будет зависеть ни от  $q$ , ни от  $\Phi$  и называется электроемкостью проводника. Электроемкость проводника характеризует его способность накапливать заряды и зависит только от геометрических размеров проводника и диэлектрических свойств окружающей среды, т.е. от  $\epsilon$ . Действительно, в случае металлической сферы можно записать:

$$C_{с\phi} = \frac{q}{\Phi_{с\phi}} = \frac{q}{\left(\frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R}\right)} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R.$$

Емкость уединенного проводника является достаточно малой величиной. Так, если рассматривать планету Земля как проводящий шар радиуса  $R=6400$  км, то тогда ее емкость составит всего 711 мкФ.

Оказывается, что наличие вблизи уединенного проводника каких-либо тел (проводники или диэлектрики) увеличивает его емкость.

Действительно, если, например, к положительно заряженному проводнику поднести незаряженный металлический проводник, то за счет перераспределения заряда на проводниках



электрическое поле в пространстве ослабевает, т.е. на линии 1-2 модуль вектора  $E$  будет уменьшаться и поэтому потенциал поверхности заряженного проводника

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_1 = \int_1^2 E dl \cos \alpha$$

будет также уменьшаться, что при постоянном заряде проводника приводит к увеличению его емкости.

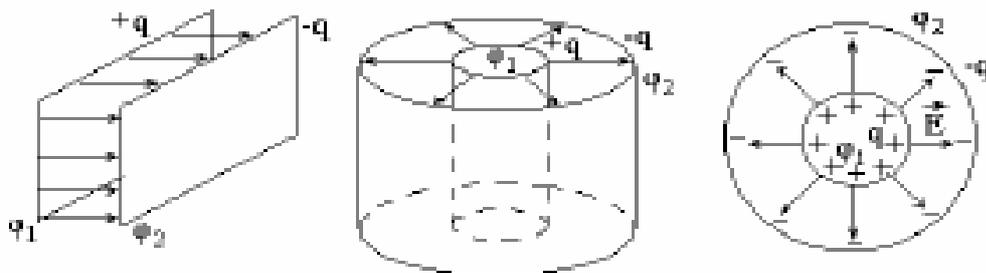
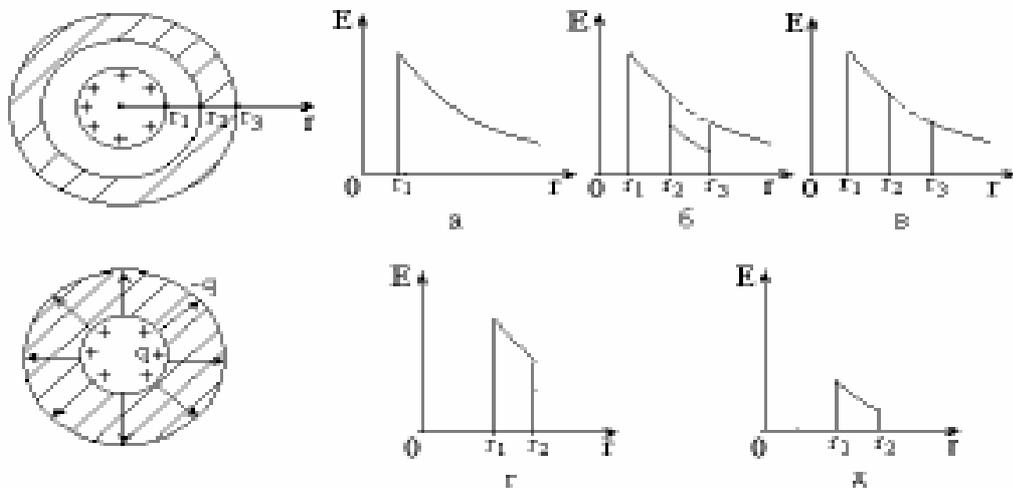
Покажем на конкретном примере заряженной проводящей сферы радиуса  $r_1$ , как происходит ослабление электрического поля и потенциала сферы при наличии в окружающем ее пространстве каких-либо тел.

В отсутствие других тел зависимость модуля напряженности электрического поля сферы от расстояния  $r$  приведена на рисунке. Здесь показано, как последовательно ослабляется электрическое поле сферы для различных случаев размещения вокруг нее тел, а именно, сферу окружают:

- 1) шаровым слоем из диэлектрика;
  - 2) заменяют шаровой слой из диэлектрика шаровым слоем из металла металлической сферой радиуса  $r_2$ , несущей заряд, равный по модулю заряду сферы радиуса  $r_1$ , но противоположный ему по знаку;
  - 3) заполняют пространство между сферами диэлектриком
- Случаи (г) и (д) соответствуют сферическому конденсатору.

Как следует из рисунка, наибольший эффект увеличения емкости проводника достигается для конденсаторов, представляющих собой две металлические пластины, разделенные слоем диэлектрика. На пластины (обкладки) подают заряды, одинаковые по модулю и противоположные по знаку. Форма обкладок конденсатора обеспечивает существование электрического поля только в пространстве между ними. Это

позволяет устранить влияние на емкость конденсатора окружающих его тел.



$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U},$$

где  $q$  - заряд положительно заряженной пластины конденсатора,  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  - разность потенциалов между его обкладками.

Емкость конденсатора, как и емкость уединенного проводника, зависит только от его геометрических размеров и диэлектрических свойств среды ( $\epsilon$ ) между его пластинами.

Запишем формулы для емкости конденсаторов различного вида.

1. Плоский конденсатор. Используя полученную ранее для разности потенциалов

$$C_{\text{пл}} = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{\left(\frac{q}{S\epsilon\epsilon_0}d\right)} = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d},$$

где  $S$  - площадь одной пластины конденсатора,  $d$  - расстояние между ними,  $\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками конденсатора.

2. Цилиндрический конденсатор. Радиусы обкладок конденсатора обозначим как  $R_1$  и  $R_2$  ( $R_2 > R_1$ ), а длину пластин через  $H$ . Электрическое поле такого конденсатора обладает осевой симметрией и согласно теореме Гаусса определяется зарядом внутренней обкладки

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{\frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{R_2}{R_1}} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 H}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$

3. Сферический конденсатор. Радиусы обкладок обозначим как  $R_1$  и  $R_2$  ( $R_2 > R_1$ ). Электрическое поле конденсатора обладает сферической симметрией и согласно теореме Гаусса определяется зарядом только внутренней сферы. Учитывая формулу для потенциала поля сферы, можно рассчитать разность потенциалов между обкладками конденсатора и его емкость

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{\left( \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1} - \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R_2} \right)} = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 R_2 R_1}{R_2 - R_1}$$

#### 4. Энергия электростатического поля. Объемная плотность энергии.

Выведем формулу для энергии  $W$  заряженного проводника. Для этого рассмотрим работу внешних сил по увеличению заряда проводника от  $q_1 = 0$  (энергия проводника  $W_1 = 0$ , если потенциал  $\varphi_1 = 0$ ) до  $q_2$  (энергия  $W_2$ , потенциал  $\varphi_2$ ), а именно будем малыми порциями  $dq$  перемещать заряд из бесконечности ( $\varphi_\infty = 0$ ) на поверхность проводника. При этом работа  $A_{\text{вн}}$  внешней силы будет совершаться против кулоновской силы отталкивания одноименных зарядов и поэтому

$$A_{\text{вн}} = W_2 - W_1 = -A_{\text{кул}} = -\int_0^{q_2} dA_{\text{кул}} = -\int_0^{q_2} (\varphi_\infty - \varphi) dq = \int_0^{q_2} \frac{q}{C} dq = \frac{q_2^2}{2C},$$

где учтено, что  $W_1 = 0$ .

Итак, для энергии заряженного уединенного проводника можно записать:

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

Аналогично можно получить формулу для энергии  $W$  заряженного конденсатора:

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2}.$$

Оставаясь в рамках электростатики нельзя однозначно ответить на вопрос о происхождении энергии заряженного проводника (конденсатора) - или это энергия его зарядов или энергия электростатического поля в окружающем проводник пространстве. И только из рассмотрения полной системы уравнения Максвелла был сделан вывод в пользу электростатического поля. Для энергии заряженного плоского конденсатора получим

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{2d} (Ed)^2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} V = wV,$$

где  $V = Sd$  - объем пространства между обкладками конденсатора, а величина  $w$  называется объемной плотностью энергии электростатического поля.

В общем случае для неоднородного поля величина  $w$  определяется так:

$$w(x, y, z) = \frac{dW}{dV} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2(x, y, z)}{2},$$

где  $dW$  - энергия электростатического поля, заключенная в элементарном объеме  $dV$  вблизи точки пространства с координатами  $(x, y, z)$ .

Введение  $w$  позволяет рассчитывать энергию  $W$  поля в любом конечном объеме  $V$  пространства

$$W = \int_V w dV = \iiint_V \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2(x, y, z)}{2} dx dy dz.$$

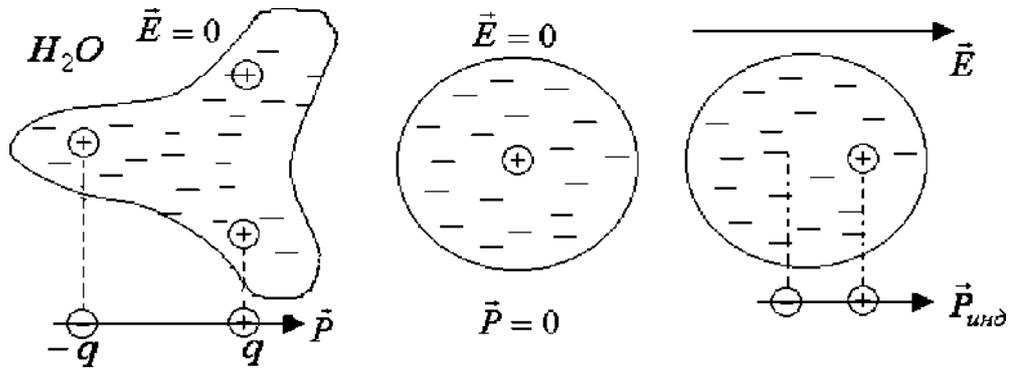
## **ТЕМА: Диэлектрики**

### **1. Полярные и неполярные молекулы**

К диэлектрикам относят вещества, в которых нет свободных зарядов или их число настолько мало, что они не оказывают существенного влияния на их характеристики. Поведение диэлектрика в электрическом поле определяется поведением его молекул, которые делятся на полярные и неполярные молекулы.

У полярных молекул (молекулы воды  $H_2O$ , соляной кислоты, аммиака и т.д.) в отсутствие электрического поля центры тяжести положительных и отрицательных зарядов не совпадают, такие молекулы представляют собой диполи, которые характеризуются дипольным моментом  $\mathbf{p}$ .

Для неполярных молекул (молекулы кислорода  $O_2$ , водорода  $H_2$ , гелия  $He$  и т.д.) в отсутствие электрического поля центры тяжести положительных и отрицательных зарядов совпадают, поэтому дипольный момент молекулы  $\vec{p}$  равен нулю.



В электрическом поле неполярная молекула за счет смещения ее положительных и отрицательных зарядов приобретает индуцированный дипольный момент  $\vec{p}_{инд}$ , пропорциональный вектору  $\vec{E}$  электрического поля

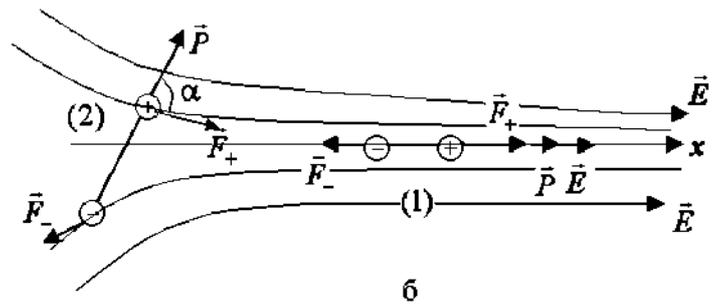
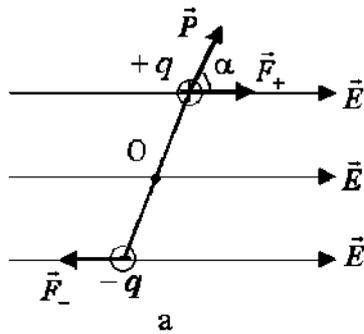
$$\vec{p}_{инд} = \alpha \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad ,$$

где  $\alpha$  - скалярная величина, называемая поляризуемостью молекулы. Индуцированный дипольный момент  $\vec{p}_{инд}$  появляется в электрическом поле и у полярной молекулы, но он значительно меньше уже имеющегося у нее дипольного момента  $\vec{p}$ , поэтому для таких молекул  $\vec{p}_{инд}$  пренебрегают.

Введение понятия дипольного момента молекулы позволяет описать ее поведение и соответственно поведение самого диэлектрика в электрическом поле.

## 2. Поведение диполя в электрическом поле

1. Однородное электрическое поле. На заряды диполя в однородном электрическом поле действует пара одинаковых по модулю сил ( $F_+ = F_-$ ), вызывающих вращение диполя вокруг его центра (точки  $O$ ) с уменьшением угла между дипольным моментом  $\vec{p}$  и вектором  $\vec{E}$  (рис.а).



В итоге диполь установится в положении, для которого угол  $\alpha$  между векторами  $\vec{p}$  и  $\vec{E}$  будет равен нулю ( $\vec{p} \uparrow \vec{E}$ ,  $\alpha=0$ , положение устойчивого равновесия).

Введем потенциальную энергию диполя  $W$  в электрическом поле. Для этого рассчитаем работу сил поля по вращению диполя от состояния 1, при котором угол  $\alpha = \alpha_1$ , до состояния 2 ( $\alpha = \alpha_2$ ).

Используя формулу для работы силы по вращению тела, получим:

$$A_{12} = - \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} M d\alpha = - \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} (F_+ \frac{l}{2} \sin \alpha + F_- \frac{l}{2} \sin \alpha) d\alpha =$$

$$= -qE \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha \cdot d\alpha = (pE \cos \alpha_1) - (pE \cos \alpha_2) = W_1 - W_2.$$

$$W = -(\vec{p}\vec{E}) = -pE \cos \alpha, \quad \alpha = (\vec{p}, \vec{E}).$$

Из этого выражения видно, что в положении устойчивого равновесия потенциальная энергия диполя минимальна и равна  $W = -pE$ .

## 2. Неоднородное электрическое поле.

Пусть электрическое поле нарастает вдоль оси  $Ox$  (рис.б). Если угол  $\alpha$  между векторами  $\vec{p}$  и  $\vec{E}$  равен нулю (положение 1), то тогда под действием пары сил диполь будет втягиваться в область более сильного поля ( $F_+ > F_-$ , рис.2.22,б). При начальном угле  $\alpha < 90^\circ$  (положение 2) пара сил, действующих на заряды диполя, будет приводить к его вращению с уменьшением угла  $\alpha$  и втягиванию в область более сильного поля, т.е. к поступательному движению вдоль оси  $Ox$ . При начальном угле  $\alpha > 90^\circ$  Диполь будет сначала поворачиваться с уменьшением угла  $\alpha$  и выталкиваться в область более слабого поля. При достижении угла  $\alpha = 90^\circ$  он поворачивается с уменьшением угла  $\alpha$  и начинает втягиваться в область более сильного поля. Можно записать формулу для проекции на ось  $Ox$  силы  $F_x$ , вызывающей поступательное движение диполя, используя известное из механики выражение, связывающее консервативную силу и потенциальную энергию

$$F_x = - \frac{dW}{dx} = p \frac{dE}{dx} \cos \alpha.$$

Итак, при любом начальном угле  $\alpha$  диполь в неоднородном электрическом поле в итоге втягивается в область более сильного поля. Такое поведение диполя используется в пылеулавливателях. В какой-либо части трубы, из которой выходит дым (это могут быть, например, побочные газообразные продукты горения на тепловых электростанциях, металлургического производства различных металлов), создается неоднородное электрическое поле. Частицы дыма (они представляют собой диполи) втягиваются в область более сильного поля и не попадают в воздушную атмосферу, не загрязняют окружающую среду.

### 3. Характеристики, вводимые для описания электрического поля в присутствии диэлектриков.

1.  $\vec{E}', \vec{E}, q', \sigma'$ . Диэлектрик, помещенный во внешнее электрическое поле напряженности  $E_0$  поляризуется, т.е. создает свое собственное электрическое поле напряженности  $E'$ . При этом напряженность результирующего электрического поля  $E$  будет равна

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' .$$

Поляризация диэлектрика сопровождается появлением на его противоположных гранях некомпенсированных связанных зарядов  $q'$ , которые и создают поле  $E'$ . Поверхностная плотность заряда  $\sigma$  характеризует распределение заряда  $q'$  по поверхности диэлектрика.

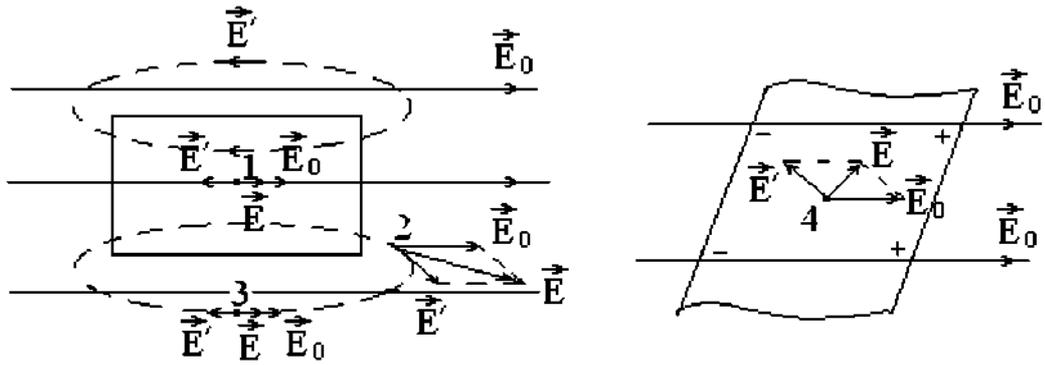
2. Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  среды. Она показывает, во сколько раз модуль напряженности  $E_0$  поля в вакууме больше модуля напряженности  $E$  поля внутри диэлектрика

$$\epsilon = \frac{E_0}{E} .$$

Эта формула справедлива для однородного изотропного диэлектрика, заполняющего все пространство или представляющего собой цилиндрические, сферические и прямоугольные пластины, находящиеся соответственно в электрическом поле осевой или сферической симметрии или в однородном поле. Тогда между векторами  $E_0$  и  $E'$  угол будет равен  $180^\circ$  и можно записать:

$$E = E_0 - E' ; \epsilon = \frac{E_0}{E_0 - E'} .$$

В зависимости от формы диэлектрика и его расположения во внешнем электрическом поле угол между векторами  $E_0$  и  $E'$  может изменяться



3. Вектор поляризации (поляризованность)  $\vec{P}$ . Он равен векторной сумме дипольных моментов молекул единицы объема диэлектрика.

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_i}{V}$$

Вектор поляризации  $\vec{P}$  описывает способность диэлектрика создавать свое собственное поле  $\vec{E}'$ . Можно показать, что

$$\vec{P} = -\epsilon_0 \vec{E}'$$

Из опыта известна формула

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}$$

где величина  $\chi$  называется диэлектрической восприимчивостью диэлектрика.

4. Вектор электрического смещения (электрической индукции)  $\vec{D}$ . Он вводится по формуле

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

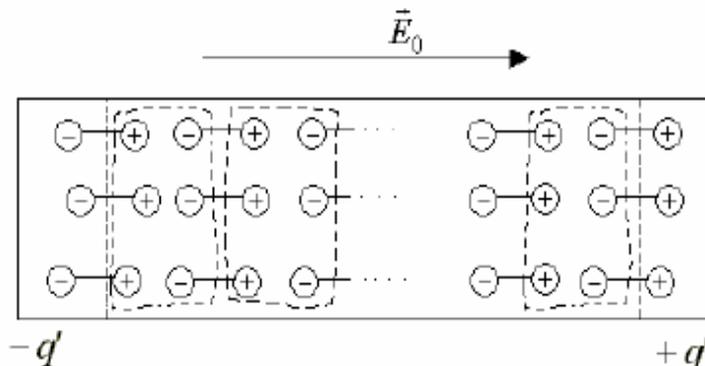
$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \chi \epsilon_0 \vec{E} = (1 + \chi) \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}, \quad \epsilon = 1 + \chi$$

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$$

#### 4. Неполярный диэлектрик во внешнем электрическом поле

Во внешнем электрическом поле происходит смещение зарядов неполярных молекул, они становятся диполями и приобретают индуцированные дипольные моменты. На рис. показано расположение молекул-диполей на поверхности и внутри диэлектрика, представляющего собой прямоугольную пластину длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$ , во внешнем од-

Из рису  
соседних моле  
замкнутыми п  
остаются заря



ация зарядов  
ограниченных  
сированными  
ектрика, они

называются связанными зарядами, поскольку эти заряды находятся внутри молекул и не могут свободно перемещаться по всему объему диэлектрика.

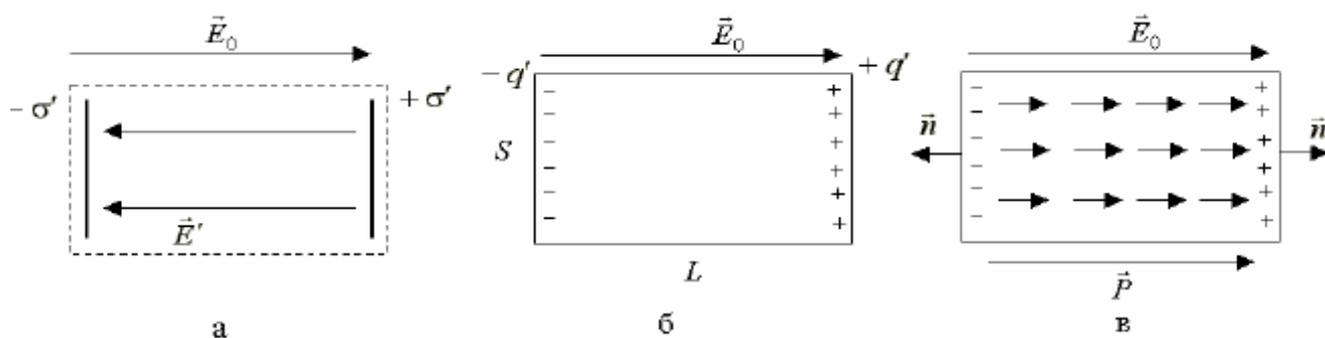
1. Электрическое поле  $E'$  диэлектрика эквивалентно электрическому полю плоского конденсатора с поверхностной плотностью заряда его пластин, равной  $\sigma'$ . Следовательно,

$$P = \frac{|\sum \vec{p}_i|}{V} = P_{\text{большой мол.}} = \frac{q' \cdot L}{SL} = \sigma', \quad P_n = \sigma',$$

2. Диэлектрик подобен большой полярной молекуле. Поэтому поведение диэлектрика во внешнем электрическом поле подобно поведению диполя. Рассчитаем модуль вектора поляризации:

$$E' = \frac{\sigma'}{\epsilon_0},$$

где  $P_n$ - проекция вектора  $P$  на направления нормали к поверхности диэлектрика ( $P_n=P$  для правой грани).



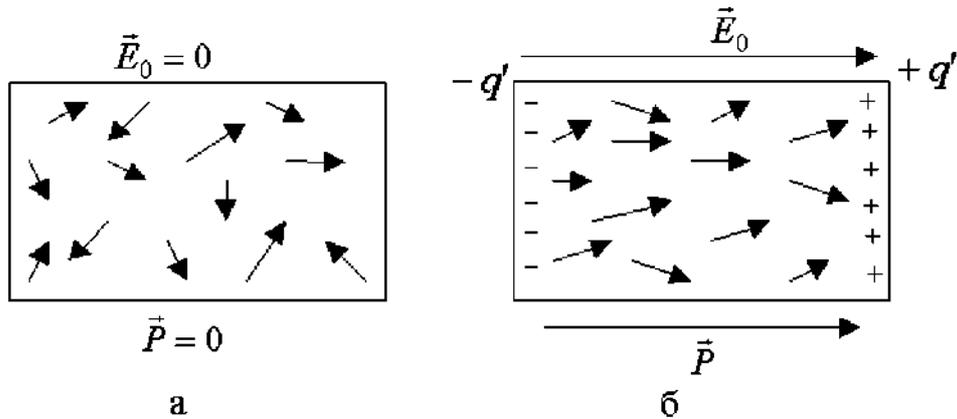
3. Все индуцированные дипольные моменты молекул направлены вдоль линии

$E_0$ , также направлен и вектор поляризации  $P$ .

$$P = \sigma', \quad E' = \frac{\sigma'}{\epsilon_0}, \quad \vec{P} \uparrow \uparrow \vec{E}_0, \quad \vec{E}' \uparrow \downarrow \vec{E}_0 \Rightarrow \vec{P} = -\epsilon_0 \vec{E}'.$$

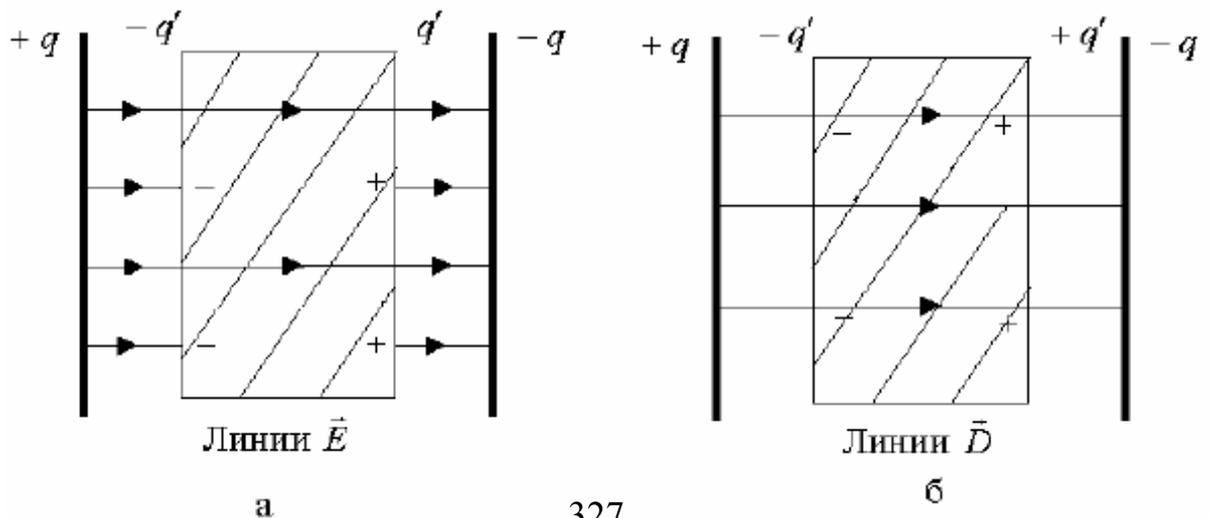
## 5. Полярный диэлектрик во внешнем электрическом поле

В отсутствие электрического поля за счет теплового движения молекул их дипольные моменты  $\mathbf{p}$  разбросаны хаотично по все направлениям, следовательно, диэлектрик не поляризован и вектор поляризации  $\mathbf{P}$  равен нулю:



Во внешнем электрическом поле его силы стремятся установить дипольные моменты молекул вдоль линий  $E_0$ , чему препятствует тепловое движение молекул. За счет действия этих двух факторов наблюдается преимущественная ориентация дипольных моментов молекул вдоль поля. Поэтому за счет поворота молекул диэлектрик поляризуется ( $P > 0$ ), поляризация сопровождается появлением связанных зарядов  $q'$  на противоположных гранях диэлектрика. Все это свидетельствует о том, что поведение такого диэлектрика во внешнем электрическом поле подобно поведению диэлектрика из неполярных молекул, а следовательно, и поведению диполя.

Тот факт, что источником поля вектора  $\mathbf{D}$  являются только свободные заряды приводит к тому, что линии  $\mathbf{D}$  на границе диэлектрика, где появляются связанные заряды  $q'$ , не прерываются. Это является удобным для графического изображения электрического поля в присутствии диэлектрика. На рисунке в качестве примера приведено графическое изображение с помощью линий  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{D}$  электрического поля плоского конденсатора, внутри которого находится прямоугольная пластина из диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ .



6. Поведение линий векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{D}$  на границе раздела двух диэлектриков

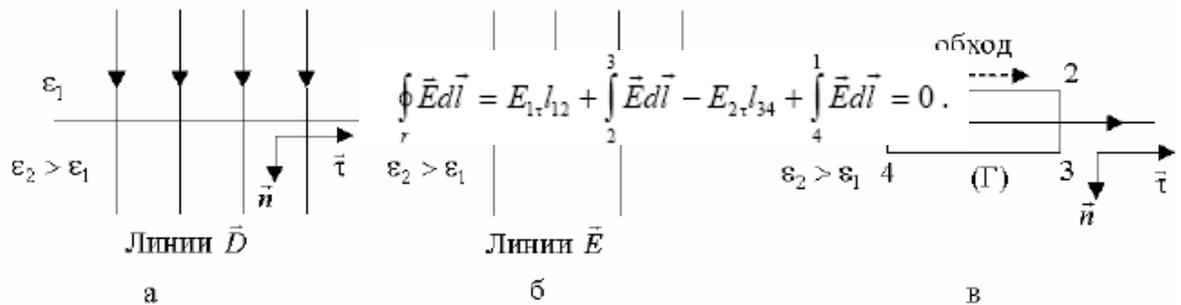
Источником линий  $D$  являются только свободные заряды и поэтому линии  $D$  на границе раздела двух диэлектриков, где находятся связанные заряды, не прерываются. Это означает, что нормальные, перпендикулярные к поверхности раздела составляющие вектора  $D$  не прерываются (рис.а)

$$D_{1n} = D_{2n} ,$$

$$\varepsilon_1 E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n},$$

т.е. составляющие вектора  $E$  терпят разрыв.

