

Министерство сельского хозяйства Республики Казахстан
НАО «Казахский агротехнический университет им.С.Сейфуллина»

Кафедра физики и химии



УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета КСиПО
Шахметова Д.С.
2022 г.

Сүлейменова Жанатгүль Калиахметовна

Учебно-методический комплекс дисциплины «Физика»
для образовательной программы

В062 «Электротехника и энергетика»

Астана, 2022

Электронный учебно-методический комплекс составлен в соответствии с требованиями нормативных документов (учебного плана и программой дисциплины) модульной образовательной программы «Электротехника и энергетика» и включает все необходимые сведения по выполнению рабочей программы дисциплины «Физика».

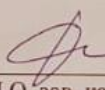
Электронный учебно-методический комплекс предназначен для обучающихся образовательной программы

В062 «Электротехника и энергетика»

(наименование образовательной программы)

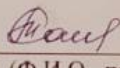
Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры _____ Физики и химии _____
(название кафедры)

Протокол № 4 от « 08 » 11 2022 г.

И.о.заведующий кафедрой _____  Кудайбергенова С.Ж. _____
(Ф.И.О. зав. кафедрой, подпись)

Рассмотрено на заседании Совета факультета _____ КСиПО _____ по
(название факультета)
академическому качеству

Протокол № 4 от « 16 » 11 2022 г.

Председатель Совета факультета по АК _____  Танкаева С.К. _____
(Ф.И.О., подпись)

1. ДАННЫЕ О ПРЕПОДАВАТЕЛЕ:

Сулейменова Жанатгуль Калияхметовна - старший преподаватель, магистр физики, кафедра «Физики и химии», факультет КСИПО.

Аудитория, время пребывания на кафедре: 2 корпус, каб.2304, занятия проводятся по утвержденному расписанию в аудиториях корпуса, тел.:8(7172)389646

e-mail: zh.suleimenova@kazatu.kz

whatsapp:+7 701 397 94 64

ZOOM: 687 851 5687

Пароль: Gani1707 (семнадцать ноль семь)

2. Краткое описание курса

Цель преподавания дисциплины физика: развитие у студентов естественнонаучного мировоззрения, создание фундаментальной базы для дальнейшего изучения общетехнических и специальных дисциплин и для успешной последующей профессиональной деятельности.

Задачи изучения дисциплины:

- изучение основных физических явлений, овладение фундаментальными понятиями, законами, а также методами физического исследования;
- овладение приемами и методами решения типовых задач из различных областей физики, как основы умения решать профессиональные задачи.
- ознакомление с современной научной аппаратурой, формирование навыков проведения эксперимента, умения выделить конкретное физическое содержание в прикладных задачах будущей деятельности.

Результаты обучения дисциплины:

| № | Формируемые результаты обучения (коды) | Описание дескрипторов |
|---|--|---|
| 1 | ON 4 Способность использовать физико-математический аппарат при проведении проектно-исследовательских работ и профессиональной деятельности на производстве и научно-исследовательских организациях | <ul style="list-style-type: none">– знать основные физические теории и принципы, физические методы исследования, основные законы и границы их применения;– уметь применять основные положения и законы физики для решения физических задач и ситуаций;– анализировать результаты физического эксперимента;– моделировать физические ситуации с использованием компьютера;– иметь навыки проведения эксперимента, работы с измерительными приборами, расчета и обработки полученных данных;- понимать происходящие физические явления, знать о способах и методах их описания, физического исследования и рациональной обработки данных наблюдения;- работать с учебной и справочной литературой с целью самостоятельного приобретения новых знаний, связанных с будущей работой по специальности; |

| | | |
|--|--|---|
| | | <ul style="list-style-type: none"> - формировать целостное представление о современной естественнонаучной картине мира; - способствовать развитию творческого мышления, навыков самостоятельной, познавательной деятельности, - развивать коммуникационные способности, необходимые для работы в команде; - знать принципы и культуру академической честности; - проявлять личную ответственность. |
|--|--|---|

Пререквизиты дисциплины: Знать основы физики, химии, математики в объеме средней школы.

Постреквизиты дисциплины: Физика - фундамент современной техники и технологий, которая является основой технических дисциплин, предусмотренных образовательными программами.

3. СОДЕРЖАНИЕ КУРСА

3.1 Перечень лекционных занятий

| Наименование модуля | Наименование темы | Объем, час. | Неделя |
|---------------------|---|-------------|--------|
| Основы механики | <u>1.Введение. Физические основы механики.</u> Предмет физики. Общая структура и задачи курса физики. Пространство и время. Система отсчета. Кинематические характеристики движения. Материальная точка и кинематические элементы твердого тела. Основная цель динамики. Масса, сила и импульс. Инерциальная система отсчета. Законы Ньютона. Силы в механике. Центр масс механической системы и его закон движения. | 2 | 1 |
| | <u>2.Работа и энергия.</u> Работа переменной силы. Мощность. Энергия движения сплошного тела. Консервативные и неконсервативные силы. Связь между силой и потенциальной энергией. Закон сохранения энергии в механике. Применение законов сохранения импульса и энергии к расчету удара двух тел. <u>Твердое тело в механике.</u> Понятие абсолютного твердого тела. Момент инерции, момент силы, момент импульса. Уравнения моментов. Уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси. | 2 | 2 |

| | | | |
|--|--|---|---|
| | <u>3.Физика колебаний.</u> Гармонические колебания и их характеристики. Динамика гармонических колебаний. Маятники. Дифференциальные уравнения гармонических колебаний. Сложение гармонических колебаний. Затухающие и вынужденные колебания. Свободные затухающие колебания. Амплитуда и фаза вынужденных колебаний. Резонанс. Уравнение волны. Фазовая скорость. Звук. Ультразвук. | 2 | 3 |
| Основы молекулярной физики и термодинамики | <u>4. Основы молекулярной физики и термодинамики.</u> Статистический и термодинамический методы исследования. Макроскопические и микроскопические параметры. Уравнение МКТ идеального газа и его следствия. Число степеней свободы молекул. Статистические распределения. Первое начало термодинамики. Теплоемкость. Работа в термодинамике. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам. Второе начало термодинамики. Круговой процесс. Обратимые и необратимые процессы. Энтропия. Тепловые двигатели и холодильные машины. Цикл Карно и его к.п.д. для идеального газа. Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса. | 2 | 4 |
| Электродинамика | <u>5.Электростатика.</u> Закон сохранения электрического заряда. Электрическое поле. Основные характеристики электрического поля. Электрический диполь. Теорема Гаусса. Работа электрического поля, циркуляция. Диэлектрики проводники в электрическом поле. Конденсаторы. Поляризация диэлектрика. Энергия электрического поля. | 1 | 5 |
| | <u>Постоянный электрический ток.</u> Характеристика и условия существования тока. Законы Ома и Джоуля — Ленца в дифференциальной форме.Обобщенный закон Ома в интегральной форме и дифференциальной форме. Разность потенциалов, электродвижущая сила, напряжение. Правила Кирхгофа для разветвленных цепей. | 1 | 5 |
| Электромагнетизм | <u>6.Магнитное поле в вакууме и в веществе.</u> Магнитное поле и его характеристики. Принцип суперпозиции. Закон Био-Савара-Лапласа. Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в магнитном поле. Эффект Холла. Закон Ампера. Взаимодействие параллельных токов. Моменты сил, действующие на раму. Магнитный поток. Теорема Гаусса для магнитного поля. Работа в магнитном поле. Магнетики. Циркуляция напряженности магнитного поля. | 2 | 6 |

| | | | |
|--------------|--|----|----|
| | <p><u>7.Явление электромагнитной индукции.</u> Закон Фарадея и правило Ленца. Явление самоиндукции. Индуктивность. Токи замыкания и размыкания. Взаимная индукция. Энергия магнитного поля.</p> <p>Основы теории Максвелла для электромагнитного поля. Положения Фарадея и Максвелла для электромагнитных полей. Вихревое электрическое поле. Ток смещения. Система уравнений Максвелла. Относительность электрических и магнитных полей.</p> <p>Переменный электрический ток. Колебательный контур. Свободные и вынужденные электромагнитные колебания. Электромагнитные волны. Закон Ома для переменного электрического тока. Мощность переменного тока. Свойства электромагнитной волны. Плотность потока электромагнитной энергии. Вектор Умов-Пойнтинга. Дипольное излучение.</p> | 2 | 7 |
| Оптика. | <p><u>8.Волновая оптика.</u> Основные законы геометрической оптики. Законы отражения и преломления. Явление полного преломления. Оптические приборы. Фотометрия. Дисперсия света.</p> <p>Развитие представлений о природе света. Интерференция света. Принцип Гюйгенса-Френеля. Дифракция волн. Метод зон Френеля. Дифракция Фраунгофера. Дифракционная решетка. Дисперсия света. Поляризация волн.</p> | 2 | 8 |
| | <p><u>9.Квантовая природа излучения.</u></p> <p>Тепловое излучение и его характеристики. Абсолютное черное тело. Законы теплового излучения. Квантовая гипотеза. Фотоны. Энергия и импульс световых квантов. Явление фотоэффекта. Уравнение Эйнштейна. Эффект Комптона.</p> | 2 | 9 |
| Физика атома | <p><u>10.Элементы квантовой физики атомов.</u> Строение атома. Гипотеза де Бройля. Соотношение неопределенностей Гейзенберга. Постулаты Бора. Вероятность в квантовой теории. Уравнение Шредингера. Оптические квантовые генераторы. Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада. Элементарные частицы.</p> | 2 | 10 |
| | Всего | 20 | |

3.2 Перечень лабораторно-практических занятий (ЛПЗ)

| Наименование модуля | Наименование темы | Задания ЛПЗ, цель и содержание | Объем, час | Неделя |
|---------------------|--|---|------------|--------|
| Механика | Механика материальной точки. Законы сохранения импульса и энергии. Вращательное движение твердого тела. Колебания. | Применение основных положений и законов физики к решению основных задач механики. | 2 | 1-2 |
| | <i>Введение. Измерение физических величин и их математическая обработка.</i> | <i>Измерение физических величин и математическая обработка результатов измерений.</i> | 2 | 1-2 |

| | | | | |
|----------------------------|--|---|---|------|
| | <p><i>Л.р. № 3 Изучение движения тел по наклонной плоскости.</i></p> <p><i>Л.р.№ 2 Определение момента инерции тракторного шатуна.</i></p> | <p><i>Определить скорость движения тел на наклонной плоскости и сравнение теоретических результатов с экспериментальными.</i></p> <p><i>Определение момента инерции тракторного шатуна.</i></p> | | |
| Основы МКТ и термодинамики | Физические основы молекулярно-кинетической теории и термодинамики. | Применение основных положений МКТ и термодинамики к определению основных параметров системы, процессов происходящих в газах | 1 | 3-4 |
| | <i>Л.р.№ 1 Изучение движения тел при наличии сил вязкого трения.</i> | <i>Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом Стокса.</i> | 2 | 3,4 |
| Электродинамика | Электростатика. Силовые характеристики поля. Электрический ток. Постоянный ток. | Расчет электрических полей по данному расположению зарядов. Расчет токов. | 2 | 5 |
| | <i>Л.р.№ 11. Изучение электростатического поля.</i> | <i>Построение системы эквипотенциальных поверхностей.</i> | 2 | 5,6 |
| | <i>Л.р.№ 3 Изучение закона Ома.</i> | <i>Изучение закона Ома.</i> | 2 | 7,8 |
| Электромагнетизм | Магнитное поле постоянного тока. | Расчет электромагнитных полей по данному расположению токов и зарядов. | 1 | 6 |
| | <i>Л.р.№15.Изучение намагниченности парамагнетиков.</i> | <i>Изучение теории парамагнетизма и проверка закона Кюри для парамагнетиков.</i> | 2 | 9,10 |
| | Электромагнитная индукция. | Расчет электромагнитной индукции. | 1 | 7 |
| Оптика | Волновая оптика | Изучение оптических законов и их применение к анализу конкретных явлений. | 1 | 8 |
| | Квантово-оптические явления. | | 1 | 9 |
| Физика атома | Элементы физики атома и ядра. | Изучение законов атомной и ядерной физики и их применение к анализу | 1 | 10 |

| | | | | |
|-------|--|---------------------|----|--|
| | | конкретных явлений. | | |
| Всего | | | 20 | |