Чтобы выяснить поведение тангенциальных (параллельных поверхности раздела) составляющих векторов  $E$  и  $D$ , запишем циркуляцию вектора  $E$  по прямоугольному контуру ( $\Gamma$ )

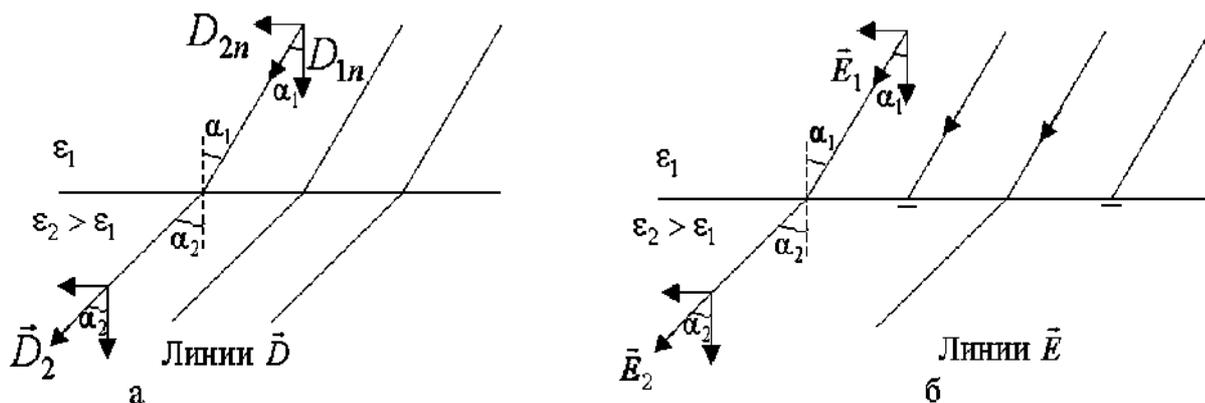


Если взять предел, при котором стороны контура  $l_{23} = l_{41}$  стремятся к нулю, то получим  $E_{1\tau} = E_{2\tau}$  и соответственно:

$$\frac{D_{\tau 1}}{\varepsilon_1} = \frac{D_{\tau 2}}{\varepsilon_2} .$$

Это означает, что тангенциальные составляющие вектора  $\vec{E}$  на границе раздела непрерывны, а для вектора  $D$  они терпят разрыв.

Эти условия позволяют выяснить поведение линий  $E$  и  $D$  при падении их под произвольным углом  $\alpha$  к поверхности раздела двух диэлектриков.



Углы падения  $\alpha_1$  и преломления  $\alpha_2$  для линий E и D можно определить из следующих уравнений:

$$\text{Линии } \vec{D}: \frac{\operatorname{tg}\alpha_2}{\operatorname{tg}\alpha_1} = \frac{D_{2n}}{D_{1n}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}; \quad \text{Линии } \vec{E}: \frac{\operatorname{tg}\alpha_2}{\operatorname{tg}\alpha_1} = \frac{D_{2n}}{D_{1n}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}.$$

Видно, что при одинаковых углах падения  $\alpha_1$  угол преломления  $\alpha_2$  линий  $\vec{E}$  и  $\vec{D}$  будет одинаковым; для изображенного на рис.2.29 случая  $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$  и поэтому  $\alpha_2 > \alpha_1$ .

## 7. Пьезоэлектрики. Сегнетоэлектрики

Диэлектрики в науке и технике используются, прежде всего, как электроизоляционные материалы. Однако имеются и другие разнообразные применения диэлектриков из-за наличия у отдельных их групп необычных свойств.

Нужно отличать пьезоэффект от явления электрострикции, который наблюдается у всех диэлектриков и состоит в изменении размеров диэлектрика под действием внешнего электрического поля. Но в случае электрострикции смена направления внешнего электрического поля не приводит к смене знака его деформации.

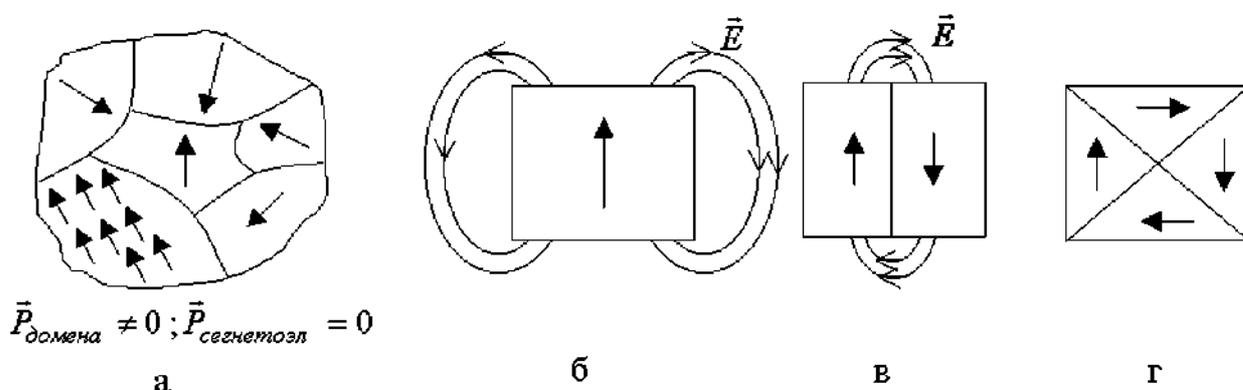
К пьезоэлектрикам относят, например, такие диэлектрики, как кварц, сегетовая соль, титанат бария и т.д., всего известно порядка 1500 пьезоэлектриков. Они нашли широкое применение в электроакустических приборах для преобразования механических (звуковых и ультразвуковых) колебаний в электрические и обратно, в датчиках давления и т.д.

Сегнетоэлектрики. К ним относят пьезоэлектрики, обладающие самопроизвольной (спонтанной) поляризацией в отсутствие внешнего электрического поля. Она может существенно изменяться под влиянием различных внешних факторов. Отметим ряд необычных свойств сегнетоэлектриков.

1. Относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  может достигать нескольких тысяч единиц, тогда как у обычных диэлектриков она достигает несколько сотен единиц.

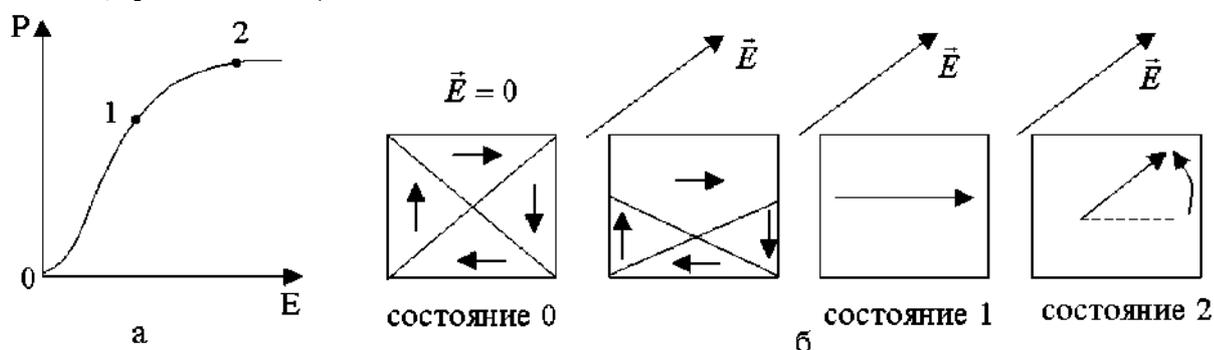
2. Между молекулами устанавливается взаимодействие, которое приводит к параллельной ориентации дипольных моментов молекул в макроскопических областях, называемых доменами. Направление дипольных моментов молекул в разных доменах разное, поэтому в отсутствие электрического поля вектор поляризации сегнетоэлектрика равен нулю.

Размеры доменов устанавливаются за счет действия двух факторов: 1) энергетически выгодно увеличивать число доменов, так как уменьшается энергия для поддержания электрического поля за пределами сегнетоэлектрика; 2) энергетически выгодно уменьшать число доменов из-за того, что уменьшается длина границ между доменами, на которых накапливается энергия электрического поля из-за резкого изменения направления дипольных моментов молекул соседних доменов.



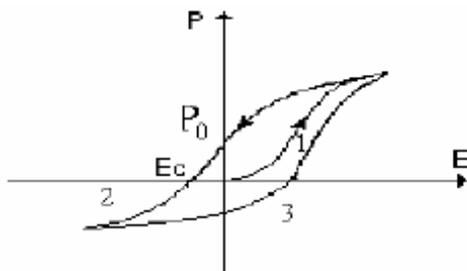
электрического поля является нелинейной и в сравнительно слабых полях достигается насыщение. Это связано с тем, что вдоль поля устанавливаются сразу же все молекулы отдельных доменов.

Поляризация сегнетоэлектрика сопровождается сначала увеличением объемов доменов с выгодной ориентацией дипольных моментов молекул относительно электрического поля (для них угол между векторами  $\vec{p}_m$  и  $\vec{E}$  наименьший, участок 0-1).



В итоге образец становится одно доменным (состояние 1). Затем происходит поворот вектора  $\vec{P}$  и он устанавливается вдоль вектора  $\vec{E}$  электрического поля (процесс вращения) и образец становится поляризованным до насыщения.

4. Для сегнетоэлектриков наблюдается явление *гистерезиса* - явление неоднозначной зависимости вектора поляризации  $P$  от электрического поля  $E$ . Если после достижения состояния насыщения уменьшать модуль вектора  $E$ , то изменение модуля  $P$  будет отставать от изменения модуля  $E$



Значение  $E_c$ , при котором поляризация сегнетоэлектрика исчезает, называют коэрцитивной силой. Если внешнее поле противоположного направления продолжать увеличивать, то через некоторое время наступает насыщение (кривая 2). При циклическом изменении внешнего поля получается замкнутая линия, называемая петлей гистерезиса.

5. Для сегнетоэлектрика существует температура, выше которой он теряет свои необычные свойства и превращается в обычный диэлектрик. Она получила название температуры Кюри  $T_C$ . Для сегнетовой соли, которая дала название этой группе диэлектриков, существует две температуры Кюри  $T_{C1} = -15^\circ\text{C}$  и  $T_{C2} = 22,5^\circ\text{C}$ , выше и ниже этих температур он превращается в обычный диэлектрик.

Высокие значения относительной диэлектрической проницаемости позволяют использовать сегнетоэлектрики в качестве материалов для конденсаторов высокой удельной емкости. Нелинейная зависимость модуля вектора поляризации  $P$  от напряженности  $E$  внешнего поля находит применение при изготовлении нелинейных конденсаторов - варикондах, которые используются в системах автоматического контроля и управления.

## **ТЕМА: Постоянный электрический ток.**

### **1. Сила тока, плотность тока.**

Под электрическим током понимают упорядоченное движение заряженных частиц, причем за направление тока принимают направление движения положительных зарядов.

Электрический ток существует при наличии свободных зарядов и электрического поля. Такие условия можно создать в вакууме и в различных средах, таких как твердые тела (металлы, полупроводники), жидкости (жидкие металлы, электролиты) и в газах. Обычно рассматривают протекание тока в металлических проводниках, где свободными носителями заряда являются электроны.

Протекание тока по проводнику характеризует сила тока  $I$ , определяемая по формуле

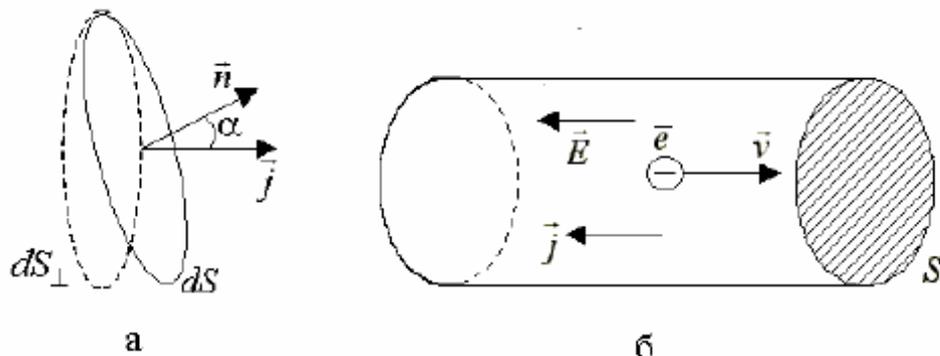
$$I = \frac{dq}{dt},$$

где  $dq$  - заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за время  $dt$ . Сила тока является алгебраической величиной, она может быть как больше, так и меньше нуля.

Распределение тока по сечению проводника характеризует вектор плотности тока  $\vec{j}$ , направление, которого в каждой точке проводника совпадает с направлением тока, т.е. с направлением скорости  $\vec{V}$  упорядоченных положительных зарядов ( $\vec{j} \uparrow \uparrow \vec{V}$ ). Модуль вектора  $\vec{j}$  равен

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS_{\perp}},$$

где  $dI$  - сила тока, протекающего в данной точке внутри проводника через элементарную площадку  $dS$ , расположенную перпендикулярно к направлению тока (рис.а).



Введение вектора плотности тока  $\vec{j}$  позволяет найти силу тока, протекающего через любую поверхность  $S$

$$\vec{I} = \int_S \vec{j} d\vec{S} = \int_S j dS \cos \alpha.$$

Через поперечное сечение проводника площадью  $S$  за время  $t$  пройдут все электроны, находящиеся в цилиндре высотой  $(V_t)$  (рис.б). Если ввести характеристику металла - концентрацию  $n$  свободных электронов, то тогда можно получить:

$$j = \frac{|I|}{S} = \frac{|q|}{St} = \frac{|q_0|N}{St} = \frac{|q_0|nSVt}{St} = |q_0|n\langle v \rangle,$$

$$\vec{j} = q_0 n \langle \vec{v} \rangle$$

где  $q_0$ - это заряд электрона или, в общем случае, свободной заряженной частицы, участвующей в создании электрического тока;  $\langle v \rangle$  - средняя скорость направленного движения заряженной частицы.

В заключение этого параграфа приведем оценку числового значения модуля средней скорости  $\langle v \rangle$ , направленного движения свободных электронов в металле. Учитывая числовые значения концентрации свободных электронов в металле  $n \sim 10^{29} \text{ м}^{-3}$  и предельно допустимую плотность тока в медном проводнике  $j$  пред  $\sim 10^7 \text{ А/м}^2$ , из формулы получим:

$$\langle v \rangle = \frac{j}{|q_0|n} \sim \frac{10^7}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{29}} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м/с.}$$

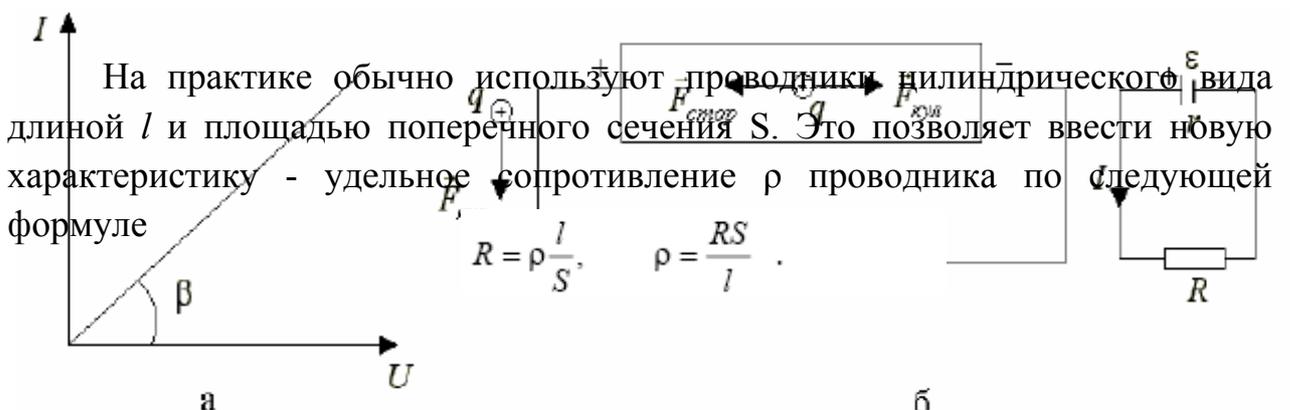
## 2. Закон Ома для однородного участка цепи. Закон Джоуля – Ленца.

Однородным участком электрической цепи называют участок, на котором направленное движение зарядов происходит под действием только кулоновских сил. Для него Г. Ом в 1826 году экспериментально установил следующий закон (закон Ома): сила тока  $I$ , текущего по однородному участку цепи, прямо пропорциональна напряжению  $U$ , приложенному к нему, и обратно пропорциональна сопротивлению  $R$  этого участка цепи

$$I = \frac{U}{R} .$$

Сопротивление  $R$  однородного участка цепи не зависит ни от  $U$ , ни от  $I$ , но определяется геометрическими размерами проводника, его материалом и температурой.

Вольт-амперной характеристикой (ВАХ) однородного участка цепи называют график зависимости силы тока  $I$  от приложенного к нему напряжения (рис.а); он представляет собой прямую линию, угол наклона которой определяет электрическое сопротивление участка  $R = \text{ctg}\beta$  (рис.а).



Удельное сопротивление  $\rho$  проводника зависит только от его материала и температуры. Оно численно равно сопротивлению  $R$  проводника при  $l=1$  м и  $S=1$  м<sup>2</sup>. Для чистых металлических проводников в области комнатных температур удельное сопротивление практически линейно возрастает с повышением температуры, а именно:

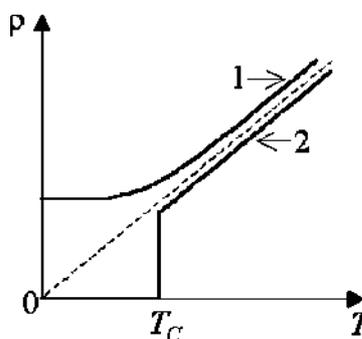
$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t),$$

где  $\rho_0$ - удельное сопротивление проводника при температуре  $t = 0$  С;  $t$  - температура проводника по шкале Цельсия.

Зависимость сопротивления  $R$  металлического проводника также соответствует формуле (3.9), так как размеры проводника ( $l, S$ ) обычно изменяются с температурой значительно слабее, чем удельное сопротивление  $\rho$  проводника:

$$R = R_0(1 + \alpha t) .$$

Для чистых металлов ТКС  $\alpha$  является положительной величиной,



примерно равной  $1/273$  К<sup>-1</sup>. При низких температурах, когда колебания положительных ионов кристаллической решетки не оказывают существенного влияния на движение свободных электронов, удельное сопротивление  $\rho$  не изменяется с температурой, оставаясь постоянной величиной (график 1).

Для многих металлов при определенной температуре  $T_c$  (ее называют температурой перехода в сверхпроводящее состояние,  $T_c \leq 20$ К) сопротивление  $R$  металла обращается в ноль ( $R=0$ ), металл при  $T < T_c$  будет находиться в сверхпроводящем состоянии (график 2).

Для использования в практических целях необычных свойств сверхпроводящего состояния необходимо создавать материалы с высокими значениями температуры  $T_c$  (комнатные температуры и выше). На этом пути в 1968 г. для металлооксидных соединений были получены  $T_c = (70-120)$  К, это открытие получило название явления высокотемпературной сверхпроводимости.

Отметим, что ТКС  $\alpha$  может и уменьшаться с повышением температуры ( $\alpha < 0$ ). Это, например, наблюдается для растворов электролитов и для полупроводников, что связано с увеличением в них концентрации свободных носителей заряда при повышении температуры.

В заключение этого параграфа выведем формулу для расчета количества теплоты  $Q$ , выделяемого в проводнике при протекании по нему электрического тока. Если в магнитном поле проводника с током отсутствует перемещение других тел (заряженных частиц других проводников с током) и

не изменяется химический состав проводника (нет электролиза), то тогда работа сил электрического поля по перемещению заряда в проводнике целиком расходуется на выделение теплоты.

В этом случае количество теплоты  $dQ$ , выделяемое за малый промежуток времени  $dt$ , можно рассчитать таким образом:

$$dQ = dA = dqU = IUdt = \frac{U^2}{R} dt = I^2 R dt.$$

Для конечного промежутка времени в случае переменного тока получим

$$Q = \int_0^t dQ = \int_0^t I^2 R dt,$$

а для постоянного тока ( $I = \text{const}$ )

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

Формула получила название закона Джоуля - Ленца. Он формулируется следующим образом: количество теплоты, выделяемое в проводнике при протекании по нему электрического тока равно произведению квадрата силы тока на сопротивление проводника и на время протекания по нему тока.

### **3. Электродвижущая сила источника тока. Напряжение. Закон Ома для неоднородного участка цепи**

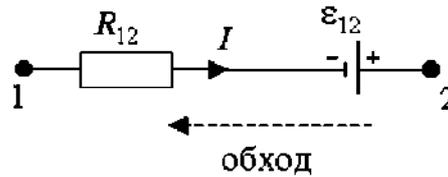
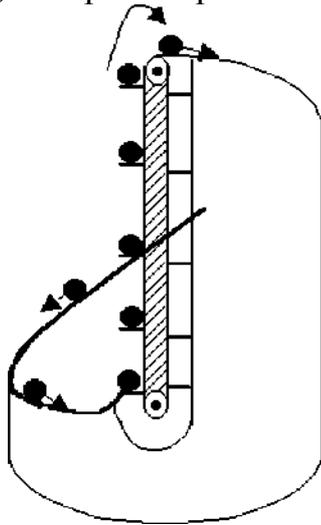
Возьмем замкнутую электрическую цепь, содержащую источник тока, и рассмотрим, как протекает по ней постоянный ток, т.е. как происходит движение положительного заряда (+q) по этой цепи.

Во внешней части цепи сопротивлением  $R$  под действием кулоновских сил заряд (+q) перемещается от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом (заряд скатывается с потенциальной горки). Для дальнейшего движения заряда (внутренняя часть цепи, источник тока) необходимо переместить заряд к точкам с большим потенциалом (поднять заряд на потенциальную горку). Кулоновские силы сделать это не в состоянии, так как они только соединяют разноименные заряды.

Поэтому в источнике тока на заряды, кроме кулоновских сил, должны действовать так же и сторонние силы - это силы не кулоновского происхождения, они совершают работу по разделению разноименных зарядов и переводят заряд (+q) от отрицательного полюса источника тока к его положительному полюсу. Таким образом, завершается полный цикл движения заряда по замкнутой цепи, в ней за счет работы сторонних сил наблюдается постоянное движение заряда, протекает постоянный ток.

Наглядно перемещение заряда по полной цепи демонстрирует ее механическая модель. В ней под действием силы тяжести (аналог кулоновской силы) шарик (положительный заряд) скатывается по цилиндрической поверхности (внешняя часть цепи). Для его дальнейшего движения необходима сторонняя сила (это может быть сила упругости сжатой пружины, механический подъемник и т.д.), которая поднимает шарик на

первоначальную высоту по вертикали (внутренняя часть цепи, источник тока), совершая при этом работу против силы тяжести.



Источник тока можно охарактеризовать сопротивлением  $r$  (сопротивление внутренней части цепи) и электродвижущей силой (ЭДС)  $\varepsilon$  - она определяет работу сторонних сил по перемещению точечного положительного заряда в один кулон от отрицательного полюса к его положительному полюсу

$$\varepsilon = \frac{A_{стор}}{q_+} .$$

Изображение источника тока на схемах приведено на рис.3.3,б. Природа сторонних сил может быть любой, от них требуется лишь способность разделять разноименные заряды. Это могут быть силы трения, силы химических реакций, протекающих в гальванических элементах, силы магнитного поля, силы вихревого электрического поля и т.д.

Нужно отметить, что выделение в электрической цепи отдельного участка, на котором действуют сторонние силы, не всегда возможно, сторонние силы могут действовать во всех участках цепи (например, возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре, находящемся в переменном во времени магнитном поле).

Участок цепи, на котором одновременно действуют и сторонние и кулоновские силы, называют неоднородным участком цепи. Работу кулоновских сил по перемещению электрического заряда на этом участке характеризует разность потенциалов, а сторонних сил - действующая на этом участке цепи ЭДС  $\varepsilon_{12}$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{кул1,2}}{q}, \quad \varepsilon_{12} = \frac{A_{стор1,2}}{q} .$$

Для неоднородного участка цепи вводится новая величина, называемая напряжением  $U_{1,2}$ , она характеризует общую работу сторонних и кулоновских сил на неоднородном участке цепи

$$U_{1,2} = \frac{A_{кул1,2} + A_{стор}}{q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{1,2} .$$

На однородном участке цепи ( $\varepsilon_{12}=0$ ) напряжение равно разности потенциалов  $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ .

По аналогии с электростатическим полем для описания силового действия на помещенные в поле сторонних сил заряды вводят его силовую характеристику, напряженность  $E_{ст}$  поля сторонних сил:

$$\vec{F}_{см} = q\vec{E}_{см}, \quad \vec{E}_{см} = \frac{\vec{F}_{см}}{q}.$$

Тогда формулы можно переписать следующим образом:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{кул1,2}}{q} = \frac{1}{q} \int_1^2 \vec{F}_k d\vec{l}, \quad \varepsilon_{1,2} = \frac{A_{см1,2}}{q} = \frac{1}{q} \int_1^2 \vec{F}_{см} d\vec{l},$$

$$U_{1,2} = \int_1^2 (\vec{E} + \vec{E}_{см}) d\vec{l}.$$

Для ЭДС  $\varepsilon$ , действующей в замкнутой цепи (начальная и конечная точки 1 и 2 совпадают) из данного выражения получим

$$\varepsilon = \oint_r \vec{E}_{см} d\vec{l},$$

т.е. ЭДС  $\varepsilon$  равна циркуляции вектора напряженности  $E_{ст}$  сторонних сил по произвольному замкнутому контуру ( $\Gamma$ ). Это свидетельствует о том, что поле сторонних сил в отличие от электростатического поля не является потенциальным.

Покажем, что и для неоднородного участка цепи также выполняется закон Ома. Для этого используем закон сохранения энергии, а именно: количество теплоты  $dQ_{1,2}$ , выделяемое на неоднородном участке цепи за малый промежуток времени  $dt$ , равно суммарной работе сторонних и кулоновских сил по перемещению зарядов по этому участку цепи

$$dQ_{1,2} = dA_{кул1,2} + dA_{см1,2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I^2 R_{1,2} dt = dq(\varphi_1 - \varphi_2) + dq\varepsilon_{12} = dqU_{12} = IU_{12} dt \Rightarrow U_{12} = IR_{12}.$$

Эта формула представляет собой закон Ома для неоднородного участка цепи. Для участка цепи она примет вид:

$$-IR_{1,2} = (\varphi_{нач} - \varphi_{кон}) - \varepsilon_{1,2},$$

где начальной точкой участка считается точка, с которой начинается обход участка цепи.

#### 4. Правила Кирхгофа

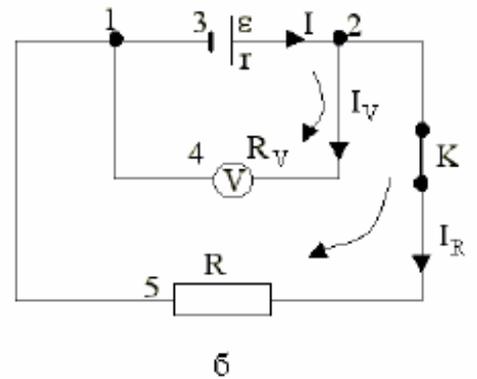
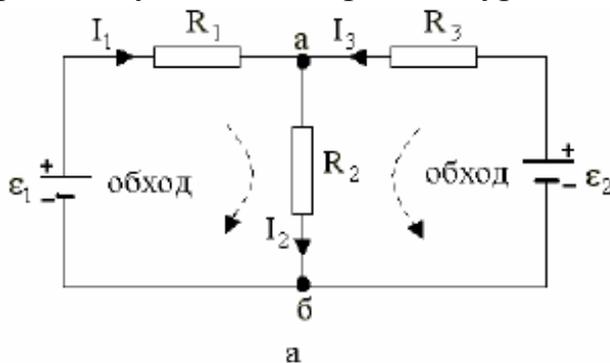
Эти правила были сформулированы Кирхгофом в 1847 году, они используются для расчета разветвленных цепей постоянного и квазистационарного тока - цепей, содержащих несколько замкнутых контуров.

Второе правило Кирхгофа формулируется следующим образом:

алгебраическая сумма падений напряжения на разных участках замкнутой цепи равна алгебраической сумме э.д.с, действующих в этой цепи.

$$\pm \sum_{i=1}^N I_i R_i = \pm \sum_{i=1}^N \varepsilon_i .$$

Число независимых уравнений (ни одно из них не является следствием других), которые можно записать по второму правилу, равно числу замкнутых контуров (цепей), которые нельзя получить наложением одного на другой. Так, для схемы, приведенной на рис.а, число независимых уравнений равно двум, один из трех контуров получается наложением двух других.



Для приведенной на рис.а схемы по второму правилу Кирхгофа можно записать два уравнения

$$\begin{cases} I_1 R_1 + I_2 R_2 = \varepsilon_{1,2} \\ I_2 R_2 + I_3 R_3 = \varepsilon_2 \end{cases}$$

Для формулировки первого правила Кирхгофа введем понятие узла электрической цепи. Узел электрической цепи - это точка цепи, в которой сходятся три или более проводников. Тогда из закона сохранения электрического заряда (он не может накапливаться в какой-либо точке цепи) следует первое правило Кирхгофа

$$\sum I_i = 0 ,$$

согласно которому алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю.

Принято брать силу тока \$I\$ со знаком «+», если ток входит в узел и со знаком минус “-“, если ток выходит из узла. Число независимых уравнений, которые можно записать по этому правилу, равно числу узлов разветвленной цепи минус один.

Система уравнений позволяет провести расчет электрических цепей при различных исходных данных. Для разветвленной цепи, содержащей большое число контуров, для решения системы уравнений необходимо использовать известный в алгебре метод определителей.

## 2. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

### 1. Магнитостатика

В работах Ампера (1820 г.) был экспериментально установлен закон, позволяющий оценить силу взаимодействия двух токов, текущих в малых отрезках проводников. После введения понятия магнитного поля, посредством которого происходит передача взаимодействия токов, законом Ампера стали называть формулу, определяющую силу, с которой магнитное поле действует на элементарный (малых размеров) проводник с током.

В работах Био и Савара (1820 г.) был установлен закон, определяющий силовую характеристику (вектор магнитной индукции  $B$ ) магнитного поля, создаваемого электрическим током. В общем виде этот закон был сформулирован Лапласом и получил название закон Био - Савара - Лапласа.

Отметим, что термин «магнитное поле» был введён Эрстедом (1820 г.) в связи с тем, что возбуждаемое электрическим током поле оказывало ориентирующее действие на магнитную стрелку.

### 2. Магнитное поле движущегося заряда. Сила Лоренца

В соответствии с идеей близкодействия магнитное взаимодействие между зарядами осуществляется посредством магнитного поля. Так, например, можно считать, что заряд  $q_1$  взаимодействует в месте своего расположения с магнитным полем, создаваемым зарядом  $q_2$ . Это приводит к следующей форме записи выражения:

$$\vec{F}_m = \left[ q_1 \vec{v}_1 \times \left\{ \frac{\mu_0 [q_2 \vec{v}_2 \times \vec{r}]}{4\pi r^3} \right\} \right] = [q_1 \vec{v}_1 \times B_{s,2}],$$

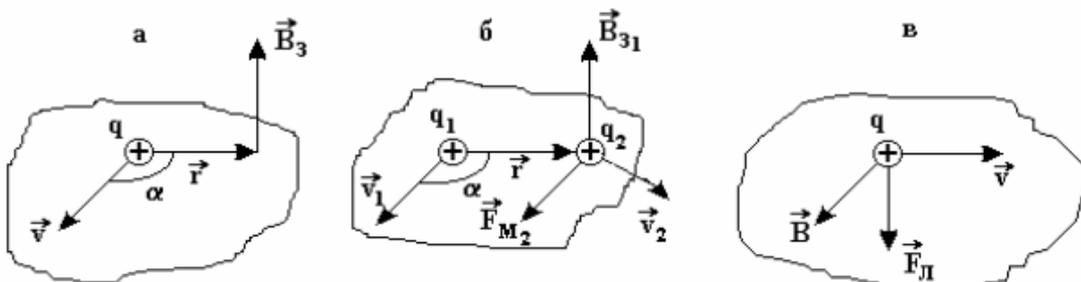
где введена силовая характеристика магнитного поля заряда  $q_2$  - вектор магнитной индукции  $\vec{B}_{32}$ . В общем случае для  $\vec{B}_3$  можно записать:

$$\vec{B}_3 = \frac{\mu\mu_0 [q\vec{v}\times\vec{r}]}{4\pi r^3}, \quad \vec{B}_3 = \frac{\mu\mu_0 |q|v \sin \alpha}{4\pi r^2}, \quad \alpha = (\vec{v}, \vec{r}).$$

Здесь  $\vec{r}$  - вектор, проведенный от заряда  $q$  в рассматриваемую точку пространства.

Для общности выражений в эту формулу и в последующие формулы вводится относительная магнитная проницаемость  $\mu$  среды, которая учитывает изменение магнитного поля в присутствии вещества. Для вакуума  $\mu=1$ .

$$\vec{F}_\pi = q[\vec{v}\times\vec{B}], \quad \vec{F}_\pi = |q|vB \sin \alpha, \quad \alpha = (\vec{v}, \vec{B})$$



Итак, сила Лоренца – сила, действующая со стороны магнитного поля на движущуюся в нем заряженную частицу. Направление силы Лоренца определяется по правилам, отмеченным выше.

### 3. Элемент тока. Закон Био-Савара-Лапласа. Закон Ампера

Элемент тока  $I dl$  - это вектор, направленный в каждой точке проводника с током  $I$  параллельно вектору  $j$  плотности тока и равный по модулю произведению силы тока  $I$  на элемент длины  $dl$  проводника.

Найдем индукцию  $d\mathbf{B}$  магнитного поля, создаваемого элементом тока. При пропускании по проводнику тока  $I$  в элементе длины  $dl$  проводника объемом  $Sdl$  ( $S$  - площадь поперечного сечения проводника,) движутся  $N$  свободных зарядов со скоростью  $v$  направленного движения, каждый из них создает магнитное поле с индукцией  $B_3$ . Учитывая малые размеры элемента длины  $dl$  проводника для  $d\vec{B}$ , можно записать

$$d\vec{B} = N\vec{B}_3 = \frac{\mu\mu_0 [Nq\langle\vec{v}\rangle \times \vec{r}]}{4\pi r^3}.$$

Используя формулы для плотности тока  $j$  и силы тока  $I = jS$ , получим:

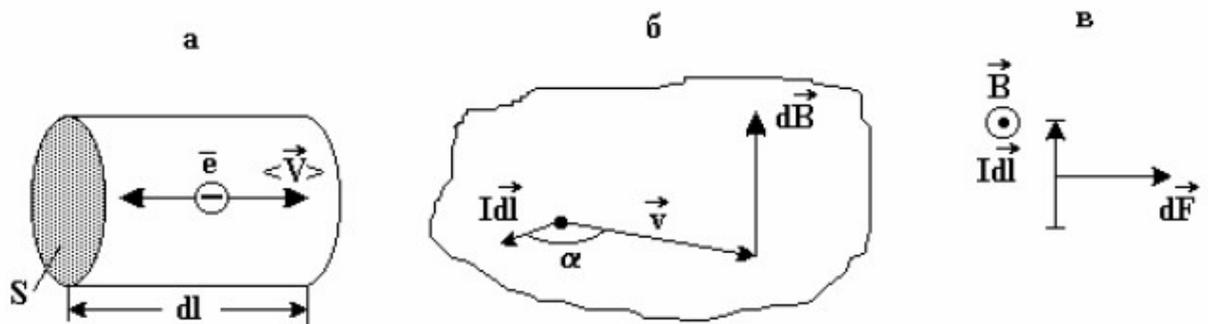
$$Nq\langle\vec{v}\rangle = n \cdot Vq\langle\vec{v}\rangle = qn\langle\vec{v}\rangle Sdl = \vec{j}Sdl = I\vec{dl},$$

что позволяет оценить  $d\vec{B}$  по следующему выражению:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi r^3} [I d\vec{l} \times \vec{r}], \quad d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2}, \quad \alpha = \left( \vec{dl}, \vec{r} \right),$$

где  $\vec{r}$  - вектор, проведенный от элемента тока к рассматриваемой точке пространства.

Формула получила название закона Био - Савара - Лапласа, который определяет индукцию магнитного поля, создаваемого элементом тока.



На него со стороны магнитного поля, можно найти как сумму сил Лоренца  $\vec{F}_L$  действующих на заряды, движущиеся в элементе тока:  $d\vec{F} = N\vec{F}_L$ . Используя методику вывода закона БСЛ, получим

$$d\vec{F} = [Id\vec{l} \times \vec{B}] \quad dF = Idl \sin \alpha, \quad \alpha = \left( \vec{dl}, \vec{B} \right).$$

Формула представляет собой закон Ампера, определяющий силу, которая действует на элемент тока со стороны магнитного поля. Направление силы  $d\vec{F}$  удобно определять по правилу левой руки.

#### 4. Применение закона БСЛ к расчету магнитных полей различных проводников с током

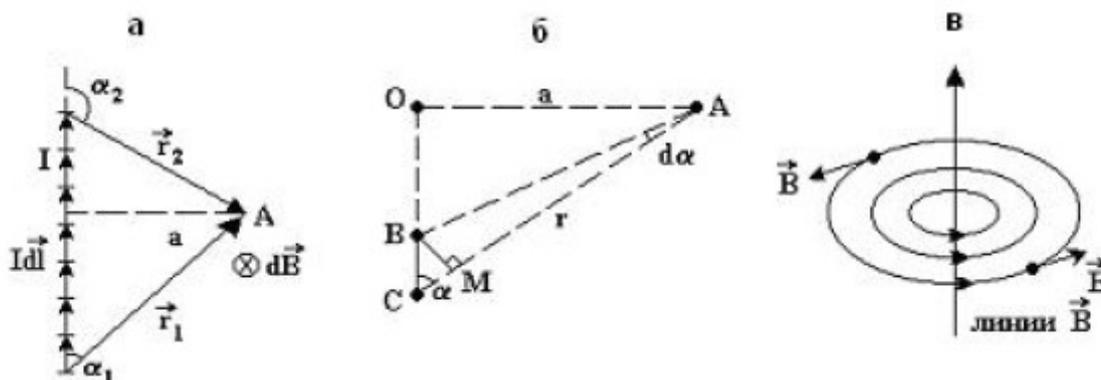
Для расчета индукции магнитного поля проводника с током нужно разбить его на отдельные элементы тока (представить его как систему (набор) элементов тока), по закону БСЛ найти вектора индукции магнитного поля от каждого элемента тока в рассматриваемой точке и затем суммировать их по правилу сложения векторов:

$$\vec{B} = \int d\vec{B} = \int \frac{\mu\mu_0 [I d\vec{l} \times \vec{r}]}{4\pi r^3}.$$

Прежде чем перейти к конкретным примерам расчета магнитных полей, отметим, что для графического изображения магнитных полей используются линии вектора магнитной индукции (линии  $\mathbf{B}$ ), которые проводятся так, чтобы в каждой точке линии вектор  $\mathbf{B}$  был направлен по касательной к ним.

Из опыта известно, что в природе не существует магнитных зарядов, поэтому линии  $\mathbf{B}$  являются замкнутыми. В ряде случаев направление вектора  $\mathbf{B}$  в данной точке поля удобно определять, предварительно проведя через данную точку линию вектора  $\mathbf{B}$ .

Пример 1. Магнитное поле прямолинейного проводника конечной длины с током  $I$ . Рассчитаем индукцию магнитного поля прямолинейного проводника конечной длины с током  $I$  в точке  $A$ .



Из рис.а видно, что все вектора  $d\mathbf{B}$  направлены перпендикулярно плоскости чертежа от нас, следовательно, также направлен и вектор  $\mathbf{B}$  суммарного поля. Тогда формула для модуля вектора  $\mathbf{B}$  запишется так:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{dl \sin \alpha}{r^2}.$$

Для того, чтобы взять такой интеграл, необходимо рассмотреть чертеж, приведенный на рис.б, где приведен произвольный элемент длины  $dl$  проводника. Из рис.б следует

$$\Delta OAC \sim \Delta BCM : \frac{OA}{AC} = \frac{BM}{BC}; \frac{a}{r} = \frac{rd\alpha}{dl}; \frac{dl}{r^2} = \frac{d\alpha}{a}.$$

Подставляя полученное соотношение в интеграл, получим

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi a} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha d\alpha = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2).$$

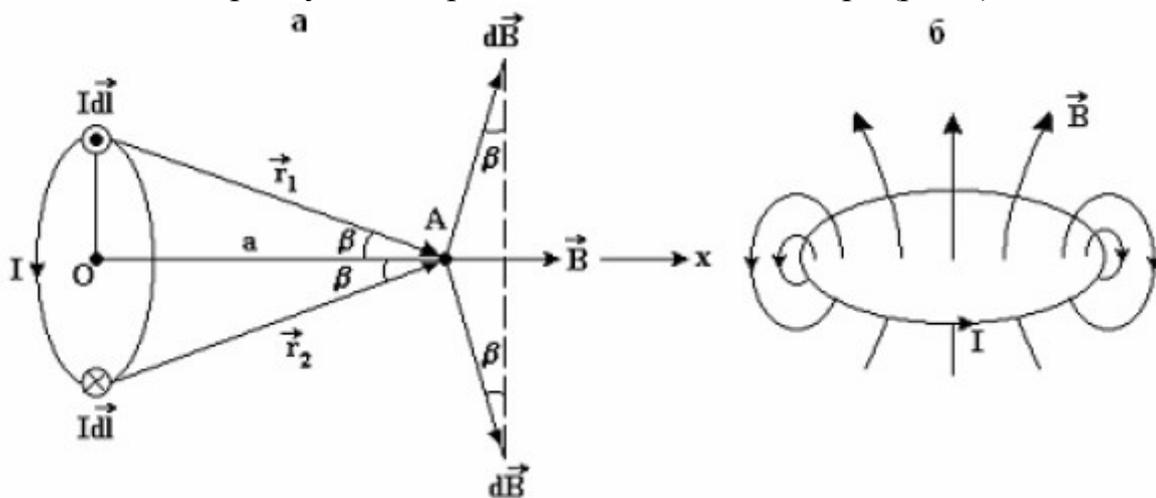
Направление вектора  $\mathbf{B}$  можно определить, предварительно проведя силовые линии прямого проводника с током - это окружности, охватывающие проводник и лежащие в плоскости, перпендикулярной к нему; направление линий  $\mathbf{B}$  связано правилом правого буравчика с направлением тока в проводнике. Тогда вектор  $\mathbf{B}$  в каждой точке линии будет направлен по касательной к ней (рис.в).

В частном случае бесконечно длинного проводника с током получим:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi a} = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r}.$$

### Пример 2. Магнитное поле на оси кольцевого тока

Рассчитаем индукцию магнитного поля в точке А, находящейся на оси кольцевого тока  $I$  радиуса  $R$  на расстоянии  $a$  от его центра (рис.а).



На рисунке указаны вектора  $d\mathbf{B}$ , созданные верхним и нижним элементами тока в точке А. Они образуют угол  $\beta$  с вертикальным направлением. Вектора  $d\mathbf{B}$ , созданные всеми элементами тока, образуют конус векторов  $d\mathbf{B}$ , и из соображений симметрии следует, что суммарный вектор  $\mathbf{B}$  в точке А будет направлен по оси кольца. Проектируя уравнение на ось  $Ox$ , получим

$$B = \int dB \sin \beta = \int \frac{\mu\mu_0 Idl \sin 90^\circ}{4\pi r^2} = \frac{\mu\mu_0 I \sin \beta 2\pi R}{4\pi r^2} = \frac{\mu\mu_0 IR^2}{2(R^2 + a^2)^{3/2}}.$$

Для центра кольцевого тока (точка О)  $a=0$ , и поэтому

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

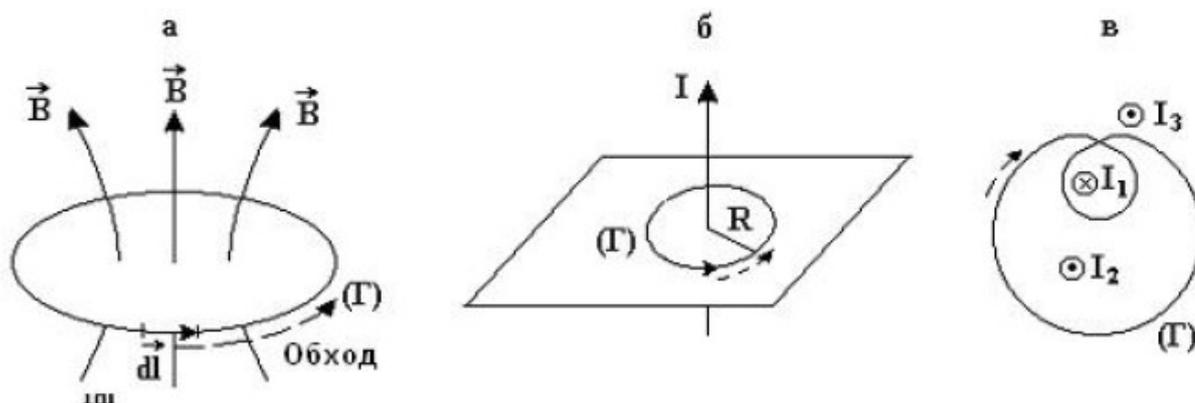
Линии  $\mathbf{B}$  кольцевого тока представляют собой окружности, перпендикулярные плоскости кольца, их направление связано правилом правого буравчика с направлением тока (рис.б).

### 5. Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции $\mathbf{B}$ .

Возьмем в магнитном поле воображаемую замкнутую линию - контур  $\Gamma$ . Введем вектор  $d\vec{l}$  - по модулю он равен элементу длины  $dl$  контура, в каждой точке контура он направлен по касательной в направлении обхода контура.

Интеграл вида 
$$\oint_{(\Gamma)} \vec{B} d\vec{l} = \oint_{(\Gamma)} B dl \cos \alpha, \quad \alpha = \left( \vec{B}, d\vec{l} \right),$$

получил название циркуляции вектора  $\mathbf{B}$  по замкнутому контуру ( $\Gamma$ ).



Можно доказать теорему о циркуляции вектора  $\mathbf{B}$ , которая для случая вакуума читается следующим образом: циркуляция вектора  $\mathbf{B}$  по произвольному замкнутому контуру ( $\Gamma$ ) равна алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром, умноженной на  $\mu_0$ :

$$\oint_{(\Gamma)} B dl \cos \alpha = \mu_0 \sum_i I_i.$$

Знак силы тока  $I$  в формуле выбирается следующим образом: если направление тока связано с направлением обхода контура правилом правого буравчика, то выбирается знак плюс; если нет - знак минус.

Проверим теорему на примере прямолинейного проводника бесконечной длины с током  $I$ . Возьмем контур ( $\Gamma$ ), совпадающий с линией  $\mathbf{B}$  радиуса  $R$ , а

направление обхода контура выберем против часовой стрелки, т.е. по направлению линии  $\mathbf{B}$ . Тогда:

$$\oint_{(\varepsilon)} B dl \cos \alpha = \oint_{(\varepsilon)} \frac{\mu \mu_0 I}{2\pi R} dl \cdot \cos 0 = \frac{\mu \mu_0 I}{2\pi R} \oint_{(\varepsilon)} dl = \frac{\mu \mu_0 I}{2\pi R} \cdot 2\pi R = \mu \mu_0 I,$$

что и требовалось показать.

В присутствии вещества в правую часть теоремы о циркуляции вектора  $\mathbf{B}$  необходимо ввести микротоки  $I_{\text{микро}}$ , охватываемые контуром ( $\Gamma$ ),

$$\oint_{(\Gamma)} B dl \cos \alpha = \mu_0 \left( \sum_i I_i + I_{\text{микро}} \right).$$

Под микротоками или молекулярными токами понимают токи, вызванные движением электронов в атомах, ионах и молекулах. Эти токи создают магнитное поле вещества, помещенного во внешнее магнитное поле.

Физический смысл теоремы о циркуляции вектора  $\mathbf{B}$ , а именно источником вектора  $\mathbf{B}$  являются токи проводимости и микротоки.

В случае изотропного вещества формулу можно упростить, учитывая магнитное поле вещества введением магнитной проницаемости  $\mu$ :

$$\oint_{(\Gamma)} B dl \cos \alpha = \mu \mu_0 \sum_i I_i.$$

В таком виде теорема о циркуляции вектора  $\mathbf{B}$  используется при решении многих задач магнитостатики как в вакууме, так и в присутствии вещества.

## **6. Применение теоремы о циркуляции вектора $\mathbf{B}$ к расчету магнитных полей проводников с током**

Теорема о циркуляции вектора  $\mathbf{B}$  позволяет рассчитать модуль вектора  $\mathbf{B}$  в случаях определенной симметрии магнитного поля, т.е. когда известно направление вектора  $\mathbf{B}$  в каждой точке поля. Отметим следующие этапы применения теоремы: 1) из симметрии задачи сначала определяем направление вектора  $\mathbf{B}$  в любой точке поля. Если этого сделать нельзя, то для расчета поля (направления и модуля вектора  $\mathbf{B}$ ) необходимо использовать закон БСЛ и принцип суперпозиции для магнитных полей; 2) выбираем контур ( $\Gamma$ ) и рассчитываем циркуляцию вектора  $\mathbf{B}$  согласно ее определению; 3) рассчитываем сумму токов, охватываемых контуром; 4) применяем теорему для расчета модуля вектора  $\mathbf{B}$ .

Рассмотрим три примера расчета магнитного поля на основе теоремы о циркуляции вектора  $\mathbf{B}$ .

Пример 1. Магнитное поле бесконечно длинного соленоида.

Соленоид представляет собой проводник, навитый на цилиндрический каркас.

1-й этап. Из симметрии задачи следует, что магнитное поле существует только внутри соленоида. Оно является однородным, линии  $\mathbf{B}$  связаны с направлением тока в соленоиде правилом правого буравчика

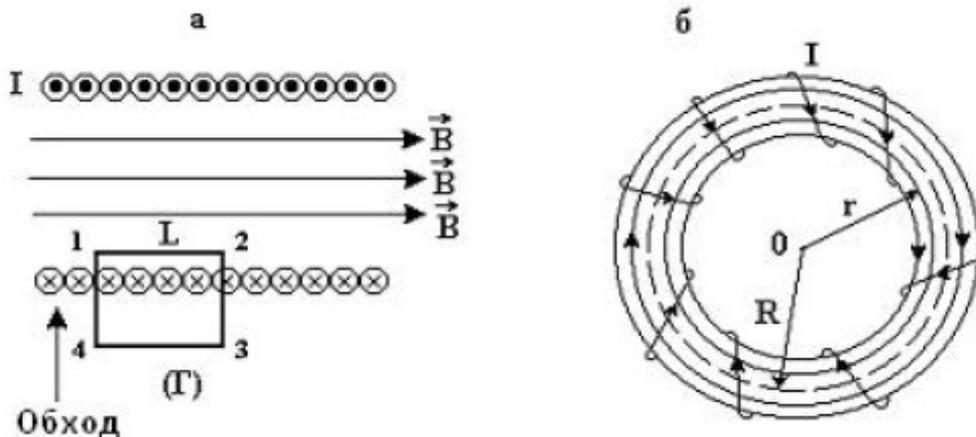


Рис. 3.7

2-й этап. Выбираем контур  $(\Gamma)$  в виде прямоугольника 1-2-3-4-1, одна из сторон которого параллельна оси соленоида и располагается внутри него. Рассчитаем циркуляцию вектора  $\mathbf{B}$  по этому контуру  $(\Gamma)$ :

$$\int_{(\Gamma)} Bdl \cos \alpha = \int_1^2 Bdl \cos 0^\circ + \int_2^3 Bdl \cos 90^\circ + \int_3^4 Bdl \cos \alpha + \int_4^1 Bdl \cos 90^\circ = B \int_1^2 dl = B \cdot l,$$

где  $l$  - длина стороны 1-2 контура; на сторонах контура 2-3, 3-4 и 4-1 интеграл обращается в ноль, так как внутри соленоида  $\alpha = 90^\circ$ , а за его пределами  $B=0$ .

3-й этап. Рассчитаем сумму токов, охватываемых контуром:

$$\sum I_i = N \cdot I,$$

где  $N$  - число витков на стороне контура 1-2. Выбираем знак плюс, так как направление тока и обхода контура связаны правилом правого буравчика.

4-й этап. Найдем модуль вектора  $\mathbf{B}$ :

$$B \cdot l = \mu \mu_0 N I,$$

$$B = \mu\mu_0 nI,$$

где  $n = N/l$  - число витков на единицу длины соленоида.

Полученная формула применима также и для расчета модуля  $\mathbf{B}$  магнитного поля внутри длинного соленоида - соленоида, у которого длина значительно превышает диаметр  $D$  витков ( $l \gg D$ ).

Пример 2. Магнитное поле тороида.

Тороид представляет собой проводник, навитый на каркас в виде тора

1-й этап. Из симметрии задачи следует, что магнитное поле существует только внутри тороида. Линии вектора  $\mathbf{B}$  представляют собой окружности с центром в точке  $O$ , их направление связано с направлением тока в тороиде правилом правого буравчика. Вектор  $\mathbf{B}$  направлен по касательной к линиям  $\mathbf{B}$ .

2-й этап. Выбираем контур ( $\Gamma$ ) совпадающим с линией  $\mathbf{B}$  радиуса  $r$ , направление обхода контура возьмем по часовой стрелке. Рассчитаем циркуляцию вектора  $\mathbf{B}$  по этому контуру ( $\Gamma$ ):

$$\oint_{(\Gamma)} B dl \cos \alpha = B \oint_{(\Gamma)} dl \cos 0 = B \cdot 2\pi r.$$

3-й этап. Рассчитаем сумму токов, охватываемых контуром ( $\Gamma$ ):

$$\sum I_i = N \cdot I,$$

где  $N$  - число витков тороида.

4-й этап. Найдем модуль вектора  $\mathbf{B}$ :

$$B \cdot 2\pi r = \mu\mu_0 NI, \quad B = \mu\mu_0 nI \cdot R/r,$$

где  $n = N/(2\pi R)$  - число витков, приходящихся на единицу длины тороида;  $R$  - радиус окружности, проходящей через центры витков тороида.

Если диаметр  $D$  витков тороида значительно меньше  $R$  ( $D \ll R$ ), тогда можно считать, что  $r \approx R$ , и записать

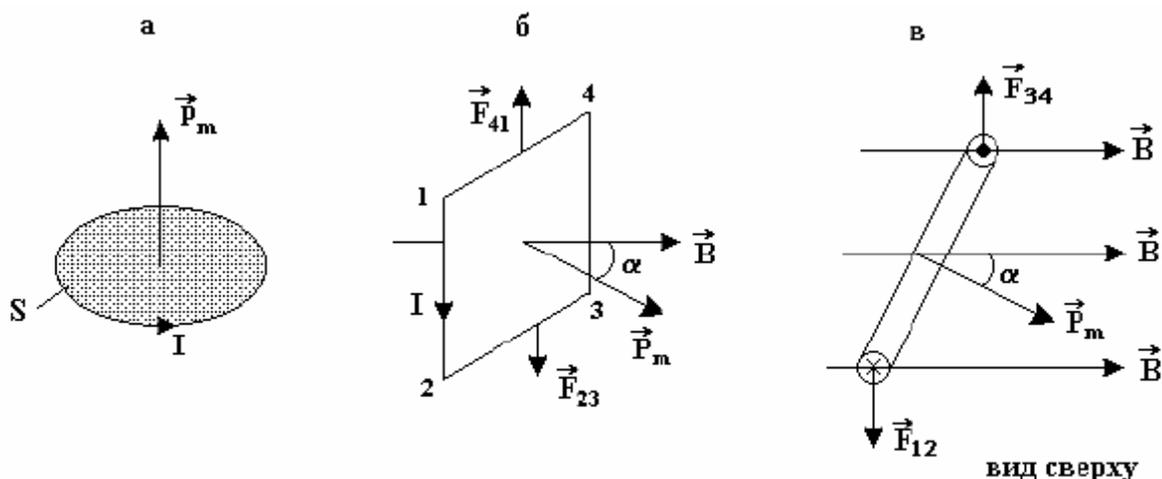
$$B = \mu\mu_0 nI.$$

## 7. Магнитный поток. Теорема Гаусса для вектора $\mathbf{B}$ . Работа по перемещению проводника и контура с током в магнитном поле.

Элементарным магнитным потоком  $d\Phi$  через элементарную площадку  $dS$  называется скалярная физическая величина, равная

$$d\Phi = \vec{B} d\vec{S} = B dS \cos \alpha, \quad \alpha = (\vec{B}, \vec{n}),$$

где  $\alpha$  - угол между вектором  $\mathbf{B}$  и вектором  $\vec{n}$  нормали к площадке  $dS$



Магнитный поток  $\Phi$  через поверхность  $S$  равен сумме элементарных магнитных потоков  $d\Phi$  :

$$\Phi = \int d\Phi = \int_S B dS \cos \alpha .$$

Линии  $\mathbf{B}$  проводятся так, чтобы их густота определяла модуль вектора  $\mathbf{B}$  в данной точке поля. Поэтому согласно формуле магнитный поток  $\Phi$  будет пропорционален количеству линий  $\mathbf{B}$ , пронизывающих поверхность  $S$ .

Как уже отмечалось, в природе не существует магнитных зарядов, т.е. линии  $\mathbf{B}$  являются замкнутыми, и поэтому теорема Гаусса в интегральной и дифференциальной формах для вектора магнитной индукции  $\mathbf{B}$  запишется следующим образом:

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} \cos \alpha = 0, \quad \text{div} \vec{B} = \nabla \vec{B} = 0 .$$

Физический смысл теоремы Гаусса для вектора  $\mathbf{B}$  заключается в следующем: в природе нет магнитных зарядов, и поэтому линии  $\mathbf{B}$  являются замкнутыми.

### 8. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях.

Со стороны магнитного поля на движущуюся в нем заряженную частицу действует сила Лоренца:

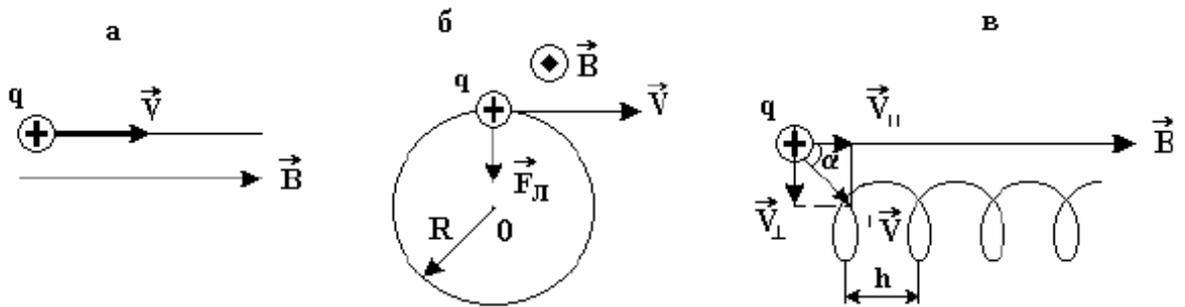
$$\vec{F}_L = q [\vec{v} \times \vec{B}], \quad F_L = |q| v B \sin \alpha, \quad \alpha = \left( \vec{v}, \vec{B} \right).$$

Мощность силы Лоренца в произвольный момент времени равна нулю, так как угол между  $\vec{F}_L$  и  $\vec{v}$  равен  $90^\circ$  ( $N = F_L v \cos 90^\circ = 0$ ), и поэтому сила Лоренца

работы не совершает. Это означает, что в магнитном поле модуль скорости частицы и ее кинетическая энергия остаются постоянными, изменяется только направление скорости движения частицы.

Рассмотрим частные случаи движения частицы в однородном магнитном поле:

а)  $\alpha = 0^\circ$ . В этом случае ( $F_{\perp} = 0$ ), частица движется прямолинейно вдоль линий вектора  $\mathbf{B}$  (рис.а);



б)  $\alpha = 90^\circ$ . Частица движется в магнитном поле перпендикулярно линиям вектора  $\mathbf{B}$ . Траектория движения частицы - окружность радиуса  $R$  (рис.б). Используя второй закон Ньютона, для радиуса  $R$  и периода  $T$  обращения частицы можно получить

$$F_{\perp} = ma : |q|vB = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow$$

$$R = \frac{mv}{|q|B}, \quad T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{|q|B};$$

в)  $\alpha$  - произвольный угол. Траекторию движения частицы - винтовую линию (рис.в) можно представить как сумму двух видов движения - прямолинейного вдоль линий  $\mathbf{B}$  ( $\alpha = 0^\circ$ ) и движения по окружности в плоскости, перпендикулярной вектору  $\mathbf{B}$  ( $\alpha = 90^\circ$ ).

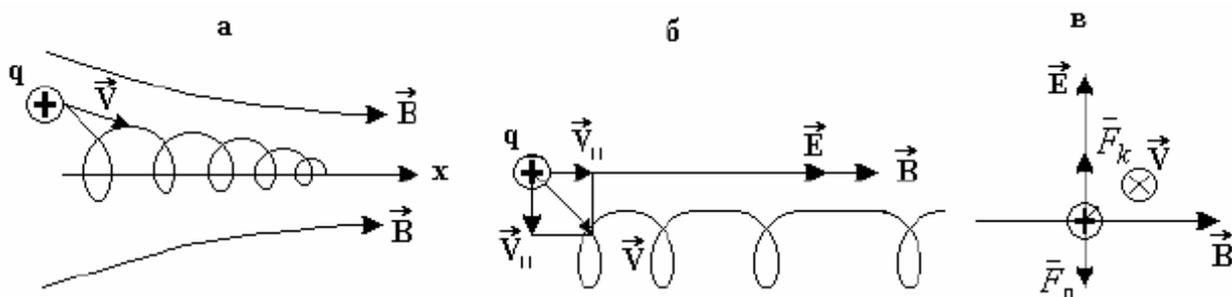
Для параметров винтовой линии - радиуса  $R$  окружности, периода  $T$  обращения и шага  $h$  винтовой линии (рис.в) можно записать

$$R = \frac{mv_{\perp}}{|q|B}; \quad T = \frac{2\pi m}{|q|B}, \quad h = v_{\parallel} \cdot T, \quad v_{\parallel} = v \cos \alpha, \quad v_{\perp} = v \sin \alpha.$$

В неоднородном магнитном поле частица в общем случае будет двигаться по винтовой линии, радиус и шаг которой будут изменяться, т.е. по спирали.