3.3. График выполнения и сдачи заданий СРО по дисциплине

| № | Наименование модуля | Тема занятия | Задания СРО, цель и содержание | Форма контроля задания | Срок сдачи задания |
|-----|--|---|---|------------------------------------|--------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 7 |
| 1-2 | Основы механики | Механика. Принципы относительности в механике. | Определения основных понятий, законов механики. Постулаты Эйнштейна. Взаимодействие тел. Определение сил. Описание движения в неинерциальных системах отсчета | Отчет по конспекту. Устный опрос. | 1-2 |
| 3 | Основы механики | Вращательное движение. Силы Кориолиса. | Движение тел по окружности, угол поворота, радиан, скорость, ускорение. Теорема Штейнера. Изучение законов вращательного движения тел. | Решение задач. Устный опрос. | 3 |
| 4 | Основы механики | Колебания. Диф. урав. своб, затух. колебаний. δ , λ , Q , τ . | Уравнение гармонических колебаний. Использование знания законов для нахождения основных физических величин. | Решение задач по вариантам. | 4 |
| 5 | Основы молекулярной физики и термодинамики | Реальные газы. Явление переноса. Начала термодинамики. Энтропия. | Равновесные состояния, процессы. Газовые законы. Формулы распределения. Начала термодинамики и процессы в газах. Тепловые двигатели и их к.п.д. Знание основ работы тепловых машин. | Индивидуальные задания | 5 |
| 6 | Электродинамика | Методы расчета электростатических полей. постоянный электрический ток | <u>Применить</u> теорему Гаусса к расчету напряженностей электрических полей Электрический ток в металлах. Сторонние силы, Э.Д.С. Правила Кирхгофа. Понять работу сторонних сил, правила Кирхгофа. | Отчет по конспекту, решение задач. | 6 |

| | | | | | |
|----|----------------------------------|---|--|--|----|
| 7 | Электр омагне тизм | Магнитное поле. Электромагнитная индукция | Движение заряженной частицы в магнитном поле. Сила Лоренца. <u>Показать</u> использование особенностей движения заряженных частиц в электромагнитном поле. <u>Понимать</u> явления индукции и самоиндукции. | Отчет по конспекту. | 7 |
| 8 | Оптика | Геометрическая оптика. Волновая оптика | Линзы, формула тонкой линзы, микроскоп. Закон Малюса. Закон Брюстера. Умение строить изображения на линзах. Знать устройство микроскопа. | Отчет по индивидуал ьным заданиям | 8 |
| 9 | Кванто вая электро ника | Элементы квантовой электроники | Спонтанное и вынужденные излучения. Лазеры. Знать устройство и принцип работы лазера. Изучить теорию квантовой электроники | Отчет по индивидуал ьным заданиям | 9 |
| 10 | Физика атома и ядра | Атом, ядро, элементарные частицы | Понятие об основных проблемах современной физики и астрофизики. Иметь представление о сложных особенностях микромира. | Отчет по индивидуал ьным заданиям | 10 |

4. ОСНОВНЫЕ ФОРМЫ И МЕТОДЫ ОБУЧЕНИЯ

1. Применение инновационных методик обучения: интерактивные методы, проблемное обучение, динамичная виртуальная среда.
2. Использование компьютерных технологий: мультимедийные занятия.
3. Проверка остаточных знаний; тестирование; рефераты.
4. Разноуровневая самостоятельная работа; индивидуальная домашняя работа.
5. Практическая работа; творческий проект.

5. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

5.1 Основная литература

- 1 Калашников Н.П. , Смондырев М.А. Основы физики, т.1-2, 2021.
- 2 Бодунов Е.Н., Никитченко В.И., Петухов А.М. Базовый курс физики. – СПб: 2020. – 319 с.
- 3 Савельев И.В. Курс общей физики, т.1-3. – 15-е изд. – СПб: Лань, 2019. – 500 с.
- 4 Абельдина Ж.К. Практикум по физике – Нур-Султан: КазАТУ им. С. Сейфуллина, 2021. – 115 с.
- 5 Абельдина Ж.К. Физика (учебно-методический комплекс дисциплины). – Астана: КазАТУ, 2019.– 141 с.

5.2 Дополнительная литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – 6-е изд. – М.: Академия, 2016 –590 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики с примерами решения задач. Том 1,2. 2017.
3. Захаров В.Г. Физика для бакалавров: учебное пособие. 2015.
4. Грабовский Р.И. Курс физики: Учебник для вузов. – 6-е изд. – СПб: Лань, 2012. –608 с.
5. Никеров В.А. Физика. Современный курс. 2016.
6. Кузнецов С.И. Курс физики с примерами решения задач. Ч.1-2, 2013.
7. Абельдина Ж.К. Введение в виртуальную физику: учебное пособие. – Астана: ТОО Мастер По, 2012. – 177 с.
8. Физика (Задачи и примеры по физике для вузов агротехнического профиля). Часть I. Физические основы механики, молекулярная физика и термодинамика. / под редакцией К.В. Показеева, Ж.К. Абельдиной, Д.М. Калмановой. – Астана: Изд-во КазАТУ им. С. Сейфуллина, 2017. – 120 с.
9. Физика (Задачи и примеры по физике для вузов агротехнического профиля). Часть II. Электромагнетизм, колебания и волны. / под редакцией К.В. Показеева, Ж.К. Абельдиной, А. Мейрамбай. – Астана: Изд-во КазАТУ им. С. Сейфуллина, 2017. – 117 с.
10. Физика (Задачи и примеры по физике для вузов агротехнического профиля). Часть III. Волновая оптика, квантовая природа излучения. / под редакцией К.В. Показеева, Ж.К. Абельдиной, Е.Т.Акимбекова. – Астана: Изд-во КазАТУ им. С. Сейфуллина, 2017. – 87с.
11. Физика (Задачи и примеры по физике для вузов агротехнического профиля). Часть IV.Элементы физики атома, квантовой механики и ядерной физики. / под редакцией К.В. Показеева, Ж.К. Абельдиной, А.Б. Мусатаевой. – Астана: Изд-во КазАТУ им. С.Сейфуллина, 2017. – 54 с.

5.3 Электронная ссылка или электронная литература

- 1 Трофимова Т.И. Курс физики. [DJVU] – М.: Академия, www.twirpx.com > file.
- 2 Детлаф А.А. Курс физики. –[DJVU] М.: ВШ, www.studmed.ru >
- 3 Грабовский Р.И. Курс физики: [DJVU] –СПб: Лань, www.studmed.ru >.
- 4 Чертов А. Г., Воробьев А.А. Задачник по физике.[PDF], www.twirpx.com > file.
- 5 Виртуальные лабораторные работы по физике <http://www.all-fizika.com/article/index.php>.

6. Политика курса

1. Занятия проводятся строго по расписанию, опоздание, пропуск, покидание занятий не допускается. Посещение занятий фиксируется и проводится ежедневный мониторинг. Отсутствие на занятиях по уважительной причине, не освобождает от обязательного и полного освоения курса. Во время занятий сотовые телефоны должны быть в беззвучном режиме или отключены.

2. Данный учебный курс организован в соответствии с требованиями Академической политики НАО «КАТУ им. С.Сейфуллина» (ссылка на сайт: <https://kazatu.edu.kz/ru/pages/obucenie/akademiceskaa-politika>). Рекомендуются обратить внимание на возможные последствия в случае невыполнения академических требований и низкой посещаемости занятий. В ходе изучения данной дисциплины преподаватель и обучающиеся должны следовать принятому в университете Кодексу академической честности участников образовательного процесса <https://kazatu.edu.kz/ru/pages/obucenie/akademiceskaa-politika> (пункт 7). Академическая политика университета и Кодекс академической честности участников образовательного процесса находятся в свободном доступе на сайте университета.

Всем обучающимся предоставляются равные возможности участия в обсуждении учебных тем на занятиях. Все имеют права задавать вопросы и получать ответы по заявленным в Силлабусе учебным темам. Приветствуется оригинальность мышления, творческий подход обучающихся при выполнении заданий преподавателя. От всех обучающихся требуется соблюдение академической культуры поведения, демонстрации взаимного уважения друг к другу. Обучающиеся с особыми образовательными потребностями могут воспользоваться правом на индивидуальный подход в обучении.

3. Итоговая аттестация проставляется с учетом посещаемости, выполнения самостоятельных работ студента в установленные сроки, результатов текущего контроля и экзамена.

7. Политика оценки учебных достижений обучающихся

Учебные достижения (знания, умения, навыки и компетенции) обучающихся оцениваются в баллах по 100-бальной шкале, соответствующих принятой в международной практике буквенной системе с цифровым эквивалентом (положительные оценки, по мере убывания, от "А" до "D", и "неудовлетворительно" – "FX", "F",) и оценкам по традиционной системе.

Политика оценки учебных достижений обучающихся соответствует требованиям представленные в Академической политике в пункте 9 на сайте университета (ссылка на сайт: <https://kazatu.edu.kz/ru/pages/obucenie/akademiceskaa-politika>).

7.1. Критерии оценки учебных достижений обучающихся

| Оценка по буквенной системе | Цифровой эквивалент баллов | %-ное содержание | Оценка по традиционной системе | Критерии выставления |
|-----------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------------|--|
| A | 4,0 | 95-100 | Отлично | Оценка A ставится в том случае, когда обучающийся, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание учебного материала, умеет свободно выполнять практические задания, предусмотренные программой, усвоивший основную литературу и знакомый с дополнительной литературой, рекомендованной программой. |
| A- | 3,67 | 90-94 | | Оценка A- ставится в том случае, когда обучающийся, обнаруживший всестороннее, систематическое и глубокое знание учебного материала, умеет свободно выполнять практические задания, предусмотренные программой, усвоивший основную литературу, однако не знакомый с дополнительной литературой, рекомендованной программой. |
| B+ | 3,33 | 85-89 | Хорошо | Оценка B+ ставится в том случае, когда обучающийся, показывает систематический характер знаний по дисциплине и способный к их самостоятельному пополнению и обновлению в ходе дальнейшей учебной работы и профессиональной деятельности. |

| | | | | |
|-----------|------|-------|---------------------|---|
| B | 3,0 | 80-84 | | Оценка B ставится в том случае, когда обучающийся, показывает систематический характер знаний по дисциплине, однако не способный к их самостоятельному пополнению и обновлению в ходе дальнейшей учебной работы и профессиональной деятельности. |
| B- | 2,67 | 75-79 | | Оценка B- ставится в том случае, когда у обучающихся, отсутствует систематический характер знаний по дисциплине, не способные к их самостоятельному пополнению и обновлению в ходе дальнейшей учебной работы и профессиональной деятельности. |
| C+ | 2,33 | 70-74 | | Оценка C+ ставится в том случае, когда обучающийся, допустил погрешности при выполнении заданий, но обладающим необходимыми знаниями для их устранения под руководством преподавателя |
| C | 2,0 | 65-69 | Удовлетворительно | Оценка C ставится в том случае, когда обучающийся, допустил погрешности при выполнении заданий, но необладающим необходимыми знаниями для их устранения под руководством преподавателя. |
| C- | 1,67 | 60-64 | | Оценка C- ставится в том случае, когда обучающийся, допустил погрешности при выполнении заданий, не обладающим необходимыми знаниями для их устранения. |
| D+ | 1,33 | 55-59 | | Оценка D+ ставится в том случае, когда обучающийся не обладает необходимыми знаниями для устранения систематических ошибок. |
| D | 1,0 | 50-54 | | Оценка D ставится в том случае, когда обучающийся не обладает необходимыми знаниями и выполняет работу с помощью преподавателя. |
| FX | 0,5 | 25-49 | Неудовлетворительно | Оценке «неудовлетворительно» соответствует буква FX, F , имеющая цифровой эквивалент 0 и процентное содержание 0-49. Данная оценка ставится в том случае, если выполнено меньше половины предложенных заданий, допущены существенные ошибки, показавшие, что студент не владеет обязательными умениями по данной теме в полном объеме. Полное незнание и непонимание учебного материала. Задания не выполнены. |
| F | 0 | 0-24 | | |

Индивидуальный подход к обучению лиц с ООП

При обучении лиц с особыми образовательными потребностями (далее ООП) выбор методов обучения осуществляется преподавателем и обусловлен в каждом отдельном случае целями обучения, исходным уровнем имеющихся знаний, умений, навыков, уровнем профессиональной подготовки педагога, методического и материально технического обеспечения, особенностями восприятия информации обучающимися, исходя из их доступности для обучающихся с ООП.

В процессе обучения лиц с ООП с применением ДОТ является возможность индивидуализации траектории обучения данных категорий граждан. Что подразумевает индивидуализацию содержания, методов, темпа учебной деятельности обучающегося, возможность следить за конкретными действиями обучающегося с ООП при решении конкретных задач, внесения, при необходимости, требуемых корректировок в деятельность обучающегося и преподавателя.

В образовательном процессе преподаватель может активно использовать различные формы организации online и offline занятий, в том числе, виртуальные лекции, обсуждение вопросов освоения дисциплины в рамках чатов, вебинаров, семинаров, выполнение совместных работ с применением технологий проектной деятельности с возможностью включения всех участников образовательного процесса в активную работу по изучаемым в ходе освоения дисциплины (модуля).

Преподаватели при обучении лиц с ООП должны обеспечивать соответствие основным принципам доступности при создании учебных материалов (понятность и предсказуемость контента, указание альтернативного текста для изображений, упрощённая речь, краткое изложение материала и др.).