В совмещенных в пространстве электрическом и магнитном полях на частицу, кроме силы Лоренца, будет также действовать кулоновская сила

$$\vec{F} = \vec{F}_k + \vec{F}_l = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}].$$



В случае скрещенных под прямым углом однородных электрическом и магнитном полях (рис.в), прямолинейное движение частицы возможно, когда вектор  $\vec{v}$  будет направлен от нас в плоскость рисунка, а его модуль равен

$$F_l = F_k: |q|vB = |q|E \Rightarrow v = E/B.$$

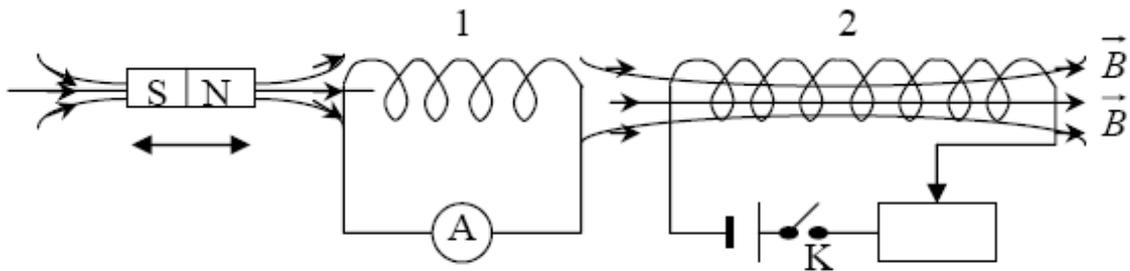
## **ТЕМА: Электромагнитные явления.**

### **1. Опыты Фарадея. Явление электромагнитной индукции**

В 1831 году после десяти лет упорной работы опытным путём М.Фарадею удалось «превратить магнетизм в электричество», т.е. показать, что не только электрический ток создает в окружающем пространстве магнитное поле, но и магнитное поле способно порождать в замкнутом проводящем контуре электрический ток, получивший название индукционного тока.

Столь большой срок открытия связан с тем, что существовала неэквивалентность взаимосвязи электрических и магнитных явлений, а именно постоянный электрический ток порождает в окружающем пространстве постоянное магнитное поле, а для возникновения в замкнутом проводящем контуре постоянного индукционного тока необходимо было вызвать изменение магнитного потока  $\Phi$ .

В опытах Фарадея пронизывающий первый контур (катушку 1) магнитный поток изменялся различными способами: 1) замыкалась и размыкалась цепь второго контура; 2) с помощью реостата изменялась сила тока во втором контуре; 3) второй контур приближался или удалялся относительно первого контура; 4) постоянный магнит приближался или удалялся относительно первого контура; 5) движение совершал контур 1 относительно магнита и контура 2, по которому протекал постоянный ток, и т.д.



Во всех этих опытах переменный магнитный поток, пронизывающий первый контур, приводил к возникновению в нём ЭДС. индукции  $\varepsilon_i$  и индукционного тока  $I_i$ , который фиксировался амперметром. Причём индукционный ток изменял своё направление при смене направления движения магнита, направления движения контуров 1 и 2, при замене нарастающего тока в контуре 2 убывающим со временем током, при замене замыкания цепи второго контура её размыканием.

В итоге Фарадей показал, что сила индукционного тока  $I_i$  и ЭДС индукции  $\varepsilon_i$  зависят от скорости изменения магнитного потока, пронизывающего проводящий контур, и не зависят от способа изменения магнитного потока  $\Phi$ .

## **2. Закон электромагнитной индукции Фарадея.**

Природа сторонних сил. Первое уравнение Максвелла в интегральной форме

На основе проделанных опытов Фарадей сформулировал закон электромагнитной индукции, который гласит: при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего проводящий контур, в нём возникает ЭДС индукции  $\varepsilon_i$ , равная скорости изменения магнитного потока, взятой с обратным знаком.

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad \Phi = \int_S B ds \cos\alpha,$$

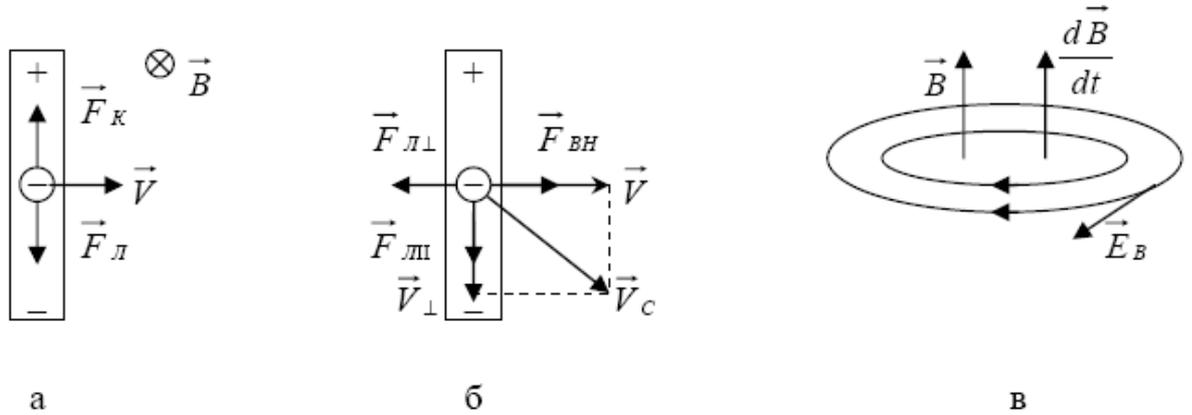
где  $\Phi$  - магнитный поток, пронизывающий любую поверхность  $S$ , опирающуюся на проводящий контур.

Изменение со временем магнитного потока  $\Phi$  может происходить либо за счёт изменения угла  $\alpha$  (вращения контура в магнитном поле), либо изменения площади  $S$  контура, либо изменения со временем магнитного поля, в котором находится контур. Во всех этих случаях в контуре возникает ЭДС индукции  $\varepsilon_i$ , т.е. возникают сторонние силы, совершающие работу по разделению разноимённых электрических зарядов.

Природа сторонних сил может быть разной.

Случай 1. Вектор  $\mathbf{B}$  не зависит от времени, а площадь  $S$  контура и угол  $\alpha$  изменяются. В постоянном во времени магнитном поле возникновение ЭДС

индукции  $\varepsilon_i$  в проводящем контуре (он вращается, или изменяется его площадь) или в движущемся проводнике (изменяется площадь поверхности, описываемая проводником) обусловлена действием на свободные заряды силы Лоренца. Действительно, как видно из рис. а, сила Лоренца вызывает движение электронов к одному концу проводника, на нём возникает избыток электронов, а на другом



конце их недостаток. Следовательно, сила Лоренца разделяет разноимённые заряды, т.е. является сторонней силой:  $\vec{F}_L = \vec{F}_{стор}$ .

Случай 2. Вектор  $\mathbf{B}$  изменяется со временем, а площадь  $S$  контура и угол  $\alpha$  остаются постоянными. Опытным путём было доказано, что ЭДС индукции  $\varepsilon_i$  может возникать и в неподвижном проводящем контуре (проводнике), находящемся в переменном во времени магнитном поле. В этом случае на свободные заряды в проводнике сила Лоренца не действует ( $v = 0 \Rightarrow F_L = |q|vB \sin \alpha = 0$ ) и для объяснения возникновения ЭДС индукции  $\varepsilon_i$  Максвелл сформулировал следующее положение (постулат), которое называют первым положением теории Максвелла: переменное во времени магнитное поле порождает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле. Таким образом, Максвелл ввел новый вид поля - вихревое электрическое поле.

В отличие от электростатического поля линии вихревого электрического поля являются замкнутыми, они связаны с направлением вектора  $d\mathbf{B}/dt$  правилом левого буравчика и лежат в плоскости, перпендикулярной к вектору  $\mathbf{B}$ . Силы этого поля являются сторонними силами, они совершают работу по разделению разноимённых зарядов

$$\hat{A}_{стор} = \oint_{\Gamma} \vec{F}_{стор} d\vec{l} = q \oint_{\Gamma} \vec{E}_{вихр} d\vec{l} ;$$

$$\varepsilon_i = \frac{A_{стор}}{q} = \oint_{\Gamma} \vec{E}_{вихр} d\vec{l} ,$$

где  $\vec{E}_{\text{вихр}}$  - вектор напряжённости электрического поля, а контур (Г) (воображаемая линия) находится внутри проводящего контура (проводника).

Запишем уравнение, отражающее первое положение теории Максвелла. С этой целью обобщим закон электромагнитной индукции Фарадея, т.е. введем в уравнение закона предложенный Максвеллом источник сторонней силы - вихревое электрическое поле, которое, как уже было отмечено выше, возникает при наличии в пространстве переменного во времени магнитного поля.

Для установления взаимосвязи между электрическим и магнитным полями проводящий контур (проводник) не нужен, он является прибором, который обнаруживает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле. Выберем в качестве контура (Г) воображаемую замкнутую линию. Тогда можно записать

$$\oint_{(\Gamma)} \vec{E} d\vec{l} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{s},$$

В формуле берётся частная производная от вектора  $\mathbf{B}$  по времени  $t$ , при этом считается, что контур (Г) и опирающаяся на него поверхность  $s$  неподвижны. Также при записи было учтено, что циркуляция вектора напряжённости электростатического поля по замкнутому контуру (Г) равна нулю.

Уравнение представляет собой первое уравнение Максвелла в интегральной форме. Оно читается следующим образом: циркуляция вектора  $\mathbf{E}$  суммарного электрического поля по произвольному замкнутому контуру (Г) равна взятой с обратным знаком скорости изменения магнитного потока через поверхность  $s$ , опирающуюся на контур.

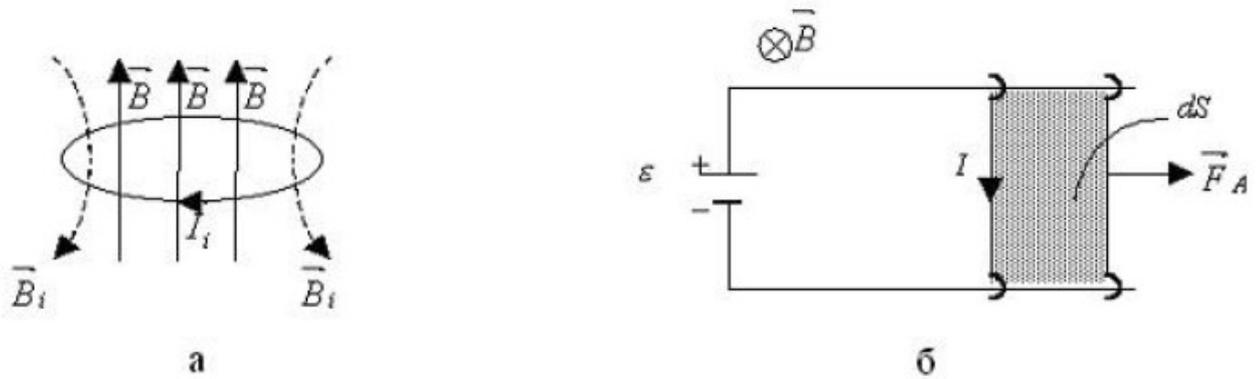
Физический смысл данного уравнения состоит в следующем: источником вихревого электрического поля является переменное магнитное поле (в правой части находится источник того, что стоит в левой части уравнения).

### **3. Правило Ленца.**

Наличие ЭДС индукции  $\varepsilon_i$  в проводящем контуре сопротивлением  $R$  приводит к возникновению в нем индукционного тока, который можно рассчитать по закону Ома для полной цепи

$$I_i = \varepsilon_i / R.$$

Направление же индукционного тока можно найти по правилу Ленца. Оно формулируется следующим образом: индукционный ток в контуре возникает такого направления, чтобы создаваемое им магнитное поле препятствовало любым изменениям магнитного потока, вызвавшего этот индукционный ток.

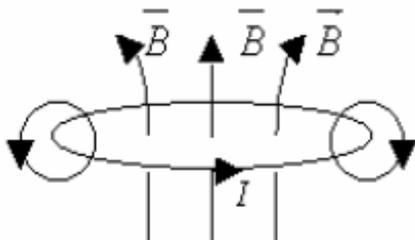


Если внешнее магнитное поле будет убывать со временем, то число линий  $\mathbf{B}$ , пронизывающих плоскость контура, будет также убывать ( $\Delta\Phi < 0$ ) и, следовательно, линии  $\mathbf{B}_i$  индукционного тока будут направлены в ту же сторону, что и линии  $\mathbf{B}$ , и индукционный ток будет направлен против часовой стрелки.

Покажем, что экспериментально установленный Фарадеем закон ЭМИ является следствием закона сохранения энергии. Для этого рассмотрим замкнутый контур, в который входит источник тока с ЭДС  $\epsilon$  и подвижный проводник-перемычка, скользящий без трения по направляющим стержням. Контур находится в магнитном поле, линии  $\mathbf{B}$  которого перпендикулярны к его плоскости.

#### 4. Явление самоиндукции. Индуктивность контура. Индуктивность соленоида

Возьмём контур, по которому протекает ток  $I$ . Он создаёт в окружающем пространстве магнитное поле, линии которого пронизывают плоскость контура. Возникающий при этом магнитный поток получил название магнитного потока самоиндукции  $\mathcal{I}_s$ , так как сам ток наводит, индуцирует этот магнитный поток.



Под явлением самоиндукции можно понимать явление возникновения магнитного потока самоиндукции при протекании по цепи тока. В случае, когда

контур содержит  $N$  витков, используют понятие потокосцепления  $\Psi_s$  самоиндукции ( $\Psi_s = N\Phi_s$ ).

Оказывается, что  $\Psi_s$  и  $I$  прямо пропорциональны друг другу, и поэтому можно записать

$$\Psi_s = LI ,$$

где коэффициент пропорциональности  $L$  называют индуктивностью контура.

Он описывает способность контура создавать потокосцепление самоиндукции и равен отношению  $\Psi_s$  и  $I$ :

$$L = \frac{\Psi_s}{I} .$$

Индуктивность контура зависит от геометрических размеров контура, через относительную магнитную проницаемость  $\mu$  и от магнитных свойств окружающей среды. Для ферромагнитных сред  $\mu$  зависит от силы текущего по проводнику тока, что приводит к зависимости для таких сред  $L$  от  $I$ .

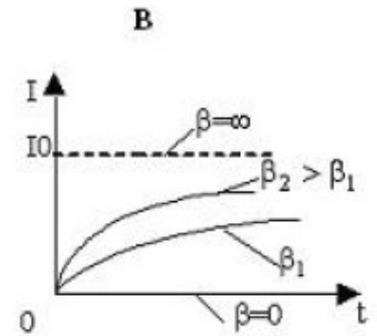
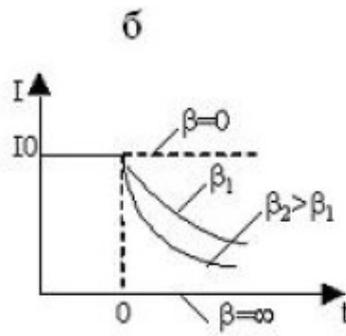
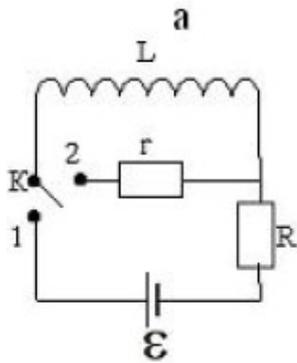
Приведем примеры расчета индуктивности для различных контуров.

Пример 1. Индуктивность длинного соленоида. Рассмотрим соленоид, для которого его длина во много раз превышает диаметр витков. В этом случае для модуля вектора  $B$  можно воспользоваться формулой (3.21) и, следовательно, для  $L$  получим

$$L = \frac{\Psi_s}{I} = \frac{N\Phi_s}{I} = \frac{NBS \cos 0}{I} = \frac{N\mu\mu_0 InS}{I} = \mu\mu_0 n^2 V ,$$

## **5. Зависимость силы тока от времени при размыкании цепи**

Рассмотрим электрическую цепь, приведённую на рис.а. Она содержит источник постоянного тока с ЭДС  $\varepsilon$ , катушку индуктивности  $L$ , сопротивления  $R$  и  $r$ , а также ключ  $K$ .



Когда ключ К находится в положении 1, по цепи протекает постоянный ток  $I_0 = \varepsilon / R$ , а в катушке сосредоточена энергия в виде энергии  $W_M$  магнитного поля. В момент времени  $t=0$  ключ К перебрасывают в положение 2, цепь размыкается, и ток в ней начинает убывать, он убывает постепенно за счёт возникающего в катушке явления самоиндукции. При этом запасённая в катушке энергия магнитного поля расходуется на поддержание убывающего тока, нагревание проводников.

Выведем формулу для зависимости силы тока от времени при размыкании цепи. Для этого запишем закон Ома для полной цепи:

$$Ir = \varepsilon_s, \quad -L \frac{dI}{dt} = Ir, \quad \frac{dI}{I} = -\beta dt;$$

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\beta \int_0^t dt, \quad \ln \frac{I}{I_0} = -\beta t,$$

$$I = I_0 e^{-\beta t}, \quad \beta = r/L.$$

На рис.б приведены построенные по уравнению зависимости силы тока  $I$  от времени  $t$  при различных значениях параметра  $\beta$  - от нуля. Из формулы следует, что чем больше  $\beta$ , т.е. чем больше  $r$  или меньше  $L$ , тем быстрее убывает ток в цепи.

Рассмотрим зависимость ЭДС самоиндукции  $\varepsilon_s$  от времени  $t$  при размыкании цепи. Для этого подставим формулу для силы тока в выражение:

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt} = -L \frac{d}{dt} (I_0 e^{-\beta t}) = -L I_0 \left(-\frac{1}{\beta}\right) e^{-\beta t} = r I_0 e^{-\beta t} = \varepsilon \frac{r}{R} e^{-\beta t},$$

$$\varepsilon_s(0) = \varepsilon \frac{r}{R} \gg 1.$$

Итак, из-за того, что  $r \gg R$ , в начальные моменты времени при размыкании цепи наблюдается скачок ЭДС самоиндукции, и она может

Поэтому электрические цепи, содержащие большую индуктивность, необходимо размыкать так, чтобы сопротивление увеличивалось не скачком, а постепенно.

## **6. Второе уравнение Максвелла в интегральной форме. Ток смещения.**

Основная идея теории Максвелла заключалась во взаимосвязи между собой электрических и магнитных полей: если переменное магнитное поле порождает в окружающем пространстве электрическое поле (первое положение теории Максвелла), то в свою очередь и переменное электрическое поле должно создавать в окружающем пространстве магнитное поле. В связи с этим Максвелл сформулировал второе положение теории Максвелла, а именно: переменное электрическое поле порождает в окружающем пространстве магнитное поле.

Следовательно, в теореме о циркуляции вектора  $\mathbf{B}$  к источникам магнитного поля в виде токов проводимости добавляется ещё один источник, который Максвелл назвал током смещения,

$$\oint_{\Gamma} \bar{B} d\bar{l} = \mu\mu_0 \left( \sum_i I_{\text{пр}_i} + I_{\text{см}} \right) = \mu\mu_0 \int_S (\bar{j}_{\text{пр}} + \bar{j}_{\text{см}}) dS.$$

Формула получила название закона полного тока.

В выражение введены плотности тока проводимости ( $\bar{j}_{\text{пр}}$ ) и смещения ( $\bar{j}_{\text{см}}$ ); интеграл берётся по поверхности  $S$ , опирающейся на контур ( $\Gamma$ ).

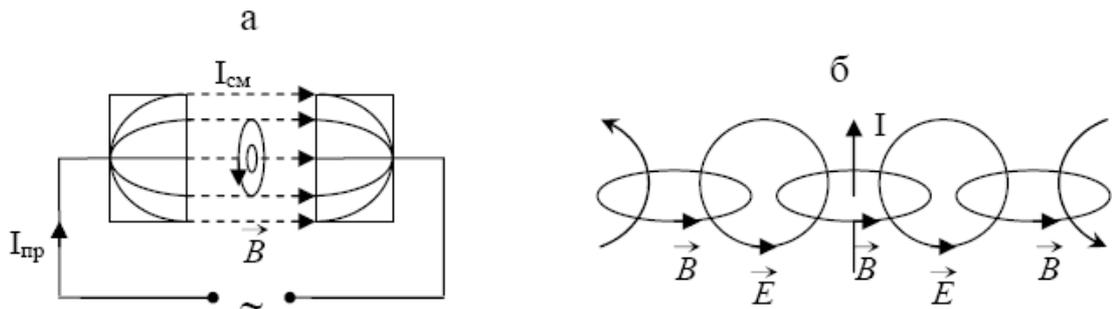
Под током смещения  $I_{\text{см}}$  понимают скалярную физическую величину, измеряемую в амперах, характеризующую способность электрического поля создавать магнитное поле, и пропорциональную скорости изменения во времени напряжённости  $\bar{E}$  электрического поля.

Установим формулу связи плотности тока смещения  $\bar{j}_{\text{см}}$  с напряжённостью  $\bar{E}$  переменного электрического поля. Для этого рассмотрим электрическую цепь, содержащую плоский конденсатор с площадью пластин  $S$ . Протекание переменного тока в такой цепи сопровождается плавным переходом на границе пластин конденсатора тока проводимости в ток смещения, который существует в пространстве внутри конденсатора. Записывая условия непрерывности на границе обкладок, получим

$$j_{\text{см}} = j_{\text{пр}} = \frac{I}{S} = \frac{1}{S} \cdot \frac{dq}{dt} = \dot{E} = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{q}{S\epsilon\epsilon_0} = \epsilon\epsilon_0 \frac{dE}{dt},$$

$$I_{\text{см}} = \int_S \vec{j}_{\text{см}} d\vec{S}, \quad \vec{j}_{\text{см}} = \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t},$$

где  $\sigma$  - поверхностная плотность заряда на пластинах конденсатора;  $\vec{E}$  - напряжённость электрического поля внутри конденсатора;  $\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками.



где  $r$  - расстояние от осевой линии внутри конденсатора до рассматриваемой точки пространства.

Введение понятия тока смещения позволяет по-другому объяснить отсутствие постоянного тока проводимости в электрической цепи, содержащей конденсатор. В этом случае в такой цепи не возникает переменного электрического поля между обкладками конденсатора, поэтому тока смещения не будет и линии тока проводимости на обкладках конденсатора прерываются.

Получим второе уравнение Максвелла в интегральной форме следующего вида:

$$\oint_{(\Gamma)} \vec{B} d\vec{l} = \mu\mu_0 \left( \sum_i I_{\text{пр}_i} + I_{\text{см}} \right) = \mu\mu_0 \int_S \left( \vec{j}_{\text{пр}} + \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{S}.$$

Уравнение читается следующим образом: циркуляция вектора  $\vec{B}$  магнитного поля по произвольному замкнутому контуру ( $\Gamma$ ) равна сумме токов проводимости и смещения, охватываемых контуром ( $\Gamma$ ), умноженной на коэффициент (дц0).

## 7. Полная система уравнений Максвелла

В основе теории Максвелла, позволяющей описывать электрические и магнитные явления в любой среде (и в вакууме, в частности), лежат два положения о взаимосвязи согласно электрических и магнитных полей, согласно которым: 1) переменное во времени магнитное поле порождает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле; 2) переменное во времени электрическое поле создает в пространстве магнитное поле.

Отражением этих положений теории Максвелла являются два его первых уравнения - они являются обобщением закона электромагнитной индукции Фарадея и теоремы о циркуляции вектора  $\vec{B}$ :

$$\begin{array}{ll}
 1. \quad \oint_{(\Gamma)} \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}. & 2. \quad \oint_{(\Gamma)} \vec{B} d\vec{l} = \mu\mu_0 \left( \sum_i I_{np_i} + I_{cm} \right) = \mu\mu_0 \int_S \left( \vec{j}_{np} + \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{S} \\
 3. \quad \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} q_{\Sigma}. & 4. \quad \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0. \\
 5. \quad \vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E}. & 6. \quad \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}. \quad 7. \quad \vec{j} = \sigma \vec{E}.
 \end{array}$$

Третье и четвертое уравнения Максвелла представляют собой теоремы Гаусса для электростатического и магнитного полей. Физический смысл этих уравнений состоит в следующем: источником электростатического поля являются свободные и связанные заряды; в природе отсутствуют магнитные заряды, т.е. линии вектора  $\vec{B}$  магнитного поля являются замкнутыми.

Пятое и шестое уравнения Максвелла вводят векторы электрического смещения  $\vec{D}$  и напряжённости  $\vec{H}$  магнитного поля, которые в отличие от истинных векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  являются вспомогательными, вводимыми для удобства описания полей в присутствии вещества.

Седьмое уравнение Максвелла представляет собой закон Ома в дифференциальной форме, где  $\sigma$  - удельная проводимость вещества.

Записанные выше семь уравнений справедливы для однородных изотропных неферромагнитных и несегнетоэлектрических сред, для которых формулы связи, выражаемые пятым, шестым и седьмым уравнениями, являются достаточно простыми, так как параметры  $\varepsilon$ ,  $\mu$  и  $\sigma$  являются постоянными числами.

В общем случае эти формулы связи усложняются и называются материальными уравнениями:

$$\vec{D} = \vec{D}(\vec{E}), \quad \vec{B} = \vec{B}(\vec{H}), \quad \vec{j} = \vec{j}(\vec{E}).$$

Эти уравнения принимают определённую форму, которая возникает из рассмотрения микроструктуры конкретной среды. В общем случае для произвольной среды уравнения Максвелла примут вид:

$$\begin{array}{ll} 1. \quad \oint_{(r)} \vec{E} d\vec{l} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}. & 2. \quad \oint_{(r)} \vec{H} d\vec{l} = \left( \sum_i I_{mp_i} + I_{ext} \right) = \int_s \left( \vec{j}_{mp} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}. \\ 3. \quad \oint_s \vec{D} d\vec{S} = \sum q_i. & 4. \quad \oint_s \vec{B} d\vec{S} = 0. \\ 5. \quad \vec{D} = \vec{D}(\vec{E}). & 6. \quad \vec{B} = \vec{B}(\vec{H}). \quad 7. \quad \vec{j} = \vec{j}(\vec{E}). \end{array}$$

Полная система уравнений Максвелла позволяет определить основные характеристики электромагнитного поля  $(\vec{E}, \vec{B}, \vec{D}, \vec{H})$  в каждой точке пространства, если известны источники поля - распределение токов проводимости  $\vec{j}_{mp}$  и электрических зарядов  $q_i$  как функции координат и времени.

Наиболее удобной является полная система уравнений Максвелла в дифференциальной форме:

$$\begin{array}{llll} 1. \quad rot \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & 2. \quad rot \vec{H} = (\vec{j}_{mp} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) & 3. \quad div \vec{D} = \rho & 4. \quad div \vec{B} = 0 \\ 5. \quad \vec{D} = \vec{D}(\vec{E}). & 6. \quad \vec{B} = \vec{B}(\vec{H}). & 7. \quad \vec{j} = \vec{j}(\vec{E}). & \end{array}$$

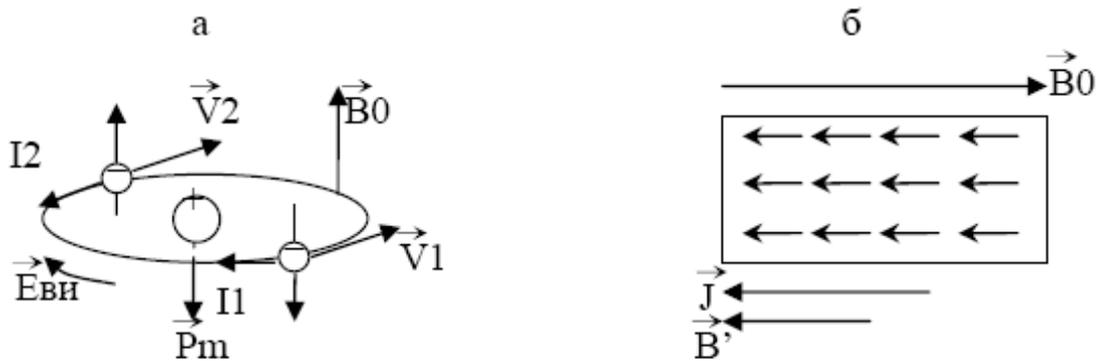
Она справедлива для малой окрестности любой точки пространства и при задании начальных и граничных условий позволяет решать любые задачи классической макроскопической электродинамики. Полная система уравнений Максвелла играет в электромагнетизме такую же роль, как законы Ньютона в механике.

## **ТЕМА: Магнитное поле в веществе.**

### **1. Диамагнетики.**

Это вещества, у которых в отсутствии внешнего магнитного поля магнитный момент атома равен нулю. Для них магнитная восприимчивость не зависит от индукции внешнего магнитного поля, принимает малые по модулю отрицательные значения  $\chi = -(10^{-4} - 10^{-5})$ , что означает незначительное

ослабление внешнего магнитного поля  $\vec{B}_0 (\mu \leq 1)$  в присутствии диамагнетиков и противоположное направление векторов  $\vec{B}'$ ,  $\vec{J}$  и вектора  $\vec{B}_0$ . Во внешнем неоднородном магнитном поле диамагнетик будет перемещаться и выталкиваться в область более слабого поля.