Формы проведения текущего и итогового контроля для обучающихся с ООП по данной дисциплине устанавливаются с учетом индивидуальных психофизиологических особенностей (устно, письменно на бумаге, письменно на компьютере, в форме тестирования и т. п.), индивидуальных возможностей и состояния здоровья (индивидуальные особенности). При необходимости обучающемуся с ООП предоставляется дополнительное время для подготовки ответа на экзамене.

Составитель (и): _____ Сулейменова Ж.К. _____
(Ф.И.О. автора, подпись)



ТЕЗИСЫ ЛЕКЦИЙ

Лекция 1

Тема: Физические основы механики.

1. Введение. Предмет физики. Общая структура и задачи курса физики.
2. Кинематика и динамика частиц. Прямолинейное и криволинейное движения.
3. Основная задача динамики. Современная трактовка законов Ньютона.

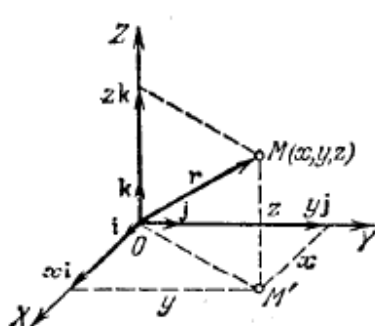
1. Введение.

Раздел физики, в котором изучается движение тел и его изменения в результате действия других тел, называется **механикой**. Раздел механики, в котором изучают свойства движения тел, не рассматривая причин, приводящих к этому движению, называют **кинематикой**, а раздел механики, в котором изучается изменение движения под действием других тел называют **динамикой**. В **статике** исследуют условия равновесия системы тел. В **ньютонской классической механике** изучают механическое движение макроскопических тел, происходящее со скоростью много меньшей скорости света в вакууме ($c=3 \cdot 10^8$ м/с). В **релятивистской механике** (теории относительности) изучают механическое движение макроскопических тел, происходящее со скоростью, сравнимой со скоростью света в вакууме. В **квантовой механике** изучают механическое движение микроскопических тел, т.е. движение отдельных атомов и элементарных частиц.

2. Кинематика и динамика частиц. Прямолинейное и криволинейное движения.

Перемещение материальной точки происходит в пространстве и изменяется со временем. Реальное пространство трехмерно, и положение материальной точки в любой момент времени полностью определяется тремя числами — ее **координатами** в выбранной системе отсчета. Число независимых величин, задание которых необходимо для однозначного определения положения тела, называется **числом его степеней свободы**. В качестве системы координат выберем **прямоугольную, или декартову, систему координат**. Для описания движения точки, кроме системы координат, необходимо еще иметь устройство, с помощью которого можно измерять различные отрезки времени. Такое устройство назовем **часами**. **Выбранная система координат и связанные с ней часы образуют систему отсчета**.

Наиболее употребительная система координат — **декартова** — ортонормированный базис которой образован тремя единичными по модулю и взаимно



ортонормальными векторами $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$, проведенными из начала координат.

Положение произвольной точки M характеризуется **радиусом-вектором** \vec{r} , соединяющим начало координат O с точкой M .

$$\vec{r} = x \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k}, \quad |\vec{r}| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Рис.1

Движение материальной точки полностью определено, если декартовы координаты материальной точки заданы в зависимости от времени:

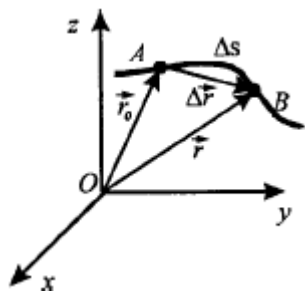
$$x = x(t) \quad y = y(t) \quad z = z(t) \quad (1.1)$$

Эти уравнения называются *кинематическими уравнениями движения точки*. Они эквивалентны одному векторному уравнению движения точки: $\vec{r} = \vec{r}(t)$.

Линия, описываемая движущейся материальной точкой (или телом) относительно выбранной системы отсчета называется **траекторией**.

Уравнение траектории можно получить, исключив параметр t из кинематических уравнений.

В зависимости от формы траектории движение может быть **прямолинейным или криволинейным**.



Длиной пути точки называется сумма длин всех участков траектории, пройденных этой точкой за рассматриваемый промежуток времени $\Delta s = \Delta s(t)$. Длина пути — *скалярная функция времени*.

Вектор перемещения $\Delta \vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$ — вектор, проведенный из начального положения движущейся точки в положение ее в данный момент времени (приращение радиуса-вектора точки за рассматриваемый промежуток времени).

Рис.2

$$\Delta \vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0 = \vec{r}(t) - \vec{r}(t_0) = \Delta x \cdot \vec{i} + \Delta y \cdot \vec{j} + \Delta z \cdot \vec{k}$$

В пределе $\Delta t \rightarrow 0$ длина пути по хорде Δs и длина хорды $\Delta r = |\Delta \vec{r}|$ будут все меньше отличаться:

$$ds = |d\vec{r}| = dr.$$

Скорость — это *векторная* величина, которая определяет как быстроту движения, так и его направление в данный момент времени.

Вектором средней скорости за интервал времени Δt называется отношение приращения $\Delta \vec{r}$ радиуса-вектора точки к промежутку времени Δt .

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad (1.2)$$

Направление вектора средней скорости совпадает с направлением $\Delta \vec{r}$. Единица скорости — м/с.

Мгновенная скорость — векторная величина, равная первой производной по времени от радиуса-вектора \vec{r} рассматриваемой точки:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \dot{\vec{r}} \quad (1.3)$$

$$v = |\vec{v}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (\text{Отсюда: } ds = v dt.) \quad (1.4)$$

При **неравномерном** движении модуль мгновенной скорости с течением времени изменяется. Поэтому можно ввести *скалярную* величину $\langle v \rangle$ — *среднюю скорость неравномерного движения* (другое название — *средняя путевая скорость*).

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1.5)$$

$$s = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt$$

При **прямолинейном движении** точки направление вектора скорости сохраняется неизменным.

Движение точки называется *равномерным*, если модуль ее скорости не изменяется с течением времени ($v = \text{const}$), для него

$$s = v \cdot \Delta t$$

Если модуль скорости увеличивается с течением времени, то движение называется *ускоренным*, если же он убывает с течением времени, то движение называется *замедленным*.

Ускорение — это векторная величина, характеризующая быстроту изменения скорости по модулю и направлению.