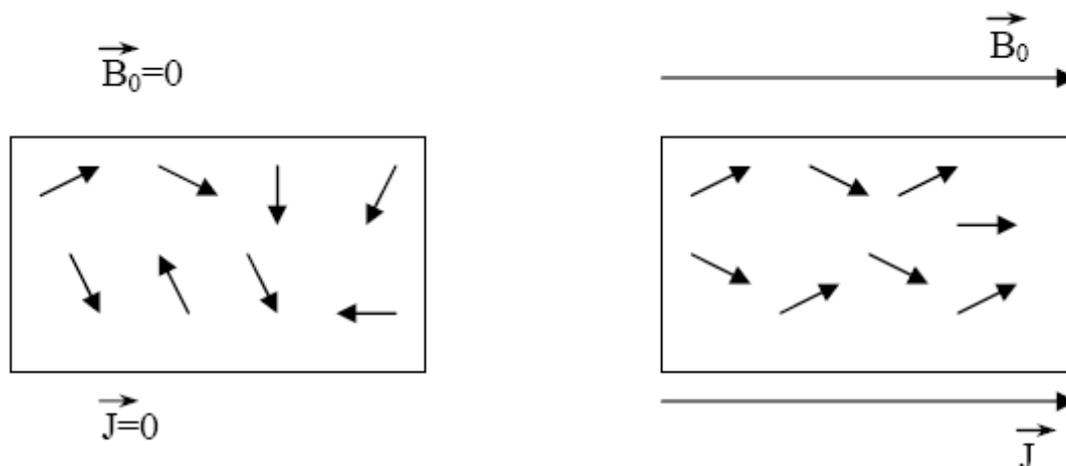
диамагнетикам относятся инертные газы, металлы Bi, Zn, Cu, Ag, Au, Hg, стекло, мрамор, различные смолы и т.д.

Рассмотрим, что происходит с атомами диамагнетика во внешнем магнитном поле на примере атома He. По теории Бора в атоме гелия два электрона движутся с одинаковой скоростью в противоположные стороны по круговой орбите, поэтому их суммарный ток будет равен нулю, следовательно, будет равна нулю и сумма орбитальных магнитных моментов электронов (рис.а). Так как спиновые магнитные моменты электронов направлены в противоположные стороны, то их сумма также равна нулю, следовательно, равен нулю и магнитный момент атома:  $\vec{P}_{m.ат} = 0$ .

При включении внешнего магнитного поля  $\vec{B}_0$  во время его изменения от нуля до  $B_0$  возникающее при этом вихревое электрическое поле  $\vec{E}_в$  совершает работу по увеличению скорости первого электрона и уменьшению скорости второго электрона и суммарный кольцевой ток будет направлен в сторону первого тока. Тогда магнитный момент суммарного тока будет направлен против вектора  $\vec{B}_0$ . Его называют индуцированным магнитным моментом  $\vec{P}_{m.инд}$ . Их ориентация для атомов диамагнетика, находящегося во внешнем магнитном поле, показана на рис.б.

Диамагнитный эффект - возникновение индуцированного магнитного момента атома  $\vec{P}_{m.инд}$ , направленного противоположно внешнему магнитному полю  $\vec{B}_0$ , свойственен всем веществам, но для остальных групп магнетиков он не учитывается ввиду его малости.

## 2. Парамагнетики.



Это вещества, у которых в отсутствии внешнего магнитного поля магнитный момент атома отличен от нуля. Для них  $\chi$  не зависит от  $\vec{B}_0$ , принимает малые числовые значения  $\chi = (10^{-3} - 10^{-2}) > 0$ , что означает незначительное увеличение внешнего магнитного поля в присутствии парамагнетика ( $\mu \geq 1$ ) и параллельность векторов  $\vec{B}'$  и  $\vec{J}$  вектору  $\vec{B}_0$ . Во внешнем неоднородном магнитном поле парамагнетик будет перемещаться и втягиваться в область более сильного поля.

К парамагнетикам относятся щелочные и щелочноземельные металлы, Al, Pt, растворы солей железа, газы азот и кислород, редкоземельные металлы и их соединения и т.д.

Рассмотрим теорию Ланжевена, объясняющую поведение парамагнетиков во внешнем магнитном поле. В этой теории парамагнетик по отношению к магнитным свойствам заменяется газом магнитных стрелок, принимающих участие в тепловом движении. Стрелки моделируют магнитные моменты атомов. В отсутствие внешнего магнитного поля тепловое движение разбрасывает стрелки хаотично по всем направлениям и поэтому  $\vec{B}' = 0$ ,  $\vec{J} = 0$ . Во внешнем магнитном поле на магнитные стрелки действуют силы магнитного поля, стремящиеся установить их вдоль линий магнитной индукции. В итоге наблюдается преимущественная ориентация магнитных моментов атомов вдоль линий магнитного поля, появляется намагниченность  $\vec{J}$  парамагнетика

В теории Ланжевена для магнитной восприимчивости справедлив закон Кюри, который определяет зависимость  $\chi$  от температуры:

$$\chi = \frac{c}{T}$$

где  $c$  - постоянная Кюри.

С повышением температуры усиливается фактор теплового движения атомов, и поэтому во внешнем магнитном поле фиксированной величины  $B_0$  магнитная восприимчивость уменьшается, что и приводит к уменьшению числовых значений векторов  $\vec{B}'$  и  $\vec{J}$ .

### **3. Ферромагнетики.**

Группу магнитоупорядоченных веществ составляют вещества, у которых в отсутствии внешнего магнитного поля магнитный момент атома не равен нулю. В отличие от парамагнетиков для них магнитная восприимчивость существенно зависит от индукции  $\vec{B}_0$  внешнего магнитного поля.

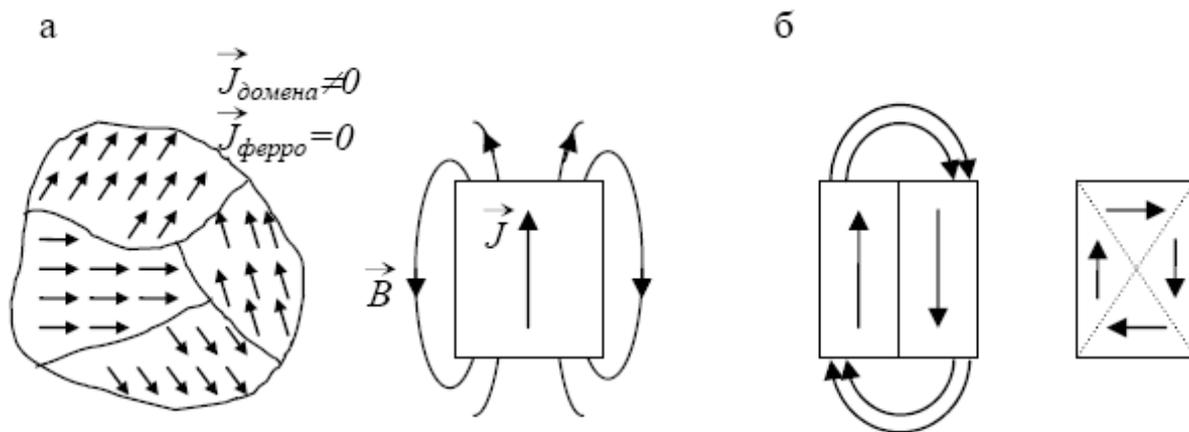
Рассмотрим подробнее ферромагнетики, которые наиболее широко применяются на практике.

К ферромагнетикам относятся такие металлы как Fe, Co, Ni, Gd, сплавы и соединения этих элементов и т.д. Перечислим основные особенности ферромагнетиков.

Ферромагнетизм обусловлен спиновыми магнитными моментами атомов.

1. Атомы ферромагнетиков имеют незаполненные внутренние электронные оболочки, что приводит к большим магнитным моментам атомов.

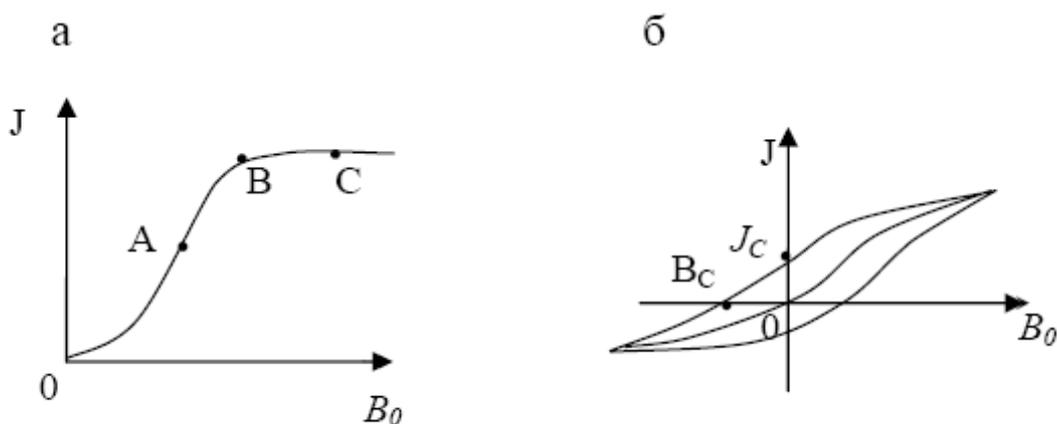
2. Между магнитными моментами соседних атомов устанавливается обменное взаимодействие, которое приводит к параллельной ориентации магнитных моментов атомов в микрообластях, называемых доменами. Направления магнитных моментов атомов различных доменов разные, поэтому общая намагниченность ферромагнетика равна нулю (рис.а).



Размеры доменов устанавливаются за счёт действия двух факторов:

а) энергетически выгодно увеличивать число доменов, так как уменьшается энергия, необходимая для поддержания магнитного поля за пределами ферромагнетика (рис.б);

б) энергетически выгодно уменьшать число доменов, так как уменьшается длина границ, на которых из-за большого градиента магнитного поля (на границах между доменами резко изменяется направление магнитных моментов атомов) накапливается магнитная энергия. В итоге размеры доменов составляют порядка  $l \approx (10^{-2} - 10^{-4})$  см.



3. Магнитная восприимчивость  $\chi$  существенно зависит от величины индукции внешнего магнитного поля, достигая значений, превышающих в ряде случаев в  $10^{10}$  раз значения  $\chi$  для парамагнетиков. Намагниченность ферромагнетика достигает насыщения в слабых магнитных полях. Основная кривая намагничивания является нелинейной (рис.а).

## ТЕОРИЯ КОЛЕБАНИЙ

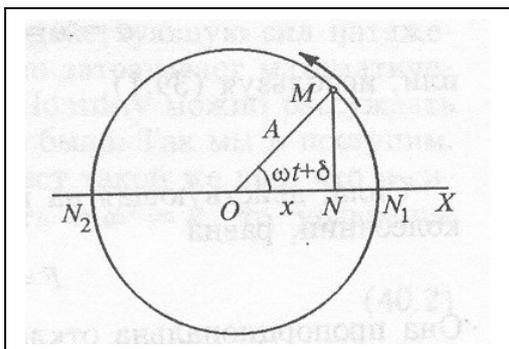
### 1. Гармонические колебания. Уравнение гармонических колебаний.

Колебанием называется движение или процессы периодически повторяющихся во времени  $t$ .

Примеры: Движение маятника, колебание тока в цепи и т.д.

Физическая природа колебаний может быть различной, однако законы изменения ее характеристик очень похожи, они описываются одинаковыми уравнениями. Поэтому можно применить единый подход к описанию колебаний различной природы.

*Колебания называются свободными, если они совершаются за счёт первоначально сообщенной энергии при последующем отсутствии внешних воздействий на систему.* Простейшим видом таких колебаний являются гармонические колебания, происходящие по закону  $\sin$  или  $\cos$ .



Гармонические величины описываются уравнением вида:

$$S = A \times \cos(\omega t + \varphi)$$

Где  $A$  – амплитуда колебаний,  $(\omega t + \varphi)$  – фаза колебаний в момент времени  $t$ .

Фаза колебаний определяет значение колеблющейся величины в данный момент  $t$ . Т.к.  $\cos$  изменяется в пределах от +1 до -1, то  $S$  принимает значение от  $+A$  до  $-A$ .

Промежуток времени, в течение которого совершается одно полное колебание, называется промежуток  $T$ , при этом фаза получает приращение  $2\pi$ :

$$\omega(t + T) + \varphi = (\omega t + \varphi) + 2\pi$$

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

Период обратен частоте колебаний:

$$T = \frac{1}{\nu}$$

Связь частоты  $\nu$  и циклической частоты:

$$\omega = 2\pi\nu$$

Частота измеряется в Герцах:  $[\nu] = 1 \text{ Гц (в СИ)}$ .

Вычислим производные от величины  $S$ :

$\square$

$$\frac{ds}{dt} = A\omega \sin(\omega t + \varphi) = A\omega \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right)$$

Т.е.  $\frac{ds}{dt}$  и  $\frac{d^2s}{dt^2}$  колеблются с той же частотой  $\omega$ .

$$\frac{d^2s}{dt^2} = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi) = -\omega^2 s$$

Или:

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \omega^2 s = 0$$

Это и есть дифференциальное уравнение колебаний, решением данного уравнения является гармоническая функция.

## 2. Механические колебательные системы

Рассмотрим материальную точку, совершающую колебания вдоль оси координат  $x$  около положения равновесия (в начале координат):

$$x = A \times \cos(\omega t + \varphi)$$

Скорость и ускорение:

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega \sin(\omega t + \varphi) = A\omega \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi) = A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi + \pi)$$

1) Сила, действующая на точку:

$$F = ma = -m\omega^2 x$$

Т.о.  $F = -kx$  и направлено противоположно  $x$ .

2) Кинетическая энергия тела (точки):

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{A^2\omega^2}{2} \sin^2(\omega t + \varphi)$$

3) Потенциальная энергия:

$$E_n = -\int_0^x F dx = \int_0^x m\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) dx = -\int_0^x -m\omega^2 x dx = \frac{m\omega^2 x^2}{2}$$

4) Полная механическая энергия:  $E = E_k + E_n$

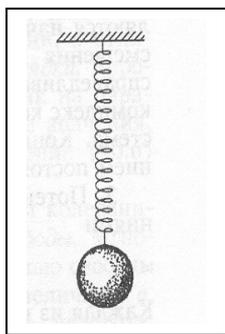
$$E = E_k + E_n = \frac{mA^2\omega^2}{2} (\sin^2(\omega t + \varphi) + \cos^2(\omega t + \varphi)) = \frac{mA^2\omega^2}{2}$$

Гармоническим осциллятором называется система, совершающая колебания, описываемые уравнением, вида:  $m\ddot{x} + kx = 0$

$$\ddot{s} + \omega^2 s = 0$$

Примером гармонического осциллятора являются маятники, колебательный контур.

1. Пружинный маятник – груз массы  $m$ , подвешенный на абсолютно упругой пружине и совершающей гармонические колебания под действием упругой силы:  $F = -kx$ , где  $k$  – жесткость пружины.



Уравнение движения маятника:

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0$$

Решение – колебание  $x = A \cos(\omega t + \varphi)$  с частотой:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} ;$$

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

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

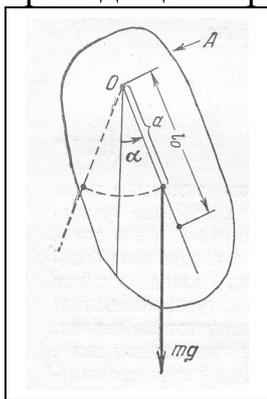
Период колебаний:

Данное соотношение справедливо для малых колебаний.

Потенциальная энергия:

$$\Pi = \frac{kx^2}{2}$$

2. Физический маятник – это твёрдое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания, вокруг неподвижной горизонтальной оси, проходящей через точку, не совпадающую с центром масс тела.



При отклонении его из положения равновесия на угол  $\alpha$  в соответствии с основным законом вращательного движения:

$$\left. \begin{array}{l} M = I\varepsilon \\ \varepsilon = \frac{d^2\alpha}{dt^2} = \ddot{\alpha} \\ M = F_t l \end{array} \right\} M = -mgl \sin \alpha \approx -mgl\alpha$$

$$-mgl\alpha = I\ddot{\alpha}$$

$$I\ddot{\alpha} + mgl\alpha = 0$$

Или:

$$\ddot{\alpha} + \frac{mgl}{I}\alpha = 0$$

Где:

$$\omega = \sqrt{\frac{mgl}{I}}$$

- циклическая частота колебаний.

Решение уравнения :  $\alpha = \alpha_0 \cos(\omega t + \varphi)$

Величина  $L = \frac{I}{mb}$  - называется приведенной длиной физического маятника.

Тогда:

$$T = \frac{2}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$



На продолжении  $OC$  есть □ - точка качаний. Точки  $O$  и □ взаимозаменяемы.

3. Математический маятник – система, состоящая из точки массы  $m$ , подвешенной на нерастяжимой невесомой нити и колеблющейся под действием силы тяжести:

Момент инерции точки:  $I = mr^2 = ml^2$

Т.о. имеем частный случай физ. маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{ml^2}{mgl}} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Из сравнения видно, что  $L$  – это длина такого математического маятника, период колебаний которого совпадает с периодом колебаний данного физического маятника.

□

### 3. Дифференциальное уравнение затухающих колебаний

В любой реальной системе, вследствие диссипации энергии (из – за трения) происходит уменьшение амплитуды колебаний. Такие колебания называются затухающими. Закон затухающих колебаний определяется свойствами колебательной системы. Мы будем рассматривать линейные системы, в которых параметры системы остаются постоянными ( $k, m$  – для пружинного маятника;  $L, C$  – для колебательного контура). Различные колебания линейной системы описываются сходными уравнениями.

Дифференциальное уравнение затухающих колебаний имеет вид:

$$\frac{d^2s}{dt^2} + 2\delta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = 0$$

где □ - коэффициент затухания, □ - частота свободных колебаний.

(при □=0 – это собственная частота колебаний)

Найдем решение уравнения, представив величину  $S$  в виде:

$$s = e^{-\delta t} U(t);$$

где  $U=U(t)$

Продифференцируем данное выражение и подставим в исходное уравнение, сократив на □, получим:

□

$$\ddot{U} + 2\delta\dot{U} + \omega_0^2 U = 0$$

Решение уравнения зависит от значения (□)

Пусть (□) > 0, т.е. □ (малые затухающие). Обозначим □,

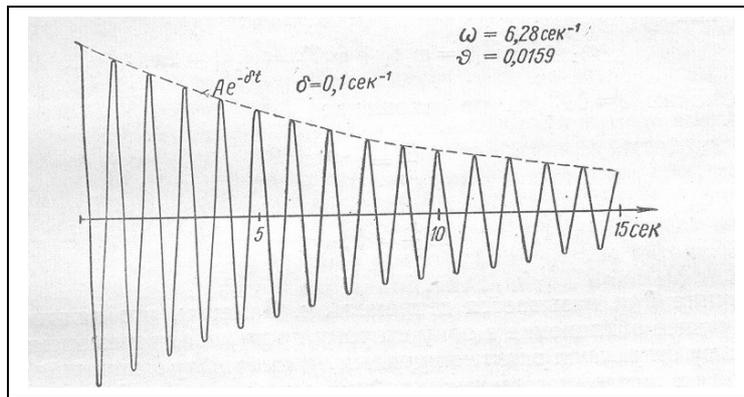
тогда уравнение имеет вид: □, и □. Найдем решение уравнения затухающих колебаний:

$$S = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi_0)$$

где  $S$  – колеблющаяся величина.

$$A = A_0 e^{-\delta t}$$

- амплитуда затухающих колебаний.



$\tau = \frac{1}{\delta}$  - время релаксации (за которое амплитуда колебаний уменьшается в  $e$  раз).

Строго говоря, затухающие колебания не являются периодическими, и понятие периода для них вводится условно (лишь в случае  $\omega_0 \gg \delta$ ).

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}$$

$$A = A_0 e^{-\delta t}$$

из этой зависимости найдём отношение амплитуд через период:

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

Это отношение называется декрементом затухания

Величина  $\beta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \delta T$

Называется логарифмическим декрементом.

$$\beta = \delta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N_e}$$

где  $N_e$  - количество колебаний, совершаемых за время релаксации  $\tau$ . Время релаксации – время в течение которого амплитуда изменится в  $e$  раз.

Для характеристики колебательной системы вводят понятие добротности:

$$Q = \frac{\pi}{\beta} = \pi N_e = \frac{\pi}{\delta T_0} = \frac{\omega_0}{2\pi}$$

Т.к. добротность пропорциональна числу колебаний, совершаемых за время  $\square$ .

#### 1. Затухающие колебания пружинного маятника

Если в системе, кроме  $F_{\text{упр}} = -kx$  действует сила трения  $F_{\text{тр}} = -rv = -r\dot{x}$ , то уравнение движения имеет вид:

$$m\ddot{x} = -kx - r\dot{x}$$

Или  $\ddot{x} + \frac{k}{m}\dot{x} + \frac{r}{m}x = 0$

$\frac{r}{m} = 2\delta$ , тогда  $\delta = \frac{r}{2m}$  и  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$

Т.о.  $\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0$  - дифференциальное уравнение затухающих колебаний пружинного маятника.

Его решение:  $x = A_0 e^{-\delta \cdot t} \cos(\omega t + \varphi_0)$ , а частота:

$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{r^2}{4m^2}}$ , добротность:  $Q = \sqrt{\frac{km}{r}}$

При росте  $\square$  растёт и период, и при  $\omega_0 = \delta$  обращается в бесконечность. Процесс перестаёт быть периодическим.

#### 4. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний.

Для того, чтобы в реальной колебательной системе получить незатухающие колебания, необходимо компенсировать потери энергии, т.е. в системе должна действовать периодическая вынужденная сила:

$$F = F_0 \cos \omega t$$

Где  $F_0$  - амплитуда изменения  $i$

$\omega$  - частота внешней силы.

Уравнение пружинного маятника будет иметь вид:

$$m\ddot{x} = -kx - r\dot{x} + F_0 \cos \omega t$$

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} \cos \omega t$$

Колебания, возникающей под действием внешней периодической силы, называются вынужденными.

Обобщённое уравнение (дифференциальное) вынужденных колебаний.

$$\frac{d^2 S}{dt^2} + 2\delta \frac{dS}{dt} + \omega_0^2 S = x_0 \cos \omega t$$

или  $\ddot{S} + 2\delta\dot{S} + \omega_0^2 S = x_0 \cos \omega t$

где  $x_0$  в случае механических колебаний равен:  $\frac{F_0}{m}$ .

Уравнение вынужденных колебаний является неоднородным дифференциальным уравнением.

Его решение равно сумме однородного дифференциального уравнения и частного решения неоднородного уравнения.

Частное решение является функцией:

$$S = A \cos(\omega t - \varphi)$$

где  $A = \frac{x_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}}$

$$\varphi = \arctg \frac{2\delta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

Общее решение однородного уравнения:

$$S_1 = A e^{-\delta t} \cos(\omega_1 t + \varphi_0)$$

Данное слагаемое играет роль в процессе установления колебаний, пока

амплитуда не достигла значения  $A = \frac{x_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}}$

Т.о., в установившемся режиме, колебания происходят с частотой  $\omega$  внешней силы и являются гармоническими. Амплитуда и фаза колебаний определяется частотой  $\omega$ .

## 5. Резонанс

Рассмотрим зависимость амплитуды  $A$  вынужденных колебаний от частоты  $\omega$  вынуждающей силы.

Из решения уравнения вынужденных колебаний следует, что  $\dot{A}$  имеет максимум. Найдём значение  $\omega$  при которой  $\dot{A}$  принимает максимальное значение, для этого возьмем производную от выражения для амплитуды и приравняем его к нулю.

$$\dot{A} = 0, \text{ тогда } -4(\omega_0^2 - \omega^2)\omega + 8\delta^2\omega = 0$$

Данное равенство справедливо при  $\omega = 0$

и при  $\omega = \pm\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ , (берём только «+»).

Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при приближении  $\omega$  к  $\omega_0$  или  $\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ , называется резонансом.

При  $\delta^2 \ll \omega_0^2$ ,  $\omega_{рез} = \omega_0$ . Тогда для амплитуды получим:

$$A_{рез} = \frac{X_0}{2\delta\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}$$

чем меньше  $\delta$ , тем выше и правее лежит максимум резонансной кривой.

$\frac{X_0}{\omega_0^2}$  - статическое отклонение

## **О П Т И К А**

### **ТЕМА: Развитие представлений о природе света.**

Хотя попытки дать объяснения природы света были сделаны еще в древности (Евклид и Лукреций Кар), первая стройная теория света была разработана И.Ньютоном в конце семнадцатого века. Ньютон считал, что свет – это поток мельчайших частиц – корпускул, поэтому его теория получила название корпускулярной. Одновременно с ним Гук и Гюйгенс развивали волновую теорию, однако она не получила широкого признания отчасти из-за высокого авторитета Ньютона и отчасти из-за недостатков самой теории, которая представляла свет как упругие колебания среды. Ньютон установил, что свет в представлениях волновой теории должен быть поперечными колебаниями, что казалось маловероятным, учитывая эмпирические факты распространения света в воздухе и, особенно, в межзвездном пространстве. Лишь позднее была предложена гипотеза о существовании особой среды, заполняющей всю Вселенную, – **эфира**, упругие свойства которого обеспечивали требуемую скорость распространения света. Успехи волновой теории связаны с работами Юнга, Френеля и Пуассона, которые были выполнены в первой половине XIX века. Работы этих исследователей позволили объяснить такие явления как интерференция и дифракция света. Д.Максвелл установил, что свет – это электромагнитные волны. В тот момент, когда волновая теория стала общепризнанной, были установлены закономерности излучения света атомами и открыт фотоэффект. Эти факты противоречили волновой теории. Позднее была разработана новая теория – дуалистическая, где свету приписывались и волновые и корпускулярные свойства. Луи де Бройль высказал гипотезу о всеобщем дуализме материи: каждая частица обладает волновыми свойствами, и каждой волне могут быть приписаны определенная масса и импульс. Свет – лишь пример проявления дуализма в природе. В нашем курсе мы будем рассматривать преимущественно волновые явления.

### **1. Законы отражения и преломления света.**

Волновая теория широко использует принцип Гюйгенса: каждая точка среды, до которой дошел волновой фронт, становится источником вторичных колебаний так, что положение волнового фронта в любой последующий промежуток времени находится как огибающая этих вторичных возбуждений. Отметим, что волновым фронтом называется поверхность, соединяющая точки, колебания в которых имеют одинаковые фазы.

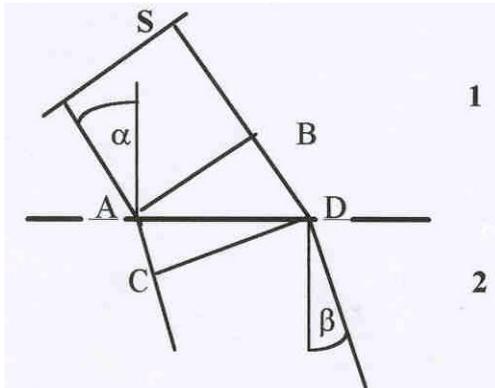


Рис.1. К выводу закона преломления света.

На рис.1 это изображается линией S. Руководствуясь этим принципом, выведем законы преломления и отражения света. Пусть на границу раздела двух сред падает плоский волновой фронт АВ. В момент, когда его левый край достигнет точки А (см. рис.1), в среде 2 вокруг этой точки начнет образовываться сферическая волна. Правый край фронта подойдет к границе раздела через время  $t = BD/c$ , где  $c$  – скорость распространения света в среде 1. За это время сферическая волна из точки А успеет распространиться на расстояние  $AC = vt$  ( $v$  – скорость распространения света в среде 2). Из рис. видно, что  $BAD = \alpha$  и  $ADC = \beta$

как углы с взаимно перпендикулярными сторонами. Поэтому можно записать:

$$\sin \alpha = \frac{BD}{AD} = \frac{ct}{AD}; \quad \sin \beta = \frac{AC}{AD} = \frac{vt}{AD}.$$

Сравнивая эти два выражения, можно заметить, что

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{v}.$$

Как уже упоминалось, скорость электромагнитных волн в среде  $v = c/\sqrt{\epsilon\mu} = c/n$ . Поэтому отношение синусов можно приравнять к показателю преломления второй среды относительно первой:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21}.$$

Если свет распространяется в обратном направлении, т.е. из среды 2 в среду 1, то закон преломления остается в силе, но теперь  $n_{12}$  – это показатель преломления среды 1 относительно среды 2. Можно заметить, что в этом случае угол преломления становится больше угла падения, но существует предельное значение угла преломления, т.к. синус не может быть больше единицы. Угол падения, который соответствует этому углу преломления называется **предельным**. При дальнейшем увеличении угла падения свет не проходит в среду 1, испытывая **полное внутреннее отражение**.

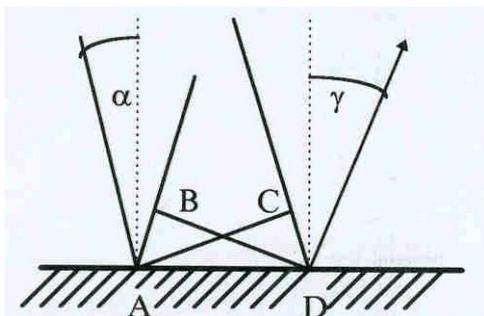


Рис.2. К выводу закона отражения света.

Вывод закона отражения света производится аналогичным способом, с той разницей, что теперь вторичная волна распространяется в той же среде (рис.2). Треугольники  $\triangle ACD$  и  $\triangle ABD$  равны, т.к. сторона  $AD$  – общая, а  $AB = CD = ct$ , где как и прежде  $t$  – время распространения волнового фронта от точки  $C$  до точки  $D$ . Из равенства треугольников следует, что

$\angle CAD = \angle ABD$ , как углы с взаимно перпендикулярными сторонами, но  $\angle CAD = \alpha$  и  $\angle ABD = \gamma$  и  $\alpha = \gamma$ , т.е. угол падения равен углу отражения.

## 2. Явление интерференции.

Интерференцией называется сложение волн от двух или нескольких источников, когда в результате сложения нарушается принцип суперпозиции интенсивностей. Как следует из прошлых лекций, плотности энергии электрического и магнитного полей пропорциональны квадрату величин  $E$  и

В, поэтому можно считать, что плотность энергии в электромагнитной волне также пропорциональна квадрату амплитуды волны. Принято считать, что плотность энергии определяет интенсивность световой волны, которую человеческий глаз оценивает как освещенность. При сложении волн должен выполняться принцип суперпозиции энергий каждой из слагаемых волн. Наша повседневная практика дает примеры справедливости этого положения: две лампы дают в два раза больше света, чем одна. Можно показать, однако, что этот принцип выполняется не всегда.

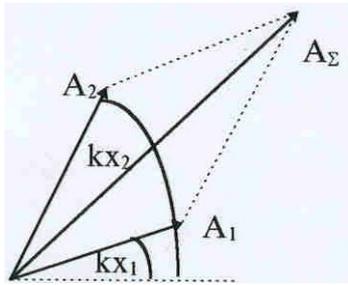


Рис.3.

Сложение когерентных колебаний.

Пусть имеется две плоских волны  $y_1 = A_1 \sin(\omega t - kx_1)$  и  $y_2 =$

$= A_2 \sin(\omega t - kx_2)$ , где  $x_1$  и  $x_2$  -расстояния, которые прошли волны до момента встречи. Для того, чтобы найти сумму колебаний от двух волн в точке встречи, представленных в векторном виде (рис.3). Как видно из рис., по теореме косинусов можно записать

$$A_{\Sigma}^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos k(x_2 - x_1) ,$$

т.е. результат сложения зависит от разности  $x_2 - x_1$ . При условии  $k(x_2 - x_1) = 2\pi n$  ( $n = 0, 1, 2$  и т.д.)

$$A_{\Sigma}^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 = (A_1 + A_2)^2 ,$$

а при  $k(x_2 - x_1) = (2n-1) \pi$

$$A_{\Sigma}^2 = A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 = (A_1 - A_2)^2 .$$

Очевидно, что при условии  $A_1=A_2$   $A_{\Sigma}^2 = 4A_1^2$  или  $A_{\Sigma}^2 = 0$  в зависимости от разности хода  $x_2 - x_1$ . Если учесть, что энергия каждой волны равна  $A^2$ , суммарная энергия должна равняться  $2A^2$ , тогда как результат сложения либо в два раза больше, чем суммарная энергия, либо равен нулю, т.е. кажется, что не выполняется закон сохранения энергии. Колебания, для которых подобные результаты имеют место, называются **когерентными**. Если принцип суперпозиции выполняется, то источники называют некогерентными. Для того, чтобы волны давали когерентные колебания, необходимо выполнение трех условий:

1. колебания должны иметь одинаковую частоту,

2. разность фаз колебаний должна быть постоянной хотя бы на время наблюдений,

3. колебания каждой из суммируемых волн должны лежать в одной плоскости.

Практическое получение когерентных колебаний связано с определенными трудностями. Необходимо иметь в виду, что световые волны получаются при излучении атомов, когда электроны переходят с одного энергетического уровня на другой. Время излучения крайне незначительно и составляет около  $10^{-8}$  сек. Новый кат излучения происходит с другой начальной фазой, которая раз от раза изменяется случайным образом. На языке корпускулярных

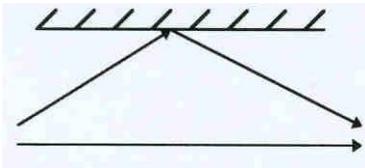


Рис.4.

Схема  
получения  
когерентных волн.

представлений такая порция излучения называется квантом, а в волновой теории ее называют **цугом**. Для получения когерентных волн необходимо, чтобы они происходили из одного цуга. Это можно сделать лишь путем его деления (см. рис.4). Для этих целей используются специальные приспособления: билинзы Бийе, бипризмы и бизеркала Френеля и др. (рис.5). Во всех случаях явление интерференции возможно,

если максимальная разность хода не превышает длину цуга  $L = c\tau$ , где  $\tau = 10^{-8}$  сек – время излучения цуга, т.е.  $L=3\text{м}$ .

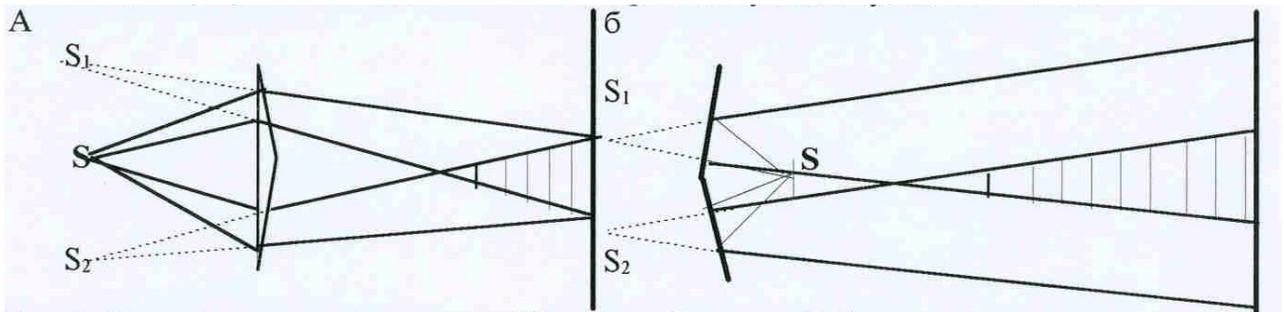


Рис.5. Интерференционные схемы: а)бипризма Френеля, б)билинза Френеля.

«Раздвоение» источника достигается либо преломлением в призме, либо отражением в двух зеркалах. Угол «разворота» зеркал и преломляющий угол призмы близки к  $180^\circ$  для того, чтобы достичь наилучшей видимости картины интерференции.

Как было показано, амплитуда суммарных колебаний определяется разностью хода интерферирующих волн или разностью фаз складывающихся колебаний. Если разность фаз  $\Delta\varphi$  изменяется случайным образом, то среднее значение  $\cos\Delta\varphi$  за время наблюдения равно нулю, и мы видим обыкновенное сложение интенсивностей. Если же источники когерентны, то при условии  $k(x_2 - x_1) = 2\pi n$  колебания дадут максимум суммарной амплитуды, а при  $k(x_2 - x_1) = (2n-1)\pi$  - минимум. Учитывая, что  $k = 2\pi/\lambda$ , ( $\lambda$  - длина волны) условия максимума и минимума интенсивностей можно записать так:

$$(x_2 - x_1) = 2n\lambda/2 \quad \text{для максимума и}$$

$$(x_2 - x_1) = (2n-1)\lambda/2 \quad \text{для минимума.}$$

Это значит, что если разность хода интерферирующих волн равна четному числу полуволн, то получается максимум, а если нечетному - минимум интенсивности. Нарушение закона сохранения энергии при этом не происходит. Она лишь перераспределяется - в *max* - больше, а в *min* меньше, но средняя энергия остается неизменной. Глаз воспринимает такое перераспределение как чередование темных и светлых полос, контрастность которых определяется соотношением интенсивностей интерферирующих источников

### 3. Полосы равной толщины.

Наиболее часто в повседневной жизни явление интерференции проявляется в так называемых полосах равной толщины, которые получаются при отражении света от тонких

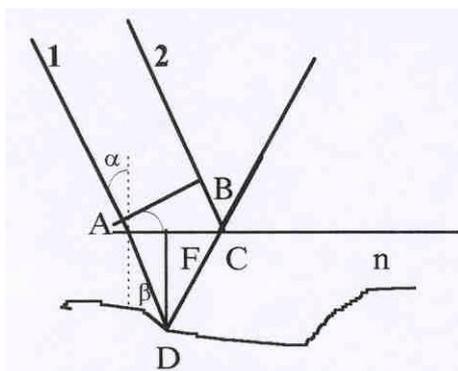


Рис.6.

Интерференция в тонких пленках.

пленок. Пусть имеется тонкая пленка переменной толщины (рис.6), на которую падают параллельные лучи света. Выберем два луча, один из которых отражается от верхней поверхности пленки, а другой - от нижней. Разность хода между лучами определяется удвоенной длиной  $AD$  и участком  $BC$ . Однако следует иметь в виду, что пленка является более плотной оптической средой, и скорость света в ней меньше. Вследствие этого время, затрачиваемое светом на прохождение пути  $AD$ , будет больше в  $n$  раз, где  $n$  - показатель преломления пленки. Поэтому принято говорить

об оптической длине пути света, которая равна  $ADn$ . Теперь разность оптических путей лучей

$1$  и  $2$   $\Delta = 2n(AD) - BC + \lambda/2$ . Величина  $\lambda/2$  добавляется потому, что происходит изменение фазы волны на  $180^\circ$ , что эквивалентно увеличению пути на  $\lambda/2$ . Из рис можно увидеть, что  $AD = DF/\cos\beta$ ;  $AF = DF\tg\beta$ ;  $AC = 2AF = 2DF\tg\beta$ ;  $BC = AC\sin\alpha = 2DF\tg\beta \sin\alpha$ . Согласно закону преломления света  $\sin\alpha = n\sin\beta$ . С учетом этого  $\Delta = 2nDF/\cos\beta - 2DF\sin\alpha\tg\beta + \lambda/2 = 2nDF(1 - \sin^2\beta)/\cos\beta + \lambda/2 = 2DF\cos\beta + \lambda/2$ .

Если  $\Delta = (2n-1)\lambda/2$ , то  $2DF\cos\beta = n\lambda$  соответствует условию минимума освещенности, а  $\Delta = n\lambda = 2DF\cos\beta + \lambda/2$  – условию максимума. Условия интерференции будут одинаковыми для всех мест, где толщина пленки также одинакова, в связи с чем говорят, что интерференционная картина локализована на поверхности пленки. При наблюдении в белом свете картина усложняется, т.к. для каждого из цветовых компонент белого света условия  $\max$  и  $\min$  будут свои. На поверхности пленки будут видны цветные пятна (вспомните пленки бензина и масла на поверхности луж). Частным случаем полос равной толщины являются

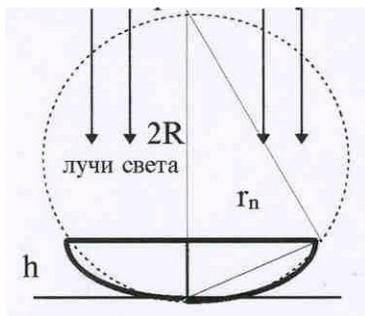


Рис.7. Схема для наблюдения колец Ньютона.

кольца Ньютона. Роль пленки переменной толщины здесь играет воздушная прослойка между собирающей линзой и стеклянной пластинкой (см.рис.7). Т.к. оптическая структура обладает осевой симметрией, наблюдающиеся интерференционные полосы принимают вид концентрических колец. Для толщины прослойки  $h$  разность хода между лучами, отраженными от нижней поверхности линзы и от пластинки соответственно равна  $\Delta = 2h + \lambda/2 - (\lambda/2)$  добавляется из-за условий отражения. В то же время из рис.44 на основании свойств перпендикуляра, опущенного из вершины прямого угла на гипотенузу, следует:

$$(2R - h)h = r_m^2 ,$$

где  $m$  – номер наблюдаемого кольца. Пренебрегая малой величиной  $h^2$  по сравнению с радиусом линзы  $R$ , находим  $2Rh = r_m^2$ . Для темных колец  $\Delta =$

$(2m+1)\lambda/2 = 2h + \lambda/2$  и  $2h = m\lambda$ . Подставляя это соотношение в формулу для квадрата радиуса кольца, получим:

$$r_m = \sqrt{mR\lambda}.$$

## **ТЕМА: Дифракция света.**

### **1. Метод зон Френеля.**

Дифракцией называется когерентное рассеяние света на объектах, геометрические размеры которых сравнимы с длиной световой волны. Наблюдающаяся дифракционная картина является результатом интерференции вторичных источников, образующихся на поверхности объекта. Расчет интерференционной картины можно проводить, пользуясь методом суперпозиции, однако применение этого метода сопряжено с известными математическими трудностями. В связи мы ограничимся рассмотрением качественного подхода к решению поставленной задачи, развитого Френелем. Основной идеей, определяющей сущность такого рассмотрения, является **принцип Гюйгенса –Френеля**, который представляет собой дополненный принцип Гюйгенса. Френель постулировал, что все элементарные вторичные источники являются когерентными. Для оценки результирующей амплитуды колебаний в точке наблюдения был разработан специальный метод, получивший название метода зон Френеля. Согласно этому методу волновой фронт (будем называть волновым фронтом поверхность, которая соединяет все точки, колеблющиеся в одинаковой фазе) разбивается на отдельные участки, именуемые зонами. Разбиение на зоны должно удовлетворять двум условиям:

1. площади всех зон одинаковы,

2. расстояния от двух соседних зон до точки наблюдения отличаются на половину длины волны.

Первое условие означает, что амплитуды колебаний от всех зон в точке наблюдения будут одинаковыми, тогда как из второго условия следует, что колебания двух соседних зон складываются в противофазе. В этом случае вместо вычисления сложных интегралов достаточно подсчитать число зон. Если оно – четно – в точке наблюдения будет минимум освещенности (зоны попарно гасят друг друга), если же количество зон на участке волнового

фронта, видимого из точки наблюдения, окажется нечетным – в ней будет конечная освещенность.

## 2. Метод векторных диаграмм.

Для оценки вкладов от каждой зоны в суммарную освещенность используем метод векторных диаграмм. Для этого разобьем каждую зону на ряд узких «подзон» так, что каждая подзона отличается от соседней лишь небольшим сдвигом по фазе. Колебания каждой из «подзон» будем представлять в виде вектора, длина которого определяется амплитудой ко-

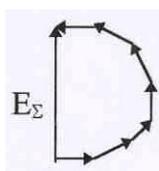


Рис.8.  
Векторная  
диаграмма  
одной  
зоны.

лебаний. Площади «подзон» выберем одинаковыми. Как видно из рис.8, вектора каждой «подзоны» оказываются повернутыми относительно соседних на небольшой угол, но «подзоны» на противоположных краях зоны отличаются по фазе на  $180^\circ$ . Суммарное действие всех «подзон» изображается вектором  $E_\Sigma$ . Нетрудно сообразить, что при устремлении ширины каждой «подзоны» к нулю, получившаяся ломаная линия превращается в плавную полуокружность.

Действие двух зон должно быть равным нулю, но оказывается, что амплитуды колебаний зон не совсем одинаковые. Их величина зависит от косинуса угла между нормалью к поверхности зоны и направлением на точку наблюдения. Результат сложения двух и трех зон

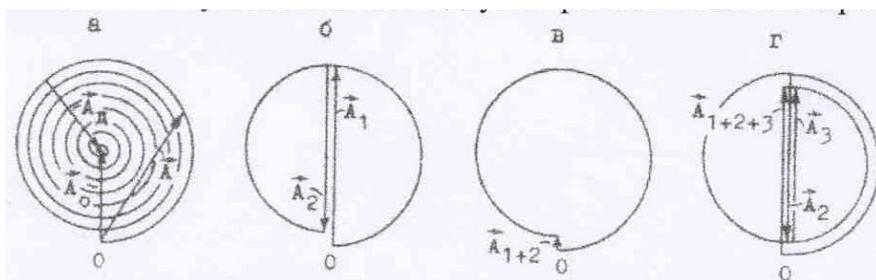


Рис.9. Векторные диаграммы для разного числа зон.

показан на рис.9( б,в и г). Как видно из рис., две зоны почти уничтожаются, а амплитуда третьей зоны почти равна амплитуде первой. Там же показано (рис.9а) действие всего

волнового  
фронта  $A_0$ , когда  
препятствие  
отсутству-

ет. Оно оказывается в два раза меньше, чем действие первой зоны. Витки спирали расположены достаточно плотно, и при большом количестве открытых зон суммарная амплитуда  $A_{\Sigma} \approx A_0$  остается практически неизменной при изменении числа зон.

### 3. Дифракция Френеля на круглом отверстии.

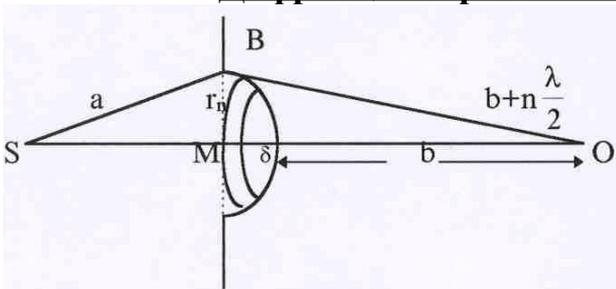


Рис.10. К вычислению радиуса зоны.

Применим метод зон к анализу так называемой дифракции Френеля, когда источник света – точечный, и волновая поверхность имеет форму сферы. В качестве препятствия рассмотрим небольшое круглое отверстие в непрозрачном экране. выберем точку наблюдения O так, чтобы в отверстии укладывалось бы целое число зон Френеля. Пусть волновой фронт от точечного источника S,

дошедший до экрана, имеет радиус  $SB = a$  (см. рис.10). Расстояние от точки наблюдения O до плоскости экрана равно  $MO = b + \delta$ . Мысленно разобьем волновой фронт на концентрические зоны ( на рис.47 показана одна зона) так, что расстояние от n – зоны до точки наблюдения O равно  $b + n\lambda/2$ . Из треугольника SBM по теореме Пифагора получим:

$$MB^2 = SB^2 - SM^2 = r_n^2 = a^2 - (a - \delta)^2 \approx 2a\delta . \quad (IV)$$

$$\text{аналогично из } \triangle OMB : MB^2 = SB^2 - SM^2 = r_n^2 = a^2 - (a - \delta)^2 \approx 2a\delta . \quad (V)$$

Члены, содержащие множители  $\lambda^2$  и  $\delta^2$ , отброшены как малые по сравнению с a и b. Приравнявая правые части уравнений (IV) и (V), получим  $2\delta(a + b) = bn\lambda$ . Выражая отсюда  $\delta$  и подставляя его в (IV), получим формулу для радиуса любой зоны:

$$r_n = \sqrt{\frac{abn\lambda}{a + b}} .$$

Численные значения радиуса первой зоны можно оценить, полагая  $a \approx b \sim 1\text{ м}$ ,  $\lambda \approx 0,5\text{ мкм}$ . Подстановка этих значений показывает, что  $r_1 \approx 0,3\text{ мм}$ . Поэтому при диаметре отверстия 1 - 2 мм в нем уложится 5-7 зон. Поскольку их амплитуды примерно одинаковы, результат сложения существенно зависит от числа зон. При нечетном числе зон в точке наблюдения

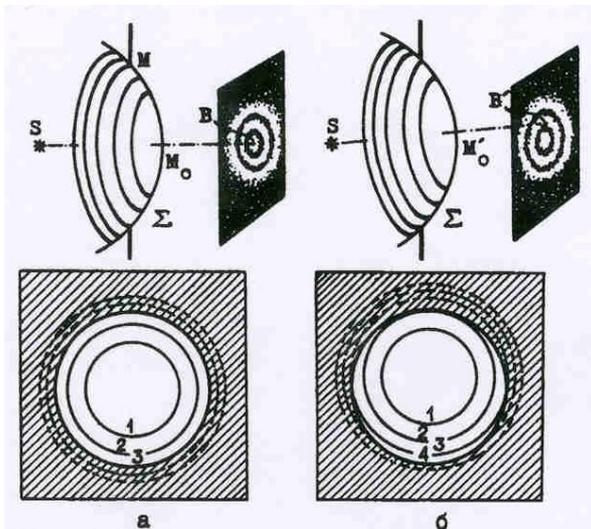


Рис.11. Смещение зон относительно отверстия.

будет максимум, а при четном – минимум освещенности. Рассмотрим, как будет изменяться результат сложения колебаний при изменении положения точки O. Если точка смещается вдоль оси SO, то характер разбиения на зоны не изменится, произойдет лишь изменение числа зон, укладываемых в отверстие, т.е. будет наблюдаться чередование максимумом и минимумов освещенности. Если же точка O смещается перпендикулярно оси SO, то характер разбиения на зоны также не изменится, но произойдет поворот направления наблюдения относительно перпендикуляра, восстановленного из центра отверстия к плоскости экрана (см. рис. 11). Вследствие этого часть зон начнет закрываться, что приведет к изменению освещенности. Пусть для определенности в тот мо-

мент, когда точка наблюдения находится на оси OS, а в отверстии укладывается нечетное число зон (например – три). Когда часть наружной зоны начнет закрываться, освещенность уменьшится. Одновременно с противоположного края отверстия появится часть новой зоны, которая еще больше уменьшит освещенность (здесь надо вспомнить, что соседние зоны гасят друг друга). Поэтому при дальнейшем удалении точки наблюдения от оси наступит момент, когда освещенность уменьшится до нуля. Это условие будет выполняться для всех точек, находящихся на окружности, радиус которой определяется расстоянием от точки наблюдения до оси OS. Вокруг светлой точки появится темное кольцо, продолжая рассуждения подобным

образом, можно прийти к заключению, что дифракционная картина от круглого отверстия представляет собой чередование светлых и темных колец.

#### 4. Дифракция Френеля на круглом экране.

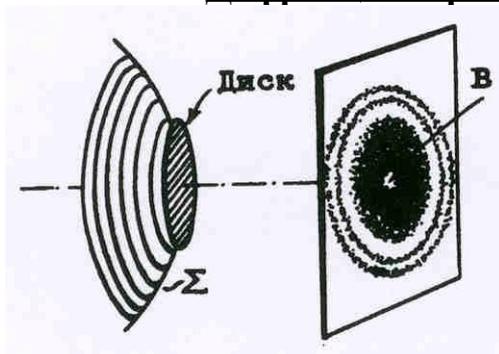


Рис.12. Дифракция на круглом экране.

Пусть препятствием служит теперь небольшой непрозрачный диск, и пусть радиус волнового фронта настолько велик, что волновая поверхность  $\Sigma$  практически совпадает с плоской поверхностью диска (рис.12). Разобьем волновой фронт на зоны способом, аналогичным изложенному в предыдущем параграфе. В точку наблюдения В приходят все колебания волнового фронта за исключением тех зон, которые закрыты диском. Это суммарное колебание на векторной диаграмме (см. рис.10) изобразится вектором  $A_d$ . Начало вектора соответствует точке, лежащей на краю диска. При изменении расстоя-

ния от диска до точки В число закрытых зон будет меняться, и начало вектора  $A_d$  станет описывать окружность вокруг центра спирали, тогда как конец вектора всегда находится в ее центре. При большом числе открытых зон длина вектора почти не изменяется. Поэтому в точке В будет наблюдаться светлое пятно (пятно Пуассона).

#### 5. Дифракция Фраунгофера.

Этот вид дифракции наблюдается в параллельных лучах, когда волновой фронт становится плоским, а зоны Френеля принимают вид узких прямоугольных полосок. Опти-

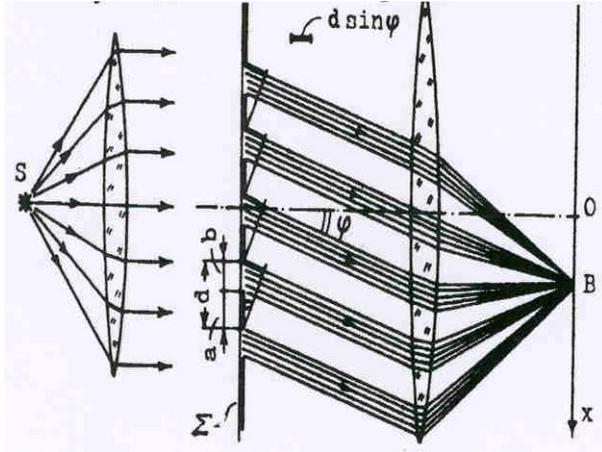


Рис.13. Дифракция Фраунгофера на щели.

ческая схема наблюдения этого вида дифракции представлена на рис.13. В роли препятствия здесь выступает узкая прямоугольная щель (узкая сторона щели лежит в плоскости рисунка). Разбиение поверхности щели на зоны Френеля осуществляется следующим образом: через край щели (точка  $M_0$ ) проводится плоскость ( $M_0 P$ ), перпендикулярная идущим в точку наблюдения лучам, а затем проводятся параллельные ей плоскости, отстоящие друг от друга на полволны. Эти плоскости, пересекая плоскость щели,

разбивают ее на зоны Френеля, которые представляют собой полосы, параллельные краю щели: границы зон изображаются точками  $M_0, M_1, M_2 \dots$ , а отрезки  $M_0 M_1, M_1 M_2$  определяют ширину первой, второй и т.д. зон. Из рис видно, что в расчете не учитывается разность хода от плоскости  $M_0 P$  до фокуса линзы  $L$ , предназначенной для создания резкого изображения на экране. Это является следствием **таутохронизма** линзы, означающего, что лучи проходят пути от  $M_0 P$  до фокуса линзы за одинаковое время. Попутно заметим, что линза  $L_k$  предназначена для создания параллельного пучка лучей. Предположим, что угол  $\varphi$  выбран таким образом, что на ширине щели укладывается целое число зон, т.е.  $MP = k\lambda/2$  ( $k = 1, 2, 3 \dots$ ). В то же время из  $\Delta M_0 P M$  следует, что  $MP = MM_0 \sin \varphi$  или  $MP = b \sin \varphi$ . Если число зон четное ( $k = 2m$ ), то выбранное направление соответствует минимуму освещенности (зоны попарно гасят друг друга), а если – нечетно ( $k = 2m-1$ ) – то максимуму. Таким образом, имеем:

$$b \sin \varphi = m\lambda \text{ - условие минимума,}$$

$$b \sin \varphi = (2\beta-1)\lambda/2 \text{ - условие максимума.}$$

При движении точки наблюдения в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка (вдоль длинной стороны щели) картина не изменяется, и на экране видны чередующиеся темные и светлые полосы. Однако интенсивности светлых полос быстро убывают так, что практически с трудом удается наблюдать более двух таких полос с каждой стороны от центрального максимума.

## 6. Дифракционная решетка.

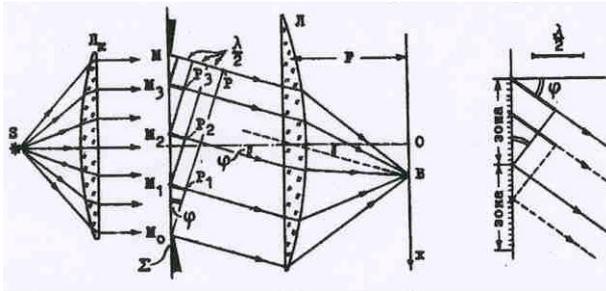


Рис.14. Дифракция на щели.

Возьмем теперь в качестве препятствия дифракционную решетку, т.е. непрозрачную пластинку с одинаковыми параллельным равноотстоящими друг от друга щелями(рис.14). Обозначим, как и прежде, ширину щели  $b$ , а ширину непрозрачного участка –  $a$ . Величину  $d = a + b$  назовем периодом или постоянной решетки. Выбирая ту же волновую поверхность, что и при рассмотрении дифрак-

ции на одной щели, и применяя принцип Гюйгенса-Френеля, можно заметить, что теперь в каждой точке экрана для наблюдений собираются лучи, идущие от всех  $N$  щелей. Для вычисления результата сложения выделим в каждой щели одинаковые точки(например- верхние).Две таких точки в соседних щелях при заданном угле  $\varphi$  имеют разность фаз, равную

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \varphi .$$

В точке наблюдения колебания от всех щелей сложатся

в одинаковых фазах, если разность фаз  $\theta$  равна  $2\pi n$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ), т.е.  $\theta =$

$$\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \varphi = 2\pi n, \text{ откуда получается условие для максимумов } d \sin \varphi = n \lambda .$$

Можно показать, что кроме этих максимумов существуют еще другие, положения которых зависит от числа щелей, но интенсивность их крайне не значительна. Чтобы различать эти максимумы с теми, которые удовлетворяют условию  $d \sin \varphi = n \lambda$ , принято называть их дополнительными максимумами, а максимумы, соответствующие условию  $d \sin \varphi = n \lambda$  - главными. Значение числа  $n$  определяет порядок главного максимума (первый максимум, второй и т.д.) Между максимумами должны располагаться минимумы освещенности, но

с практической точки зрения они не представляют особого интереса и в нашем курсе не рассматриваются.

Полученные условия главных максимумов справедливы для одной длины волны света. Если же свет – белый, то для каждого из его составляющих цветов условия максимумов будут соответствовать различным углам  $\varphi$ , т.е. на экране получится набор цветных полос. Другими словами, дифракционная решетка позволяет анализировать спектральный состав световых лучей. Поэтому решетку можно использовать как спектральный аппарат. Все спектральные аппараты характеризуются такими величинами как дисперсионная область, угловая дисперсия и разрешающая способность.

Дисперсионная область  $G$  определяет ширину спектрального интервала от  $\lambda$  до  $\lambda + \Delta\lambda$ , в котором максимумы для различных волн не перекрываются друг с другом. Величина  $G = \lambda/n$ , где  $n$  - порядок максимума.

Угловая дисперсия  $D$  определяет угловое расстояние между волнами, длина которых отличается на единицу (длины). Выражение для определения  $D$  можно получить, дифференцируя условия главных максимумов:  $d \cos \varphi = \lambda n d$ . Отсюда  $D$  определяется как

$$D = \frac{n}{d \cos \varphi}.$$

Под разрешающей способностью  $A$  подразумевается возможность спектрального аппарата различать линии, соответствующие близким значениям длин волн  $\lambda$  и  $\lambda + \delta\lambda$ . Она определяется выражением

$$A = \frac{\lambda}{\delta\lambda}.$$

## **7. Дифракция рентгеновских лучей.**

Рентгеновскими лучами называют электромагнитное излучение, длина волн которого примерно равна  $10^{-10}$  м. Длина волны рентгеновских лучей много меньше световых волн,

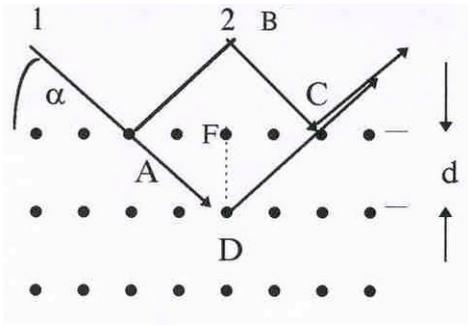


Рис.15. Дифракция рентгеновских лучей.

поэтому наблюдать дифракцию этих лучей в стандартных схемах не удастся. Препятствиями, размеры которых сравнимы с длиной волны рентгеновских лучей, могут служить лишь межатомные расстояния в твердых телах. Схема дифракции показана на рис.15. Атомы кристалла расположены в правильном порядке, образуя плоскости, отражающие лучи. Коэффициент преломления лучей близок к единице, и лучи отражаются от различных плоскостей без заметного преломления ( $n_p \approx 1$ ). Обозначая угол скольжения лучей через  $\alpha$ , а расстояние между отдельными слоями через  $d$ , можно

заметить, что разность хода между интерферирующими лучами  $\delta = AD + DC - BC$ . Из  $\triangle ADF$   $AD = FD/\sin\alpha$ ;  $AF = dtg\alpha$ , а из  $\triangle ABC$   $BC = 2AF\cos\alpha$ . С учетом того, что  $AD = DC$ , имеем:

$$\delta = \frac{2d}{\sin\alpha} - \frac{2d\cos^2\alpha}{\sin\alpha} = 2d\sin\alpha.$$

Условие максимума будет выполняться при  $2d\sin\alpha = k\lambda$ , где  $k$  – целое число. Полученная формула носит название формулы **Вульфа – Брэггов**.

Рассмотренный случай дифракции относится к конкретным межатомным плоскостям и монохроматическому излучению, что заметно упрощает анализ условий образования максимумов. В действительности же межатомные плоскости могут быть ориентированы произвольным образом, причем в роли интерферирующих лучей могут выступать лучи, отраженные не только от соседних плоскостей. Кроме того, следует иметь в виду, что реальные кристаллические структуры имеют три измерения, каждому из которых могут соответствовать различные условия образования максимумов. Тем не менее рентгенографический метод анализа кристаллов нашел широкое применение в петрографии, рентгеноструктурном анализе и ряде других приложений.