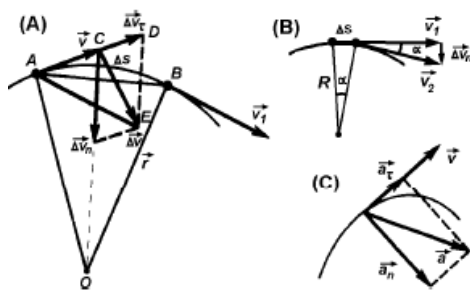
Среднее ускорение в интервале времени Δt — векторная величина, равная отношению изменения скорости $\Delta \vec{v}$ к интервалу времени Δt :

$$\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (1.6)$$

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \dot{\vec{v}} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \ddot{\vec{r}}$$

Единица ускорения — м/с².

В общем случае плоского криволинейного движения вектор ускорения удобно представить в виде суммы двух проекций: $\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau$



Тангенциальное ускорение a_τ характеризует быстроту изменения скорости по модулю (рис.3 (A)), его величина:

$$a_\tau = \frac{dv}{dt}$$

(1.7)

Нормальное (центростремительное) ускорение \vec{a}_n направлено по нормали к траектории к центру ее кривизны O и характеризует быстроту изменения направления вектора скорости точки. Величина нормального ускорения a_n связана со скоростью и движением по кругу и величиной радиуса R (рис.3

(B)). Пусть $|v_1| = |v_2| = v$. Тогда для $\alpha \rightarrow 0$:

$\Delta v_n = v \sin \alpha \approx v \cdot \alpha$, $\Delta s = v \cdot \Delta t \approx R \cdot \alpha \Rightarrow \alpha \approx (v \cdot \Delta t)/R$, откуда:

$$\Delta v_n \approx \frac{v^2}{R} \Delta t \Rightarrow \frac{\Delta v_n}{\Delta t} = \frac{v^2}{R} \Rightarrow a_n = \frac{dv_n}{dt} = \frac{v^2}{R} \quad (1.8)$$

Величина *полного ускорения* (рис .3 (C)): $a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$.

Виды движения:

- 1) $\vec{a}_\tau = 0$, $\vec{a}_n = 0$ — *прямолинейное равномерное* движение: $\vec{a} = 0$.
- 2) $\vec{a}_\tau = a = \text{const}$, $\vec{a}_n = 0$ — *прямолинейное равнопеременное (равноускоренное)* движение. Если $t_0 = 0$, то

$$a_\tau = a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_0}{t - t_0} = \frac{v - v_0}{t}; \quad v = v_0 + a \cdot t; \quad s = \int_0^t (v_0 + at) dt = v_0 t + \frac{at^2}{2}$$
- 3) $a_\tau = 0$, $a_n = \text{const} = \frac{v^2}{R}$ — *равномерное движение по окружности*.
- 4) $\vec{a}_\tau \neq 0$, $\vec{a}_n \neq 0$ — *криволинейное равнопеременное движение*.

Элементы кинематики вращательного движения. Угловая скорость и угловое ускорение.

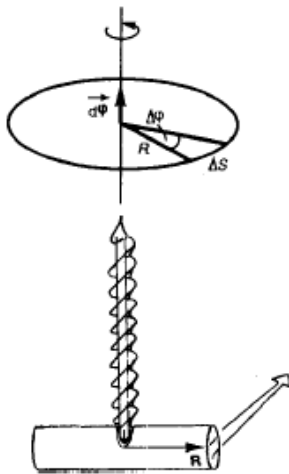


Рис. 4.

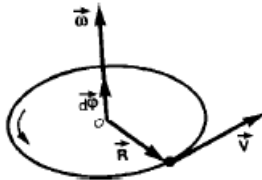
При описании вращательного движения удобно пользоваться полярными координатами R и φ , где R — радиус — расстояние от полюса (центра вращения) до материальной точки, а φ — полярный угол (угол поворота).

Элементарные повороты (обозначаются $\Delta\varphi$ или $d\varphi$) можно рассматривать как псевдовекторы.

Угловое перемещение $d\varphi$ — векторная величина, модуль которой равен углу поворота, а направление совпадает с направлением поступательного движения правого винта.

$$\text{Угловая скорость: } \omega = \frac{d\varphi}{dt} = \dot{\varphi}. \quad (1.9)$$

$$\text{Угловое ускорение: } \beta = \frac{d\omega}{dt} = \dot{\omega} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \ddot{\varphi} \quad (1.10)$$



рад/с². Линейная скорость точки связана с угловой

Рис.5 скоростью и радиусом траектории соотношением:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R \cdot \Delta \varphi}{\Delta t} = R \cdot \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \omega R.$$

В векторном виде формулу для линейной скорости можно написать как векторное произведение.

$$\vec{v} = [\vec{\omega}, \vec{R}]. \quad (1.11)$$

По определению векторного произведения его модуль равен $|\vec{v}| = \omega R \sin \alpha$, где α — угол между векторами $\vec{\omega}$ и \vec{R} , а направление совпадает с направлением поступательного движения правого винта при его вращении от $\vec{\omega}$ к \vec{R} .
da

При равномерном вращении: $\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \text{const}$, следовательно $\varphi = \omega \cdot t$.

Равномерное вращение можно характеризовать периодом вращения T — временем, за которое точка совершает один полный оборот, $2\pi = \omega \cdot T$.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1.12)$$

Частота вращения — число полных оборотов, совершаемых телом при равномерном его движении по окружности, в единицу времени:

$$\begin{aligned} n &= \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \\ \omega &= 2\pi \cdot n \end{aligned} \quad (1.13)$$

Единица частоты вращения — герц (Гц).

При равноускоренном вращательном движении $\beta = const$:

$$\omega = \omega_0 + \beta \cdot t; \quad \varphi = \omega_0 \cdot t + \frac{\beta \cdot t^2}{2}; \quad a_n = \frac{v^2}{R} = \frac{\omega^2 R^2}{R} = \omega^2 R; \quad \left| \begin{array}{l} s = R\varphi \\ v = R\omega \\ a_\tau = R\beta \\ a_n = R\omega^2 \end{array} \right.$$

$$a_\tau = \frac{dv}{dt} = \frac{d(\omega R)}{dt} = R \frac{d\omega}{dt} = R\beta; \quad s = \int_{t_1}^{t_2} v dt = \int_{t_1}^{t_2} \omega R dt = R \int_{t_1}^{t_2} \frac{d\varphi}{dt} dt = R\varphi$$

(1.14)

3. Основная задача динамики. Современная трактовка законов Ньютона.

Однородность пространства и времени означает, что наблюдаемые физические свойства и явления должны быть одинаковы в любой точке пространства и в любой момент времени. Не существует выделенных в каком-либо отношении точек пространства и моментов времени.