## ТЕМА: Поляризация света. Взаимодействие света с веществом.

### 1. Явление поляризации.

Обычно считается, что понятие поляризации связано с сохранением неизменной ориентации плоскости колебаний. Говорить о поляризации имеет смысл только для поперечных колебаний. Свет, как мы знаем, является электромагнитной волной, а эти волны – поперечны и поляризованы так, что, казалось бы, световые колебания всегда должны быть поляризованы. Однако мы знаем, что световые волны испускаются отдельными цугами, продолжительность которых не превышает  $10^{-8}$  сек. Процесс испускания является слу-

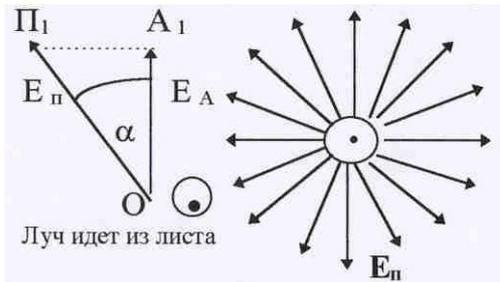


Рис.16. Прохождение света через анализатор и поляризатор.

чайным, и фаза испущенной волны, а также ориентации векторов  $E$  и  $B$  в плоскости, перпендикулярной направлению излучения, могут быть любыми. Т.к. вектора  $E$  и  $B$  в волне жестко связаны друг с другом, имеет смысл рассматривать лишь один из них (пусть, для определенности, это будет вектор  $E$ ). В среднем, в любой волне все допустимые ориентации вектора  $E$

равновероятны (см. рис.16). Существуют приспособления, называемые поляризаторами, которые обладают способностью пропускать через себя световые лучи

только с одним направлением плоскости колебаний электрического вектора  $E$ , так что на выходе поляризатора свет становится плоско (линейно) поляризованным. Человеческий глаз не в состоянии обнаружить, поляризован свет или неполяризован. Для того, чтобы обнаружить это, необходимо использовать второе такое же приспособление, которое называют анализатором. Если направление пропускания анализатора и поляризатора совпадают, луч света на выходе из анализатора имеет максимальную интенсивность. При произвольном угле  $\alpha$  между направлениями анализатора и поляризатора (см.рис.) амплитуда световых колебаний, выходящих из анализатора  $E_A = E_{\Pi} \cos\alpha$ , где  $E_{\Pi}$  – амплитуда колебаний на выходе из поляризатора. В электромагнитной волне плотность энергии (интенсивность) пропорциональна квадрату амплитуды колебаний  $E$ , т.е.  $I_{\Pi} \sim E_{\Pi}^2$  и  $I_A \sim E_A^2$ . На основании этого получаем:

$$I_A = I_{\Pi} \cos^2 \alpha .$$

Это соотношение называется **законом Малюса**.

## 2. Закон Брюстера.

Простейшим приспособлением для поляризации света может служить прозрачное диэлектрическое зеркало. Пусть на диэлектрик (см. рис.17) падает луч естественного све-

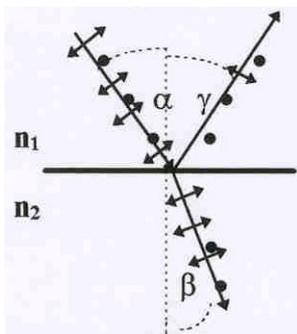


Рис.17.

Поляризация света при отражении и преломлении.

та. Обозначим через  $n_2$  коэффициент преломления диэлектрика, а через  $n_1$  – коэффициент преломления среды, откуда падает свет ( $\alpha$  - угол падения,  $\beta$  - угол преломления). Условимся изображать направление колебаний вектора  $E$  в виде точек или тонких черточек, где точка изображает направление вектора, перпендикулярное плоскости чертежа, а черточка означает, что вектор  $E$  лежит в плоскости чертежа. В естественном свете равновероятны все направления колебаний  $E$ , что изображается в виде того, что количество точек и черточек одинаково. Опыт показывает, что отраженный и преломленный лучи становятся частично поляризованными, причем в отраженном свете преобладающими становятся колебания, плоскость которых перпендикулярна плос-

кости чертежа, а в преломленном предпочитают оказываться направления колебаний в плоскости чертежа ( на рис. это изображается в виде преимущества числа точек или черточек). Существует угол падения, при котором отраженные лучи становятся полностью поляризованными. Этот угол называется углом Брюстера, его значение связано с отношением  $n_2/n_1 = n_{21}$ , т.е. относительным показателем преломления:

$$\operatorname{tg} \alpha = n_{21} .$$

Качественное объяснение этого закона следует из рассмотрения микроскопической картины распространения света в веществе. Рассмотрим упрощенную модель взаимодействия света с веществом, согласно которой переменное электрическое поле световой волны приводит в движение атомы вещества. Атом же представим как диполь, где роль отрицательного заряда

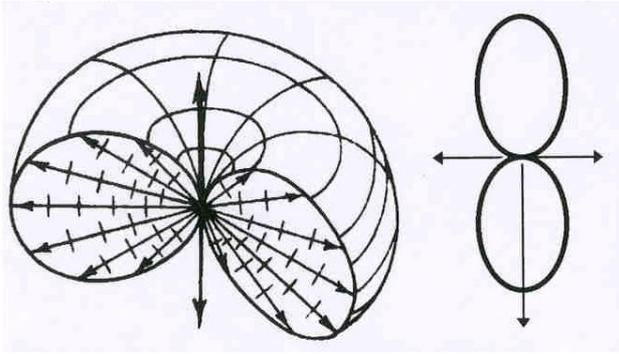


Рис.18. Индикатрис излучения диполя.

играет внешний электрон, а вся остальная часть атома рассматривается как положительный заряд (ион). Т.к. масса положительного иона во много раз (более 2000) больше, чем масса электрона, можно рассматривать лишь колебания электрона. Строгая теория электромагнетизм показывает, что колеблющийся диполь становится излучателем электромагнитных волн, причем интенсивность излучения различна в разных направлениях. Для иллюстрации анизотропии излуча-

тельной способности диполя строится диаграмма (индикатриса), на которой интенсивность излучения в заданном направлении изображается в виде вектора. Длина этого вектора и характеризует интенсивность излучения. Пространственное изображение индикатрисы приведено на рис.18. В правой части рисунка показано сечение диаграммы вертикальной плоскостью, проходящей через центр диаграммы.

Положения рассмотренной модели применим для объяснения закона Брюстера. В падающем на границу раздела двух сред естественном свете вектор  $E$  принимает всевозможные направления (см.рис.16), но без ограничения общности можно рассматривать лишь два:

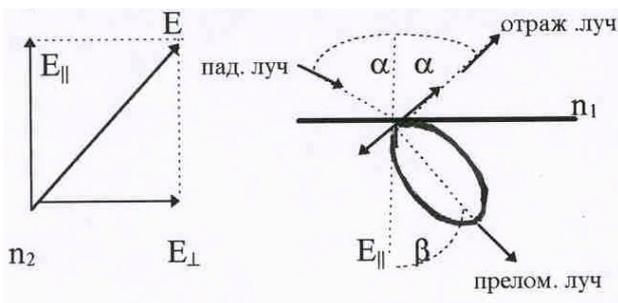


Рис.19. К выводу закона Брюстера.

$E_{\parallel}$  и  $E_{\perp}$ , т.к. любой вектор  $E$  можно представить как их сумму (см. левую часть рис.19). Вектор  $E$  соответствует колебаниям, которые происходят в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа, а  $E_{\parallel}$  характеризует колебания в этой плоскости. Представляет интерес рассмотреть лишь составляющую  $E_{\parallel}$ . Если диполь излучает волну  $E$  в направлении преломленного луча (пра-

вая часть рис.19), то из диаграммы направленности следует, что в направлении, перпендикулярном этому лучу, никакого излучения не происходит. В этом направлении излучаются лишь волны с напряженностью  $E$ . Из этого следует, что если луч преломленный и луч отраженный перпендикулярны друг другу, то в отраженном свете полностью отсутствуют колебания с  $E$ . Из рисунка видно, что  $\beta + \alpha + 90^\circ = 180^\circ$ , или  $\beta + \alpha = 90^\circ$ , тогда как из закона преломления следует, что  $\sin \alpha = n_{21} \sin \beta$ . Подставляя в закон преломления  $\beta = 90^\circ - \alpha$ , получим  $\sin \alpha = n_{21} \sin(90^\circ - \alpha) = n_{21} \cos \alpha$ , т.е.

$$\text{tg} \alpha = n_{21}.$$

### 3. Поглощение света.

При прохождении света через вещество часть энергии световой волны поглощается, переходя во внутреннюю энергию вещества. Для оценки величины этих потерь рассмотрим световой поток, распространяющийся вдоль оси  $x$  (рис.20). Опыт показывает, что при прохождении очень тонкого слоя вещества толщиной  $dx$  относительная убыль

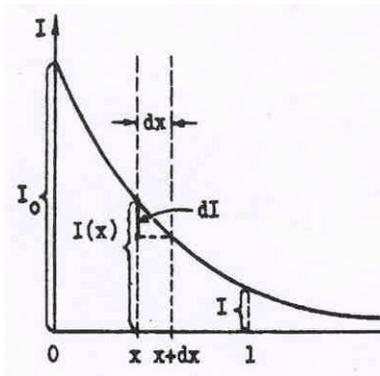


Рис.20. Изменение интенсивности света при его поглощении.

интенсивности, т.е. отношение изменения интенсивности  $dI$  в этом слое к интенсивности падающего света  $I(x)$  (см.рис.20), пропорциональна толщине слоя:

$$\frac{dI}{I} = -K dx,$$

где коэффициент  $K$ , зависящий от свойств вещества, называется коэффициентом поглощения. Знак минус отражает убывание интенсивности с ростом  $x$ . Изменение интенсивности света при прохождении слоя конечной толщины  $x$  находится путем прямого интегрирования вышеприведенной формулы:

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = - \int_0^x K dx.$$

Потенцируя последнюю формулу, получим известный закон Бугера:  
 $I = I_0 e^{-Kx}$

#### 4. Рассеяние света.

Плоская волна, распространяющаяся в однородной среде, остается плоской. Однако если среда неоднородна и в ней имеются включения с другими оптическими свойствами, то кроме волны, распространяющейся в первоначальном направлении, появляются волны, рассеянные в стороны. Эти волны уносят часть энергии и уменьшают интенсивность первоначального луча. Характер рассеяния зависит от размеров и природы неоднородностей. Если их размеры больше длины волны, то наблюдается чисто геометрическое рассеяние. Это касается прежде всего твердых частиц, взвешенных в воздухе. Падающий на разные участки поверхности частицы солнечный свет отражается под различными углами. Если при этом спектральный состав света не меняется, то рассеянный свет остается белым (примером этого может служить белый цвет неба в пустынях, когда восходящие воздушные потоки переносят в верхние слои атмосферы мелкие частицы песка). В целом наблюдаемая картина рассеяния очень чувствительна к размерам и форме неоднородностей (радуга и гало вокруг солнца, вызванные наличием в земной атмосфере соответственно капелек и льдинок).

Если размеры неоднородностей существенно меньше длин волн света, то интенсивность рассеянного света удовлетворяет закону Рэлея:  $I_{\text{рас}} \sim I_0 \omega^4$ , где  $\omega$  - частота падающего света, причем интенсивность рассеянного света различна по разным направлениям (т.е. анизотропна). Сильная зависимость интенсивности рассеянного света от частоты означает,

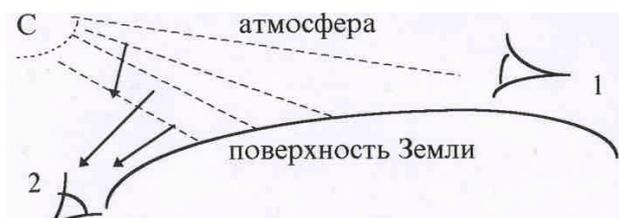


Рис.21. Рассеяние света в атмосфере.

что существенно сильнее рассеиваются волны с большей частотой. В частности, если через среду идет волна от источника белого света (от Солнца - см.рис.21), то при наблюдении сбоку среда кажется голубоватой, а сам источник на просвет выглядит более красным. Этим объясняется голубой цвет неба и красный цвет зари. Разные цветовые оттенки получаются из-за разных геометри-

ческих расположениях источника и наблюдателя. Так в глаз наблюдателя 1 ( см.рис.21) приходит прямой луч, тогда как наблюдатель 2 видит, в основном, рассеянные лучи.

### 5. Дисперсия света.

Дисперсией называется зависимость скорости распространения световой волны в среде от частоты. Поскольку скорость волны однозначно связана с показателем преломления среды ( $v = c/n$ ;  $n = \sqrt{\epsilon}$ ), то нашей задачей будет выяснение характера зависимости диэлектрической постоянной от частоты. Здесь уместно напомнить, что  $\epsilon = 1 + \kappa$  ( $\kappa$  - диэлектрическая восприимчивость, определяющая соотношение между поляризацией вещества  $P$  и действующем электрическим полем  $E$ :  $P = \epsilon_0 \kappa E$ ). В то же время величина вектора поляризации определялась как суммарный дипольный момент единичного объема:  $P = Nq\bar{x}$ , где величина  $q\bar{x}$  характеризует дипольный момент каждой молекулы диэлектрика. При решении задачи будем

$$\bar{x} = \frac{eE}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2\beta^2}},$$

пользоваться той же моделью, что применялась ранее при рассмотрении закона Брюстера. Под действием переменного электрического поля световой волны расстояние электрона до положительного иона периодически изменяется, т.е. электрон совершает вынужденные колебания под действием внешней периодической силы. Вид этого уравнения, и его решение уже изучались ( см уравнение колебаний в контуре). Поэтому можно сразу написать выражение для амплитуды колебаний электрона в атоме:

где  $\beta$  характеризует затухание колебаний, а  $\omega_0$  может рассматриваться как собственная частота колебаний электрона в атоме. Для упрощения математических выкладок будем пренебрегать затуханием, т.е. положим  $\beta = 0$ . Тогда величина поляризации равна:

$$P = Ne^2 \frac{E}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}.$$

С другой стороны, выше указывалось, что  $P = \epsilon_0 \kappa E$ , поэтому

$$\kappa = Ne^2 \frac{1}{m\epsilon_0(\omega_0^2 - \omega^2)}.$$

Тогда 
$$\epsilon = 1 + \kappa = 1 + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m(\omega_0^2 - \omega^2)}; \quad \epsilon = n^2.$$

Таким образом, имеем:

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m (\omega_0^2 - \omega^2)}$$

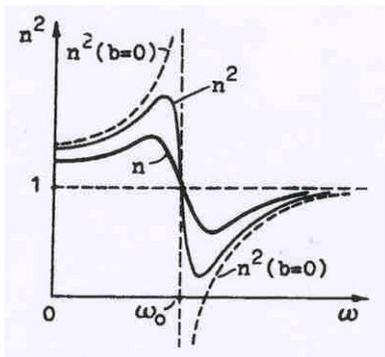


Рис.22  
Частотная зависимость показателя преломления.

График частотной зависимости в сделанных упрощениях показан на рис.22. Из рис. видно, что вдали от резонансной частоты показатель преломления (точнее  $n^2$ ) возрастает пропорционально квадрату частоты. Такая частотная зависимость получила название нормальной дисперсии. Когда же частота внешних колебаний приближается к частоте собственных, амплитуда возрастает неограниченно. Ясно, однако, что этот результат есть следствие наших упрощений. При наличии затухания кривая имеет конечный максимум ( см. рис.22 ). Вблизи резонансной кривой показатель преломления имеет другой характер зависимости. Говорят, что - это область аномальной дисперсии, т.к. для нее величина  $n^2$  падает с ростом частоты, причем это наблюдается на фоне повышения поглощения света (амплитуда колебаний электрона возрастает).

## КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

### 1. Экспериментальное обоснование основных идей квантовой теории.

Противоречия классической физик. Большое количество оптических явлений объясняется тем, что внутри атомов и молекул имеются электроны, совершающие колебания и испускающие свет той же самой частоты  $\nu$ , с какой они колеблются сами. Это предположение подтверждается выводами из классической электродинамики, что электроны, движущиеся с ускорением излучают электромагнитные волны. Примеры излучения электрона, движущегося ускорено: 1. Тормозное излучение электроном сплошного спектра в рентгеновском диапазоне, возникающие при остановке электрона. 2) Излучение в бетатронах и синхротронах. В этих приборах электрон, двигаясь под влиянием вихревого электрического поля по окружности с энергией в  $7 \cdot 10^7$  эВ излучает в видимом диапазоне.

Приведенные примеры указывают на совпадение выводов из классической электродинамики с опытными данными. Однако, наряду с этим, по мере развития физики стали накапливаться и такие факты, которые не согласовывались ни с классической теорией излучения, ни с волновыми представлениями о природе света. Первое явное несоответствие выводов из классической теории излучения с экспериментальными данными обнаружилось при изучении распределения энергии по длинам волн в спектре абсолютно черного тела. В качестве второго примера, указывающего на неприменимость классической теории излучения, это тормозное рентгеновское излучение. Опыт показывает, что кривые распределения энергии в сплошном спектре рентгеновских лучей имеет красную границу со стороны коротких длин волн, положение которой зависит от скорости ударяющихся об антикатод электронов и не зависит от материала антикатада. Эти опытные факты удалось объяснить только гипотезой Планка об облучении энергии квантами  $\epsilon = h\nu$ .

Проблемы теплового излучения. Самым распространенным в природе является тепловое излучение, т.е. испускание электромагнитных волн за счет внутренней энергии. Все остальные виды свечения, возбуждаемые за счет любого вида энергий, (кроме внутренней), объединяются под общим названием «люминисценция».

Тепловое излучение рассматривается для тел нагретых до различной температуры и помещенных в полость с идеально отражающими внутренними стенками. Если внутри полости будет вакуум, тела будут обмениваться между собой энергией посредством излучения. При этом излучение каждого тела зависит только от собственной температуры, а не от температуры окружающих тел, более теплые тела будут излучать больше, чем

поглощать, а менее нагретые тела будут больше поглощать, чем излучать. Поскольку электромагнитные волны распространяются с конечной скоростью, то пространство внутри полости будет всегда заполнено энергией излучения. Опыт показывает, что обязательно установится стационарное состояние или равновесие, при котором все тела приобретают одинаковую температуру, т.е. поглощают в единицу времени ровно столько энергии, сколько отдают ее, а плотность излучения в пространстве между ними достигает некоторой определенной величины, соответствующей данной температуре. Этот факт является совершенно необъяснимым с позиций классической физики.

Абсолютно черное тело. Тело, которое полностью поглощает при любых температурах электромагнитное излучение любого состава, называют абсолютно черным. Для него поглощательная способность равна единице, независимо от температуры.

**Свойства:** а) все абсолютно черные тела при данной температуре обладают одним и тем же распределением излучаемой энергии по длинам волн; б) светимость всех абсолютно черных тел одинаково меняется с температурой.

В природе не существует тел, совпадающих по своим свойствам с абсолютно черным.

*Модель абсолютно черного тела.* Длинная и узкая трубка из тугоплавкого материала. Внутри трубки, для избежания однократных отражений при косых попадания света, делается ряд перегородок с отверстиями.

Трубка вставляется внутрь электрической печки, с помощью которой ее стенки могут быть прогреты до необходимой температуры  $T$ .

Законы теплового излучения. Первый крупный шаг в теоретическом исследовании свойств равновесного излучения был сделан Кирхгофом, который термодинамическим путем показал, что при постоянной температуре излучательная способность черного тела  $r_\lambda$  есть определенная функция от длины волны и температуры.

Из термодинамических рассуждений можно установить ряд общих законов излучения абсолютно черного тела.

Первый закон. (Закон Стефана-Больцмана) Интегральная энергетическая светимость абсолютно черного тела  $R$ , возрастает

пропорционально четвертой степени абсолютной температуры тела:

$$R_{\lambda} = \int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4, \text{ где } \sigma - \text{ постоянная Стефана-Больцмана.}$$

Второй закон (закон смещения Вина): Длина волны  $\lambda_{\max}$ , на которую приходится максимум излучательной способности меняется обратно пропорционально абсолютной температуре:

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

где  $b$  – постоянная Вина.

Третий закон: Максимальная излучательная способность абсолютно черного тела возрастает пропорционально пятой степени абсолютной температуры:

$$r_{\lambda_{\max}} = CT^5,$$

где  $C = \text{const}$ .

Эти три закона не решили задачу об отыскании математического выражения закона распределения энергии в спектре абсолютно черного тела.

Гипотеза Планка. Для объяснения излучения абсолютно черного тела Планк выдвинул гипотезу, коренным образом противоречащую классической физике, а именно – энергия микроскопической системы (атомы и молекулы) может принимать только определенные дискретные значения. Планк полагал, что центры излучения можно моделировать линейными гармоническими осцилляторами, которые могут обмениваться энергией с окружающим электромагнитным полем. Формулировка гипотезы Планка: осцилляторы могут находиться только в некоторых избранных состояниях, в которых их энергия является целым кратным наименьшего количества энергии  $\epsilon_0$ :  $\epsilon_0, 2\epsilon_0, \dots, n\epsilon_0, \dots$ , где  $\epsilon_0 = h\nu$  – квант энергии, здесь  $\nu$  – частота колебаний осциллятора,  $h$  – постоянная Планка.

На основании этой гипотезы Планк вывел формулу для объяснения спектральной плотности излучения  $r_{\nu T} = \frac{\rho \omega^3}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{1}{e^{\rho \omega / kT} - 1}$ . Формула Планка дает исчерпывающее описание равновесного теплового излучения.

Световые кванты. Рассматривая случайные флуктуации плотности излучения Эйнштейн, пользуясь статистической термодинамикой и формулой Вина для плотности излучения справедливой для высоких частот

$$r_\nu d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{kT}} d\nu$$

нашел, что излучение с достаточно короткими длинами волн ведет себя так, как если бы оно состояло из  $n = E/h\nu$  независимых корпускул, или квантов света, которые называли фотонами.

### Фотоэлектрический эффект .

Фотоэлектрическим эффектом называется испускание электронов веществом под действием света. Открыл Г.Герц в 1887 г. Исследования А.Г. Столетова фототока в зависимости от приложенной разницы потенциалов между электродами. Выводы: 1) наибольшее действие оказывают ультрафиолетовые лучи; 2) сила тока возрастает с увеличением освещенности пластины; 3) испускаемые под действием света частицы имеют отрицательный заряд. Для обращения фототока в нуль нужно приложить задерживающее напряжение.

В 1905 г. Эйнштейн показал, что все закономерности фотоэффекта объясняются излучением и поглощением света квантами. Закон сохранения энергии для фотоэффекта: энергия поглощенного кванта расходуется на совершение работы выхода электрона из металла и придания электрону кинетической энергии. Существует красная граница фотоэффекта.  $h\nu = A + eV = A + mv^2/2$ .

Опыт Боте подтвердил существование фотонов. Энергия и импульс фотона. Давление света. Отраженный фотон сообщает стенке импульс  $2p$ . Опыты Иоффе и Добронравова подтверждают корпускулярные свойства света.

Эффект Комптона. В 1923 г. Комpton Исследуя рассеяние рентгеновских лучей различными веществами обнаружил, что в рассеянных лучах наряду с первоначальной длиной волны содержатся лучи большей длины волны.  $\lambda - \lambda_0 = \Delta\lambda = \lambda_c(1 - \cos\varphi)$ . В эффекте Комптона отчетливо проявляются корпускулярные свойства электромагнитного излучения. Выполняются законы сохранения энергии и импульса для упругого столкновения рентгеновского фотона и свободного электрона. Электроны отдачи. Комптоновская длина волны. Единство корпускулярных и волновых свойств электромагнитного излучения. Длинноволновое излучение проявляет более волновые свойства, а коротковолновое – корпускулярные.

Правило частот Бора. Ядерная модель атома в сочетании с классической механикой и электродинамикой оказались неспособными объяснить ни устойчивость атома, ни характер атомного спектра. Выход их создавшегося тупика был найден в 1913 г. Бором, введением предположений противоречащих классическим представлениям. Допущения, сделанные Бором содержатся в двух высказанных им постулатах.

1. Из бесконечного множества электронных орбит, возможных с точки зрения классической механики, осуществляются в действительности только некоторые дискретные орбиты, удовлетворяющие определенным квантовым условиям. Электрон, находящийся на одной из этих орбит, несмотря на движение с ускорением, не излучает электромагнитных волн.
2. Электромагнитные волны излучаются или поглощаются в виде светового кванта энергии  $h\nu$  при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое. Величина светового кванта равна разности энергий тех стационарных состояний, между которыми совершается квантовый скачок электрона:  $h\nu = E_n - E_m$ .

Существование дискретных энергетических уровней атома подтверждается опытами Франка и Герца по упругому и неупругому взаимодействию электронов с атомами паров ртути.

Гипотеза де-Бройля. В 1924 г. де-Бройль выдвинул гипотезу, что дуализм не является особенностью одних только оптических явлений, а имеет универсальное значение. » В оптике – писал он, - в течение столетия слишком пренебрегали корпускулярным способом рассмотрения по сравнению с волновым; не делалось ли в теории вещества обратная ошибка?» Допуская, что частицы вещества наряду с корпускулярными свойствами имеют также и волновые, де-Бройль применил для частиц вещества те же правила перехода от одной картины к другой, как и в случае света: фотон обладает энергией  $E = h\nu$  и импульсом  $p = h/\lambda$ ; движение частиц связано с волновым процессом. Частица обладает длиной волны  $\lambda = h/mv$  и частотой  $\nu = E/h$ . Экспериментальное подтверждение гипотезы де-Бройля было получено в опытах Девиссона и Джермена в 1927 г. по отражению электронов от монокристалла никеля. Было получено блестящее совпадение длины волны вычисленной и измеренной в опыте по брегговскому отражению. В опытах Томсона и независимо от него Тартаковского получена дифракционная картина при прохождении электронного пучка через металлическую фольгу.

Микрочастица в двухщелевом интерферометре. Микрочастицами называют элементарные частицы (электроны, протоны, нейтроны, фотоны и др.), а также сложные частицы, образованные из сравнительно небольшого числа элементарных частиц (молекулы, атомы, ядра атомов и др.). Своеобразие свойств микрочастиц отчетливее всего обнаруживается в следующем мысленном эксперименте. Направим на преграду с двумя узкими щелями параллельный пучок моноэнергетических электронов. За преградой поставим фотопластинку.

Поочередное открывание щелей 1 и 2 дает соответственно кривые 1 и 2. При открытии обеих щелей одновременно получается картина на рис. в. Картина почернения фотопластинки в этом случае не эквивалентна положению первых двух картин. Она оказывается аналогичной картине, получающейся при интерференции двух когерентных световых волн. Характер картины свидетельствует о том, что при движении каждого электрона оказывают влияние оба отверстия. Такой вывод не совместим с представлениями о траекториях. Если бы электрон в каждый момент времени находился в определенной точке пространства и двигался по траектории, он проходил бы через определенное отверстие – первое или второе. Явление же дифракции доказывает, что в прохождении каждого электрона участвуют оба отверстия.

Соотношения неопределенностей Гейзенберга. В 1927 г. Гейзенберг установил соотношение неопределенностей, раскрывающее существенную особенность квантово-механической теории. Это соотношение для каждой пары координата-импульс имеет вид  $\Delta p_x \Delta x \geq \hbar/2$ ,  $\Delta p_y \Delta y \geq \hbar/2$ ,  $\Delta p_z \Delta z \geq \hbar/2$ , и для энергии-времени  $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$ .

Границы применимости классической механики. Соотношение неопределенности указывает в какой мере можно пользоваться понятиями классической механики применительно к микрочастицам, в частности, с какой степенью точности можно говорить о траекториях микрочастиц.  $\Delta x \Delta v_x \geq \hbar/2m$ .

Сами понятия координаты и импульса заимствованы из классической физики. Ими можно пользоваться и при квантово-механическом описании, однако соотношение неопределенностей накладывает при этом существенные ограничения, указывают пределы применимости классических представлений при описании атомных явлений.

## **2. Квантовое состояние.**

Состояние микрочастицы в квантовой механике: волновая функция и ее статистические смысл. В классической механике состояние частицы задается координатой, траекторией и импульсом в данный момент времени, т.е. только корпускулярными характеристиками. В квантовой механике учитываются волновые свойства, и поэтому состояние частицы задается волновой функцией. В 1926 г. Шредингер сопоставил движению микрочастицы комплексную волновую функцию координат и времени, обозначив ее греческой буквой  $\Psi$  - пси.

$$\Psi(x,y,z,t) = \Psi(x,y,z)\exp-iEt/h.$$

Пси-функция характеризует состояние микрочастицы и представляет собой волну вероятности. Поэтому, квантово-механическое описание явлений носит статистический характер.  $\Psi\Psi^*dv$  – есть вероятность нахождения частицы в объеме  $dv = dx \cdot dy \cdot dz$ , т.е. в области с координатами  $x$  и  $x+dx$ ,  $y$  и  $y+dy$ ,  $z$  и  $z + dz$ . В общем случае: квадрат модуля комплексной функции  $\Psi$  есть плотность вероятности найти частицу в объеме  $dv$  около точки с

$$\text{координатами } x,y,z. \text{ Условие нормировки } \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi \Psi^* dv = 1$$

Суперпозиция состояний. В квантовой механике вводится понятие квантовых ансамблей, объединяющих совокупность тождественных квантовых состояний, описываемых одной и той же волновой функцией  $\Psi$ . С помощью квантового ансамбля можно описать электронный пучок, поток фотонов и т.д. Характерным отличием квантового ансамбля от классического является его когерентность, связанная с принципом суперпозиции. Допустим, что частицы имеют определенное распределение по различным квантовым состояниям:  $|C_{n1}|^2 = N_{n1}$ ,  $|C_{n2}|^2 = N_{n2}$ ,  $|C_{n3}|^2 = N_{n3} \dots$ , причем  $\sum_i N_{ni} = N$ . В последнем случае движение частиц, находящихся, например, в состояниях  $n = n_1$  и  $n = n_2$  нельзя рассматривать независимо друг от друга, потому что, если возможны состояния  $\Psi_{n1}$  и  $\Psi_{n2}$ , то общая волновая функция линейного уравнения Шредингера будет представлять собой суперпозицию (наложение) отдельных состояний, т.е.  $\Psi(t) = C_{n1}\Psi_{n1}(t) + C_{n2}\Psi_{n2}(t) + \dots$

Это существенно при определении полной вероятности состояния, пропорциональной произведению  $\Psi(t)\Psi^*(t)$ . В этом произведении наряду с  $\Psi_{n1}(t)\Psi_{n1}^*(t)$  должны появляться также и смешанные члены вида  $\Psi_{n2}(t)\Psi_{n1}^*(t)$ ; или каждая частица будет обладать определенной вероятностью нахождения в обоих квантовых состояниях. Наличие смешанных членов, которые будут

отличны от нуля для когерентных  $\Psi$ -волн ( чистый ансамбль), ведет к интерференции де-бройлевских волн, что не имеет места для некогерентных волн (смешанный ансамбль), т.е. в чистом ансамбле складываются волны, а в смешанном – интенсивности. Исследование квантовых ансамблей дает статистическую интерпретацию результатов волновой теории. Суперпозиция состояний определяется не только модулями коэффициентов  $c_i$  но и их относительными фазами, поэтому она означает интерференцию состояний  $\Psi_i$ . Возможность такой интерференции проявляется в дифракции микрочастиц в двухщелевом интерферометре. Суперпозиция состояний отражает волновую природу микрочастиц.

### **3. Уравнение Шредингера.**

Временное уравнение Шредингера. Временное уравнение Шредингера, описывающие состояния, меняющиеся со временем, имеет вид

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + U\Psi ,$$

$m$  – масса частицы,  $i$  – мнимая единица,  $\nabla^2$  оператор Лапласа.

$$\nabla^2 \Psi = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} ,$$

$U$  – потенциальная энергия частицы.

Это уравнение, являющееся относительно времени  $t$  линейным дифференциальным уравнением первого порядка, отражает принцип причинности. С помощью этого уравнения можно, зная состояние  $\Psi(0)$  в начальный момент времени, определить волновую функцию в любой последующий момент времени.

### Стационарное уравнение Шредингера.

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + U\psi = E\psi ,$$

здесь  $E$  – полная энергия частицы.

Э. Шредингер получил эти уравнения в 1926 г. на основе оптико-механической аналогии. Уравнение Шредингера позволяет найти  $\Psi$ -функцию данного состояния и, следовательно, определить вероятность нахождения частицы в различных точках пространства.

Простейшие задачи квантовой механики: свободная частица, частица в одномерной прямоугольной бесконечной глубокой «яме», туннельный эффект.

Основные понятия.

1. Стандартные условия – совокупность требований по отношению к  $\Psi$ -функции: она должна быть однозначной, непрерывной и конечной (за исключением особых точек), она должна иметь непрерывную и конечную производную.
  2. Собственные значения – избранные значения параметра  $E$  (полная энергия частицы), для которых уравнение Шредингера имеет решения, удовлетворяющие стандартным условиям.
  3. Собственные функции – решения, соответствующие собственным значениям  $E$ , называются собственными функциями.
  4. Совокупность собственных значений величины  $E$  называется ее *спектром*. Если совокупность собственных значений образует дискретную последовательность, то спектр называется *дискретным*. Если собственные значения образуют непрерывную последовательность, то *спектр* называется *сплошным*.
1. Свободная частица – это одна частица, движущаяся в отсутствие действия сил в направлении движения, например, оси  $X$ . Уравнение Шредингера

$$\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0,$$

есть волновое уравнение для свободной микроскопической частицы. Величина  $E = T$  – кинетическая энергия, т.к.  $U = 0$ . В этом случае уравнение

Шредингера принимает вид  $-\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \frac{d^2 \psi}{dx^2} = E \psi$ .

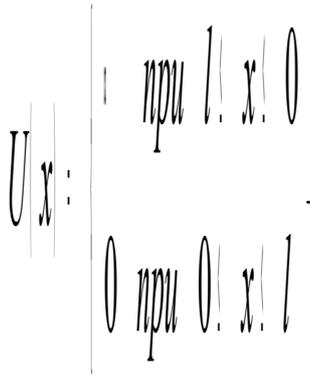
Частное решение этого уравнения:  $\psi_{1,2} = e^{\pm \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}} \cdot x}$ .

Это решение удовлетворяет стандартным условиям конечности и непрерывности при всех положительных значениях  $E > 0$ . Таким образом, спектр собственных значений энергии *сплошной*. Собственные функции при сплошном спектре нельзя нормировать обычным способом.

2. Частица в одномерной прямоугольной, бесконечно глубокой потенциальной яме.

Пусть микрочастицы находятся внутри прямоугольной потенциальной ямы шириной  $l$ , с бесконечно высокими стенками.

Определим уровни энергии и волновую функцию, описывающую ее состояния. Рассматривается одномерный случай. Значение потенциальной энергии изменяется в зависимости от координаты частицы:



Внутри ямы  $U(x) = 0$ . Уравнение Шредингера для одновременного движения, параллельно оси  $x$ :

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0.$$

Введем обозначения  $k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$ .

Тогда внутри ямы уравнение будет иметь вид  $\frac{d^2\psi}{dx^2} + k^2\psi = 0$ .

Используя граничные условия  $\Psi(0) = 0$ ;  $\Psi(l) = 0$ , получим решение уравнения (собственные функции)  $\psi_n = \sin n \frac{\pi x}{l}$  и собственные значения (значения энергии)

$$E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2ml^2}, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots$$

Отсюда следует, что энергия частицы принимает *дискретный (квантованный)* ряд значений. С уменьшением ширины ямы  $l$  интервал между соседними уровнями возрастает. Квантование энергии при этом проявляется в более сильной степени.

**2. Туннельный эффект.** Туннельный эффект рассматривается на примере прохождения частицы через потенциальный барьер. Пусть частица, движущаяся в положительном направлении оси  $X$ , встречает потенциальный барьер высоты  $U_0$  и шириной  $l$ .

По классической механике поведение частицы имеет следующий характер. Если энергия частицы больше высоты барьера  $E > U_0$ , то частица проходит над барьером безприпятственно, лишь на участке  $0 \leq x \leq l$  уменьшается скорость, но при  $x > l$  снова принимает первоначальное значение. Если  $E < U_0$ , то частица отражается от барьера и летит в обратную сторону; сквозь барьер частица не проходит.

Согласно квантовой механике частица ведет себя иначе. Даже при  $E > U_0$  частица имеет отличную от нуля вероятность отразиться от барьера. При  $E < U_0$  имеется отличная от нуля вероятность проникнуть сквозь барьер и оказаться в области  $X > l$ .

Рассмотрим случай  $E < U_0$ . Для областей I и III уравнение Шредингера имеет вид  $\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E\psi = 0$ .

Для области II

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

здесь  $E - U_0 < 0$

При прохождении волны через барьер рассматриваются решения волнового уравнения для области I, II, III, которые подчиняются стандартным условиям: непрерывность функций и их первых производных на границах барьера. Из явного вида  $\Psi$  функции отраженной и падающей волн получим отношение

$$\frac{|B_1|^2}{|A_1|^2} = |b_1|^2 = R - \text{коэффициент отражения.}$$

Отношение квадрата модулей амплитуд прошедшей и падающей волн

$\frac{|A_3|^2}{|A_1|^2} = |a_3|^2 = D$  определяет вероятность прохождения частицы через барьер и называется коэффициентом прохождения или коэффициентом прозрачности. Коэффициенты R и D связаны соотношением  $R + D = 1$ .

Для коэффициента прозрачности с учетом высоты и ширины барьера получается выражение

$$D = \exp\left[-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 - E)} \cdot l\right]$$

из которого следует, что вероятность прохождения частицы через потенциальный барьер сильно зависит от ширины барьера  $l$  и от

превышения ( $U_0 - E$ ). Для потенциала произвольной формы коэффициент прозрачности имеет вид:  $D = \exp\left[-\frac{2}{\hbar} \int_a^b \sqrt{2m(U_0 - E)} \cdot dx\right]$ .

При преодолении потенциального барьера частица как бы проходит через «туннель» в этом барьере, поэтому это явление называется *туннельным эффектом*. Туннельный эффект используется в квантовой физике для объяснения ряда явлений. Туннельный эффект есть типичное проявление волновых свойств микрочастиц.

## ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

### 1. Атомное ядро

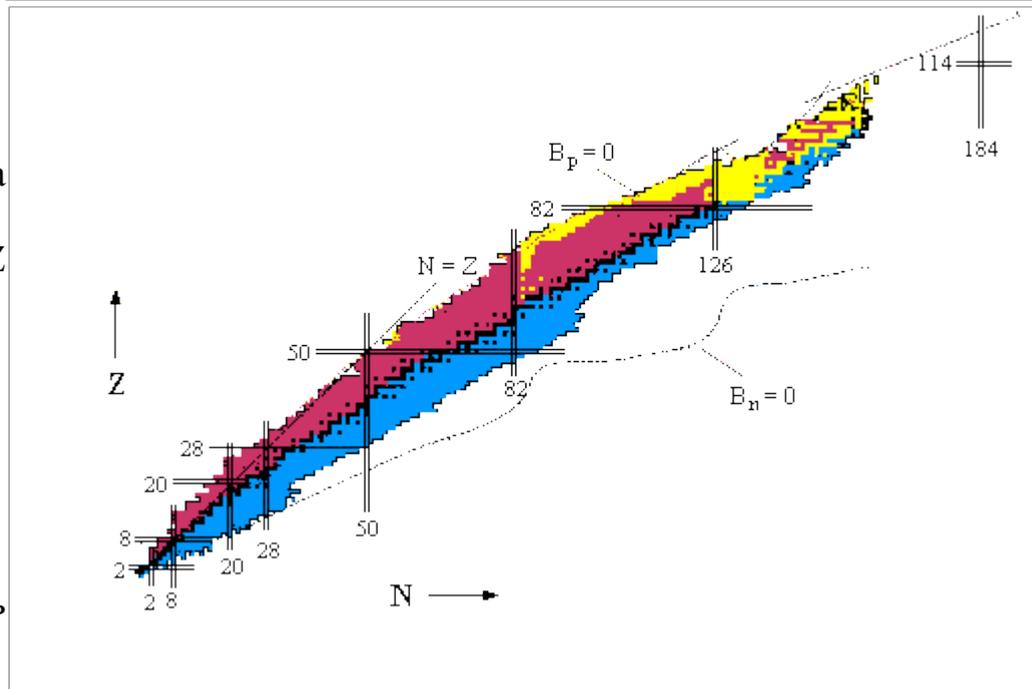
В 1911 году [Э. Резерфорд](#) в экспериментах по рассеянию  $\alpha$ -частиц на тонкой золотой фольге установил, что атом имеет сложную структуру - он состоит из положительно заряженного ядра размером в несколько Ферми (1 Фм =  $10^{-13}$  см) и электронной оболочки. Размер атома  $\sim 10^{-8}$  см. В атомном ядре сосредоточено 99.9% массы атома. Протон был открыт [Д. Чедвиком](#) в 1932 г. в реакции  ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ .

В 1933 году [В. Гейзенберг](#) и Д. Иваненко выдвинули гипотезу о том, что атомное ядро состоит из протонов и нейтронов. Число протонов  $Z$  в ядре определяет его заряд и место соответствующего элемента в периодической системе. Протоны и нейтроны связаны в ядре ядерными силами, которые являются проявлением сильного взаимодействия кварков и глюонов. Атомное ядро может находиться в основном и возбужденном состояниях. Важными характеристиками атомных ядер являются электрический и магнитный моменты, спины, четности, изоспины ядерных состояний. В основном состоянии атомные ядра могут быть как стабильными, так и радиоактивными. Для описания свойств атомных ядер были созданы различные модели, в которых ядро проявляет себя то как газ, то как жидкость, то как твердое тело.

### 2. N-Z диаграмма атомных ядер

Атомные ядра представляют собой связанные квантовые системы фермионов. Свойства атомных ядер определяются совместным действием сильного, электромагнитного и слабого взаимодействий. В настоящее время обнаружено  $\sim 3000$  атомных ядер, представляющих собой различные сочетания чисел протонов  $Z$  и нейтронов  $N$ . По существующим оценкам число атомных ядер может составлять  $\sim 6500$ .

На рисунке показана N-Z диаграмма атомных ядер. Черными точками показаны стабильные ядра. Область



расположения стабильных ядер обычно называют долиной стабильности. Для ядер долины стабильности характерно следующее отношение числа нейтронов к числу протонов:

$$N/Z = 0.98 + 0.015 \cdot A^{2/3},$$

где  $A = N + Z$  – массовое число. Легкие стабильные ядра ( $A < 40$ ) имеют приблизительно равные числа нейтронов и протонов. В области более тяжелых ядер отношение числа нейтронов к числу протонов начинает возрастать и достигает величины 1.6 в районе  $A=250$ . Это изменение легко понять, если учесть короткодействующий характер ядерных сил и возрастающую роль кулоновского взаимодействия протонов с ростом  $A$ . Тяжелые ядра оказываются энергетически более устойчивыми, если содержат большее число нейтронов  $N$  по сравнению с числом протонов  $Z$ . Наиболее тяжелыми стабильными ядрами являются изотопы свинца ( $Z = 82$ ) и висмут ( $Z = 83$ ). С левой стороны от стабильных ядер находятся ядра, перегруженные протонами (протоноизбыточные ядра), справа - ядра, перегруженные нейтронами (нейтроноизбыточные ядра). Ядра, сильно перегруженные нейтронами или протонами, обычно называют экзотическими ядрами. Более темным цветом на рис.1.1 выделены атомные ядра, обнаруженные в настоящее время. Пунктирная линия очерчивает область возможного существования атомных ядер. Связанное состояние ядра определяется как состояние, стабильное относительно испускания нейтронов или протонов, т.е. считается, что атомное ядро существует, если оно не испускает нуклоны из основного состояния. Линия  $B_p = 0$  ( $B_p$  - энергия отделения протона) ограничивает область существования атомных ядер слева (proton drip-line). Линия  $B_n = 0$  ( $B_n$  - энергия отделения нейтрона) - справа (neutron drip-line). Вне этих границ атомные ядра существовать не могут, так как они распадаются за характерное ядерное время ( $\sim 10^{-23}$  с) с испусканием одного или нескольких нуклонов. Если среднее время жизни ядра  $\tau < 10^{-22}$  с, обычно считается, что ядра не существуют. Характерные времена жизни для радиоактивных ядер  $\tau > 10^{-14}$  с. Времена жизни ядер, обусловленные испусканием нуклонов  $10^{-23}$  с  $< \tau < 10^{-20}$  с. Ядра, имеющие такие времена

жизни, обычно наблюдаются в виде резонансов в сечениях ядерных реакций. Среднее время жизни ядра  $\tau$  и ширина резонанса  $\Gamma$  связаны соотношением  $\tau = \hbar/\Gamma$ ,  $\tau [c] = 6.6 \cdot 10^{-22}/\Gamma [MeV]$ .

Рассчитать границы нуклонной стабильности довольно сложно, т.к. точность, с которой оцениваются энергии связи ядер (несколько сотен кэВ), недостаточна для того, чтобы определить будет ли ядро  $\beta$ -радиоактивным или оно будет распадаться с испусканием нуклона. Поэтому точность предсказания границы существования атомных ядер для отдельных элементов может составлять 4-5 единиц по  $A$ . В первую очередь это относится к границе нейтронной стабильности. В правом верхнем углу  $N-Z$  диаграммы расположена интенсивно исследуемая в настоящее время область сверхтяжелых атомных ядер. Открытие и исследование сверхтяжелых атомных ядер с  $Z = 109-116$  показывает, что в этой области ядер существенную роль в повышении их стабильности играют ядерные оболочки. Достаточно хорошее согласие теоретических расчетов с полученными в последнее время экспериментальными данными позволяет прогнозировать существование острова стабильности в районе  $Z = 110-114$  и  $N = 178-184$ . Ядра на острове стабильности должны иметь повышенную устойчивость по отношению к альфа и бета-распаду и спонтанному делению. Теоретические оценки показывают, что времена жизни ядер, расположенных в центре острова стабильности могут составлять  $\sim 10^5$  лет. Трудность проникновения на остров стабильности связана с тем, что нет комбинации соответствующих ядер, использование которых в качестве мишени и налетающей частицы позволили бы попасть в центр острова стабильности.

### **3. Размеры и структура ядер.**

Для детального исследования внутренней структуры ядер используют электроны с энергией  $>100$  МэВ. Пионерские исследования рассеяния электронов атомными ядрами были выполнены [Р. Хофштадтером](#). По современным представлениям электрон считается бесструктурным (точечным) объектом  $R < 10^{-3}$  Фм. Взаимодействие электрона с ядром описывается квантовой электродинамикой. Для того, чтобы исследовать электромагнитную структуру ядра необходимо, чтобы длина волны электрона была меньше его размеров. При описании рассеяния электронов на атомных ядрах необходимо учесть некоторые дополнительные факторы.

1. Электрон обладает спином ( $s_e = 1/2$ ).
2. Энергия налетающего электрона может быть сравнима или даже превосходить энергию покоя ядра.
3. Спин электрона  $s_e = 1/2$ . Величина магнитного момента электрона равен магнетону Бора ( $\mu_e = \mu_B = e\hbar/2m_e c$ ).

Атомные ядра представляют собой довольно компактные объекты. Их радиусы меняются от 2-3 Фм для самых легких ядер до 7-8 Фм для самых тяжелых.

Для некоторых ядер, перегруженных нейтронами (протонами), наблюдается так называемый нейтронный (протонный) слой - область вблизи поверхности ядра, в которой с учетом фактора нормировки  $N/Z$ . В легких ядрах с большим отношением  $N/Z$  было открыто нейтронное гало. Нейтронное гало наблюдается в ядрах, у которых энергия связи нейтрона  $B_n < 1-1.5$  МэВ. Оказалось, что в гало-ядрах наряду с кором, для которого плотность распределения протонов и нейтронов с точностью до фактора  $Z/A$  совпадают, существует довольно большая область на периферии ядра, в которой плотность распределения нейтронов  $\rho_n$  существенно больше плотности распределения протонов  $\rho_p$  ( $\rho_n \gg \rho_p$ ). Обнаружены также ядра, имеющие протонное гало. Нейтронное облако, окружающее кор ядра, простирается на гораздо большие расстояния, чем радиус ядра, определяемый соотношением  $R = 1.3A^{1/3}$ . Так для гало-ядра  $^{11}\text{Li}$

#### 4. Структура нуклона

Исторически первым указанием на сложную внутреннюю структуру протона и нейтрона явились результаты измерения их магнитных моментов. Измеренные значения магнитных моментов

$\mu_p = 2.79275 \mu_N$ ,  $\mu_n = -1.91348 \mu_N$ , где  $\mu_N = e\hbar/(2m_p c)$  - ядерный магнетон, отличались от соответствующих предсказаний, ожидавшихся для точечных дираковских частиц -  $\mu_p = \mu_N$ ,  $\mu_n = 0$ .

Для исследования структуры нуклона использовались электронные пучки с энергией вплоть до 20 ГэВ. Для изучения распределения заряда и магнитного момента в протоне обычно используют мишени из жидкого водорода и измеряют сечение упругого рассеяния электронов. Т.к. не существует нейтронных мишеней, для исследования нейтронов используют мишени из дейтерия. При этом необходимо отделить эффекты обусловленные протонами. Поэтому нейтронные данные получать труднее и они имеют большие по сравнению с протонами погрешности. Протон лишен четкой границы. Плотность заряда в протоне плавно убывает по закону

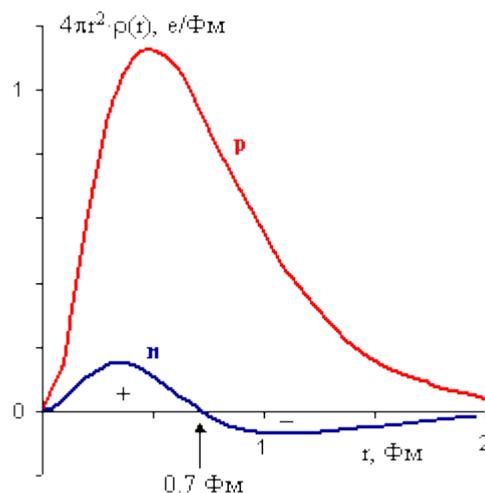
$$\rho(r) = \rho(0)\exp(-r/a),$$

$$\text{где } \rho(0) = 3 \text{ е/Фм}^3, a = 0.23 \text{ Фм}$$

- Среднее от квадрата радиуса протона

$$\langle r^2 \rangle = \frac{\int_0^{\infty} 4\pi r^2 \rho(r) r^2 dr}{\int_0^{\infty} 4\pi r^2 \rho(r) dr} = 0.62 \Phi_{\text{М}} \quad (5)$$

- Размер протона соответственно  $\sim 0.8 \Phi_{\text{М}}$ . Размер нейтрона приблизительно такой же.



- В нейтроне центральная часть заряда ( $r < 0.7 \Phi_{\text{М}}$ ) положительно, периферийная часть — отрицательно.

Распределение электрического заряда в нейтроне и протоне

Т.е. нейтрон "намагничен" - имеет магнитный момент. Усредненный по объему электрический заряд нейтрона равен нулю. Полученные экспериментальные данные по структуре нуклона свидетельствуют о том, что нуклон имеет сложную внутреннюю структуру. По современным представлениям он состоит из кварков, взаимодействующих посредством обмена квантами сильного взаимодействия - глюонами.

## 5. Масса и энергия связи ядра

**Масса ядра** измеряется в атомных единицах массы (а.е.м). За одну атомную единицу массы принимается 1/12 часть массы нейтрального атома углерода  $^{12}\text{C}$ :

$$1 \text{ а.е.м} = 1.6606 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

А.е.м. выражается через энергетические единицы:

$$1 \text{ а.е.м} = 1.510^{-3} \text{ эрг} = 1.510^{-10} \text{ Дж} = 931.49 \text{ МэВ}$$

Масса ядра всегда меньше суммы масс составляющих его нуклонов.

**Энергия связи ядра**  $E_{\text{св}}(A, Z)$  это минимальная энергия, необходимая, чтобы развалить ядро на отдельные, составляющие его нуклоны.

$$E_{\text{св}}(A, Z) = [Z m_p + (A - Z)m_n - M(A, Z)]c^2,$$

где  $Z$  - число протонов,  $(A - Z)$  - число нейтронов,  $m_p$  - масса протона,  $m_n$  - масса нейтрона,  $M(A, Z)$  - масса ядра с массовым числом  $A$  и зарядом  $Z$ .

Энергия связи ядра, выраженная через массу атома  $M_{\text{ат}}$ , имеет вид:

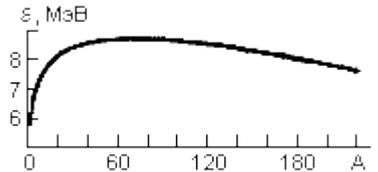
$$E_{\text{св}}(A, Z) = [Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - M_{\text{ат}}(A, Z) - Zm_e]c^2,$$

где  $m_{\text{H}}$  - масса атома водорода,  $m_e$  - масса электрона

**Удельная энергия связи ядра  $\varepsilon(A, Z)$**   
это энергия связи, приходящаяся на один нуклон

$$\varepsilon(A, Z) = E_{\text{св}}(A, Z) / A.$$

На рис. 1 показана зависимость удельной энергии связи ядра  $\varepsilon$  от числа нуклонов  $A$ . Видно, что наиболее сильно связаны ядра в районе железа и никеля ( $A \simeq 55-60$ ). Такой ход зависимости  $\varepsilon(A)$  показывает, что для легких ядер энергетически выгодны реакции синтеза более тяжелых ядер, а тяжелых - деление на более легкие осколки.



**Избыток масс (дефект масс)  $\Delta$**  связан с массой атома  $M_{\text{ат}}(A, Z)$  и массовым числом  $A$  соотношением:

$$\Delta = M_{\text{ат}}(A, Z) - A.$$

## 6. Спин ядра

Собственный момент количества движения - спин нуклона  $1/2$ . Его величина дается соотношением.

$$s = \hbar [1/2(1/2 + 1)]^{1/2}.$$

Полный момент количества движения ядра  $\vec{J}$ , который также называют спином ядра, получается в результате сложения спинов и орбитальных моментов составляющих это ядро нуклонов

$$\vec{J} = \vec{s}_1 + \dots + \vec{s}_i + \vec{l}_1 + \dots + \vec{l}_i, \quad i = A.$$

Величина спина ядра дается соотношением

$$J = \hbar [1/2(1/2 + 1)]^{1/2}.$$

Проекция спина  $J_3$  в единицах  $\hbar$  принимает значения

$$J_3 = +J, +(J - 1), \dots, 1/2 \quad \text{для полужелтых } J,$$

$$J_3 = +J, +(J - 1), \dots, 0 \quad \text{для целых } J.$$

## 7. Альфа-распад

Альфа-распад - распад атомных ядер, сопровождающийся испусканием альфа-частиц (ядер  ${}^4\text{He}$ ). Часть изотопов могут самопроизвольно испускать альфа-частицы (испытывать альфа-распад), т.е. являются альфа-радиоактивными. Альфа-радиоактивность за редким исключением (например  ${}^8\text{Be}$ ) не встречается среди легких и средних ядер. Подавляющее большинство альфа-радиоактивных изотопов (более 200) расположены в периодической системе в области тяжелых ядер. (Известно также около 20 альфа-

радиоактивных изотопов среди редкоземельных элементов, кроме того, альфа-радиоактивность характерна для ядер, находящихся вблизи границы протонной стабильности.) Это связано с тем, что альфа-распад связан с кулоновским отталкиванием, которое возрастает по мере увеличения размеров ядер быстрее (как  $Z^2$ ), чем ядерные силы притяжения, которые растут линейно с ростом массового числа  $A$ . Для того, чтобы ядро было альфа-радиоактивным необходимо, чтобы было выполнено условие, являющееся следствием закона сохранения энергии

$$M(A,Z) > M(A-4,Z-2) + M_\alpha,$$

где  $M(A,Z)$  и  $M(A-4,Z-2)$  - массы покоя исходного и конечного ядер соответственно,  $M_\alpha$  - масса альфа-частицы. При этом в результате распада конечное ядро и альфа-частица приобретают суммарную кинетическую энергию

$$Q_\alpha = (M(A,Z) - M(A-4,Z-2) - M_\alpha) c^2,$$

которая называется энергией альфа-распада. Ядра могут испытывать альфа-распад также на возбужденные состояния конечных ядер и из возбужденных состояний начальных ядер. Поэтому соотношение для энергии альфа-распада можно обобщить следующим образом

$$Q_\alpha = (M(A,Z) - M(A-4,Z-2) - M_\alpha) c^2 + \dots,$$

где  $\epsilon_i$  и  $\epsilon_f$  - энергии возбуждения начального и конечного ядер соответственно. Альфа-частицы, возникающие в результате распада возбужденных состояний, получили название длиннопробежных. Для большинства ядер с  $A > 190$  и для многих ядер с  $150 < A < 190$  условие (12) выполняется, однако далеко не все они считаются альфа-радиоактивными. Дело в том, что современные экспериментальные возможности не позволяют обнаружить альфа-радиоактивность для нуклидов с периодом полураспада большим, чем  $10^{16}$  лет. Кроме того, часть "потенциально" альфа-радиоактивных ядер испытывают также бета-распад, который сильно конкурирует с альфа-распадом. В естественных условиях на Земле существует около 40 альфа-радиоактивных изотопов. Они объединены в три радиоактивных ряда (см. рис.1-4), которые начинаются с  [\$^{236}\text{U}\$  \( \$A = 4n\$ \)](#),  [\$^{238}\text{U}\$  \( \$A = 4n+2\$ \)](#),  [\$^{235}\text{U}\$  \( \$A = 4n+3\$ \)](#). К ним можно с некоторой натяжкой, так как изотопы этого ряда успели распасться за время существования Земли, отнести четвертый ряд, который начинается с  [\$^{237}\text{Np}\$  \( \$A = 4n+1\$ \)](#).

После ряда последовательных распадов образуются стабильные ядра с близким или равным магическим числом количеством протонов и нейтронов ( $Z=82$ ,  $N=126$ ) соответственно  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{209}\text{Bi}$ . Альфа-распады перемежаются бета-распадами, так как при альфа-распадах конечные ядра оказываются все дальше от линии бета-стабильности, т.е. перегружены нейтронами. При уменьшении массового числа для бета-стабильных ядер отношение количества нейтронов и протонов должно уменьшаться. Периоды полураспада известных альфа-радиоактивных нуклидов варьируются от 0.298 мкс для  $^{212}\text{Po}$  до  $(2 - 5) \cdot 10^{15}$  лет для  $^{142}\text{Ce}$ ,  $^{144}\text{Ne}$ ,  $^{174}\text{Hf}$ . Энергия альфа-частиц, испускаемых тяжелыми ядрами из основных состояний, составляет 4 - 9 МэВ, ядрами редкоземельных элементов 2 - 4.5 МэВ. Важным свойством альфа-распада является то, что при небольшом изменении энергии альфа-частиц периоды полураспада меняются на многие порядки. Так у  $^{232}\text{Th}$   $Q_\alpha = 4.08$  МэВ,  $T_{1/2} = 1.41 \cdot 10^{10}$  лет, а у  $^{218}\text{Th}$   $Q_\alpha = 9.85$  МэВ,  $T_{1/2} = 10$  мкс. Изменению энергии в 2 раза соответствует изменение в периоде полураспада на 24 порядка. где  $A$  и  $B$  - константы слабо зависящие от  $Z$ . Для нечетно-четных, четно-нечетных и нечетно-нечетных ядер общая тенденция сохраняется, но их периоды полураспада в 2 - 1000 раз больше, чем для четно-четных ядер с данными  $Z$  и  $Q_\alpha$ .

Сильную зависимость вероятности альфа-распада от энергии удалось в 1928 г. объяснить [Г. Гамову](#) и независимо от него Г. Герни и [Э. Кондону](#). Рассмотрим простую модель альфа-распада. Предполагается, что альфа-частица движется в сферической области, определяемой остаточным ядром. Т.е. в этой модели предполагается, что альфа-частица постоянно существует в ядре. Вероятность альфа-распада равна произведению вероятности найти альфа-частицу на границе ядра  $f$  на вероятность ее прохождения через потенциальный барьер  $D$  (прозрачность барьера)

## 8. Обобщенная модель ядра

Ограничимся рассмотрением предельного варианта этой модели, в котором предполагается:

1. Сильная связь внешних, по отношению к заполненным оболочкам, нуклонов с поверхностью остова, в результате чего возникает устойчивая равновесная деформация ядра. При этом будем считать, что деформированное ядро имеет форму эллипсоида вращения.
2. Выполнение условия адиабатичности (медленности) вращения деформированного ядра по отношению к характерным скоростям внутреннего движения:  $\omega_{\text{вращ}} \ll \omega_{\text{внутр}}$ .
3. Возможность приближенного описания движения нуклонов во внутренней, вращающейся системе координат в рамках одночастичной оболочечной модели путем введения деформированной потенциальной ямы.

В рассматриваемой модели учитываются два типа ядерных движений: коллективное вращение ядра относительно внешней системы координат  $(x, y, z)$ , обусловленное его деформацией, и одночастичное движение нуклонов относительно внутренней, вращающейся системы координат  $(1, 2, 3)$  в деформированной потенциальной яме.

Полный момент количества движения ядра  $\vec{J}$  складывается из коллективного вращательного момента ядра  $\vec{R}$  и внутреннего момента нуклонов.