Изотропность пространства означает, что все направления в пространстве равнозначны. Физические явления в замкнутой системе не должны изменяться при ее повороте в пространстве.

Законы Ньютона

Первый закон Ньютона отражает свойство инерции, тел и часто называется *законом инерции*. Он утверждает, что *всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, пока воздействие со стороны других тел не заставит его изменить это состояние*.

Воздействие одного физического тела на другое характеризуется физической величиной, называемой силой.

Второй закон Ньютона может быть записан в форме:



Рис.

В таком виде его можно сформулировать следующим образом: *ускорение, приобретаемое телом, прямо пропорционально силе, действующей на тело, и обратно пропорционально массе тела*.

Третий закон Ньютона имеет дело со взаимодействующими телами. Он утверждает, что *силы, с которыми действуют друг на друга взаимодействующие тела, равны по величине и противоположны по направлению*.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Силы эти приложены к различным телам.

Вопросы:

1. Что изучает предмет физики? Общая структура и задачи курса физики?
2. Основные определения кинематики и динамики частиц. Прямолинейное, криволинейное и вращательное движения.
3. Основная задача динамики. Сформулируйте законы Ньютона.

Лекция 2

Тема: Работа и энергия. Твердое тело в механике.

1. Закон сохранения энергии в механике. Работа и энергия.
2. Удар абсолютно упругих и неупругих тел.
3. Динамика твердого тела. Момент инерции, момент силы, момент импульса.
4. Уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси. Закон сохранения момента импульса.

1. Законы сохранения в механике

Запишем второй закон Ньютона в следующем виде

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F}. \quad (2.1)$$

Выражение (2.1) представляет собой уравнение движения частицы. Если его проинтегрировать, то можно найти траекторию частицы $r = r(t, F)$.

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}. \quad (2.2)$$

Величина $\vec{p} = m\vec{v}$ называется **импульсом тела**. Внеся величину m под знак дифференциала в (2.2), закон Ньютона можно записать в форме:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}. \quad (2.3)$$

$$\Delta \vec{p} = \int_0^t \vec{F} dt. \quad (2.4)$$

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (2.5)$$

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = 0, \quad \text{т.е. } \vec{p} = m\vec{v} = \text{const величина}, \quad (2.6)$$

остается постоянной во все время движения. Полученный результат представляет собой **закон сохранения импульса**, который имеет место как для одного тела, так и для системы тел в отсутствие внешних сил.

$$m\vec{v} \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{mv^2}{2} \right) = \vec{F} \frac{d\vec{r}}{dt}. \quad (2.7)$$

Пусть $F = 0$. Тогда постоянной во время движения является величина

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2}. \quad (2.8)$$

Она называется **кинетической энергией частицы**.

Величина $dA = \vec{F} d\vec{r}$ — это работа, совершаемая силой F на пути dr .

Проинтегрируем соотношение (7) вдоль некоторой траектории от точки 1 до точки 2:

$$\int_1^2 d \left(\frac{mv^2}{2} \right) = \int_1^2 \vec{F} d\vec{r}. \quad (2.9)$$
$$A = \int_1^2 \vec{F} d\vec{r}$$

есть работа силы на пути 1—2.

Таким образом, работа сил, действующих на частицу, расходуется на изменение ее кинетической энергии:

$$A = E_{\kappa 2} - E_{\kappa 1} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \quad (2.10)$$

Соответственно, *изменение кинетической энергии частицы служит мерой работы, произведенной над частицей.*

Величина $U = \text{const} \cdot \varphi(r)$ называется *потенциальной энергией* частицы в поле $\varphi(r)$, а полная механическая энергия частицы

$$E = E_{\kappa} + U. \quad (2.11)$$

$$\frac{dU}{d\vec{r}} = 0, \quad (2.12)$$

$$A = \int_1^2 \vec{F} d\vec{r} = - \int_1^2 \frac{dU}{d\vec{r}} d\vec{r} = U(1) - U(2) = m(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (2.13)$$

Видно, что *работа в поле сил тяготения не зависит от пути, т. е. от того, каким образом тело было перемещено из положения 1 в 2.*

2. Удар абсолютно упругих и неупругих тел.

При взаимодействии тел друг с другом изменяются их энергия и импульс.

Внутренняя энергия - это энергия всех частиц, составляющих тело, при заданных его температуре и объеме.

В результате взаимодействия тела с другими телами может измениться его температура, а также (необратимым образом) его объем. Ясно, что эти изменения связаны с расходом энергии, т. е. в результате взаимодействия тела с внешними объектами меняется его внутренняя энергия. Такое взаимодействие является **неупругим**. Оно, очевидно, не сохраняет полной механической энергии тела - суммы кинетической и потенциальной. Напротив, если *в результате взаимодействия внутреннее состояние тела не меняется*, взаимодействие является **упругим**. В процессе упругого взаимодействия выполняется закон сохранения механической энергии.

Рассмотрим *столкновения двух тел.*

Рассмотрим удар двух шаров, центры которых движутся вдоль одной прямой, т. е. **центральный удар**. Пусть массы шаров m_1 и m_2 , скорости до удара v_1 , и v_2 , после удара u_1 и u_2 . Для определенности возьмем случай движения шаров, изображенный на рис..



Рис. 1.

Центральный удар шаров

Сначала рассмотрим **упругий удар** шаров. В применении к данной задаче закон сохранения импульса системы шаров имеет вид:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2, \quad (2.14)$$

т.е. импульс системы до столкновения равен импульсу системы после столкновения.

Закон сохранения энергии дает

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}. \quad (2.15)$$

$$m_1(v_1 - u_1) = m_2(v_2 - u_2), \quad v_1 + u_1 = v_2 + u_2. \\ u_1 = [(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2 v_2] / (m_1 + m_2), \quad (2.16)$$

$$u_2 = [(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1v_1] / (m_1 + m_2). \quad (2.17)$$

Исследуем полученный результат в частных случаях.

1. *Соударение одинаковых шаров.* Тогда $m_1 = m_2$ и

$$u_1 = v_2, u_2 = v_1. \quad (2.18)$$

т. е. при упругом центральном ударе двух тел одинаковой массы они просто обмениваются скоростями. Если, в частности, до удара второй шар покоился ($v_2 = 0$), то после удара остановится первый шар ($u_1 = 0$), а второй будет двигаться с той же скоростью и в том же направлении, в котором двигался до удара первый шар ($u_2 = v_1$).

2. *Удар шара о массивную стенку.* В этом случае $m_2 \gg m_1$ и приближенно будем иметь:

$$u_1 \cong -v_1 + 2v_2 \quad (2.19)$$

$$u_2 \cong v_2 + 2 \frac{m_1}{m_2} v_1 \cong v_2.$$

Рассмотрим теперь абсолютно **неупругий удар шаров.**

$$m_1v_1 + m_2v_2 = (m_1 + m_2)u_1, \quad (2.20)$$

откуда

$$u = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2}. \quad (2.21)$$

Потеря механической энергии, перешедшей во внутреннюю энергию шаров, равна разности энергий до и после удара:

$$\Delta E = \frac{m_1v_1^2}{2} + \frac{m_2v_2^2}{2} - \frac{(m_1 + m_2)u^2}{2}. \quad (2.22)$$

$$\Delta E = \frac{m_1m_2}{2(m_1 + m_2)}(v_1 - v_2)^2. \quad (2.23)$$

Если ударяемое тело было первоначально неподвижно ($v_2 = 0$), то

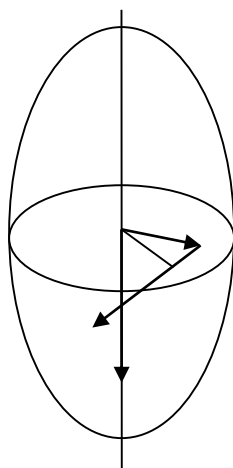
$$u = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1 \quad (2.24)$$

$$\Delta E = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{m_1v_1^2}{2} \quad (2.25)$$

Когда неподвижное тело имеет большую массу ($m_2 > m_1$), то почти вся кинетическая энергия переходит при ударе во внутреннюю энергию. Напротив, при $m_1 \gg m_2$ изменение внутренней энергии мало и большая часть кинетической энергии идет на сообщение движения ударяемому телу.

3. Динамика твердого тела. Момент инерции, момент силы, момент импульса.

Момент силы.



Пусть некоторое тело под действием силы F , приложенной в точке A приходит во вращение вокруг оси OO (рис. 5)

Сила действует в плоскости, перпендикулярной оси. Перпендикуляр, опущенный из точки O (лежащей на оси) на направление силы, называют **плечом силы**. Произведение силы на плечо определяет модуль момента силы относительно точки O :

$$M = Fp = Fr \sin(\angle rF).$$

Момент силы есть вектор, определяемый векторным произведением радиуса-вектора точки приложения силы и вектора силы:

$$M = [rF]$$

Единица момента силы - *Ньютон-метр (Н*м)*.

Направление M можно найти с помощью *правила правого винта*. Рис.5

Момент силы.

Мерой инертности тел при поступательном движении является масса. Инертность тел при вращательном движении зависит не только от массы, но и от ее распределения в пространстве относительно оси вращения. Мерой инертности при вращательном движении служит величина, называемая **моментом инерции тела** относительно оси вращения.

Момент инерции материальной точки относительно оси вращения - произведение массы этой точки на квадрат расстояния от оси:

$$J_i = m_i r_i^2$$

Момент инерции тела относительно оси вращения - сумма моментов инерции материальных точек, из которых состоит это тело:

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2.$$

$$J = \int_0^m r^2 dm$$

r -расстояние от оси вращения до элемента массой dm .

Если тело однородно и его плотность $\rho = \frac{m}{V}$, то момент инерции тела

$$J = \int_V \rho r^2 dV.$$

Момент инерции однородного стержня относительно оси, проходящей через центр инерции и перпендикулярной стержню,

$$J = \frac{ml^2}{12}$$

Момент инерции однородного цилиндра относительно оси, перпендикулярной его основанию и проходящей через центр инерции:

$$J = \frac{mR^2}{2}$$

Момент инерции тонкостенного цилиндра или обруча относительно оси, перпендикулярной плоскости его основания и проходящей через его центр,

$$J = mR^2$$

Момент инерции шара относительно диаметра

$$J = 0.4mR^2$$

Теорема Штейнера

Приведенные формулы для моментов инерции тел даны при условии, что ось вращения проходит через центр инерции. Чтобы определить моменты инерции тела относительно произвольной оси, следует воспользоваться **теоремой Штейнера**: *момент инерции тела относительно произвольной оси вращения равен сумме момента инерции J_0 относительно оси, параллельной данной и проходящей через центр инерции тела, и величины md^2 :*

$$J = J_0 + md^2$$

m - масса тела, d - расстояние от центра масс до выбранной оси вращения.

Единица момента инерции - *килограмм-метр в квадрате (кг *м²)*.

Так, момент инерции однородного стержня относительно оси, проходящей через его конец, по теореме Штейнера равен

$$J = J_0 + md^2 = \frac{1}{12}ml^2 + m\left(\frac{l}{2}\right)^2 = \frac{1}{3}ml^2.$$

4. Уравнение динамики вращательного движения твердого тела. Момент импульса.

Рассмотрим материальную точку А массой m , движущуюся по окружности радиусом r (рис.6). Пусть на нее действует постоянная сила F , направленная по касательной к окружности. Согласно 2 закону Ньютона, эта сила вызывает тангенциальное ускорение

$$a_\tau = \frac{F}{m} \text{ или } F = a_\tau m$$

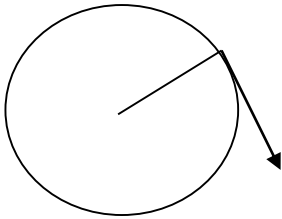


Рис.6

Используя соотношение $a_\tau = \varepsilon r$, получаем

$$F = \varepsilon r m.$$

Умножим обе части на r :

$$Fr = \varepsilon m r^2.$$

$M = Fr$ - момент силы

$J = m r^2$ - момент инерции материальной точки

Угловое ускорение точки при ее вращении вокруг неподвижной оси пропорционально вращающему моменту и обратно пропорционально моменту инерции (основное уравнение динамики вращательного движения материальной точки):

$$M = \varepsilon J \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{M}{J}$$

$$F_i r_i = \varepsilon m_i r_i^2$$

$$\sum F_i r_i = \varepsilon \sum m_i r_i^2.$$

Обозначая $\sum F_i r_i = M$ - суммарный вращающий момент, $J = \sum m_i r_i^2$ - момент инерции твердого тела относительно оси $O'O'$, получаем **основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела**:

$$\varepsilon = \frac{M}{J}$$

$$\varepsilon = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta \tau}$$

Тогда основное уравнение динамики вращательного движения можно записать в виде

$$\frac{\omega - \omega_0}{\Delta \tau} = \frac{M}{J}$$

или

$$M \Delta \tau = J \omega - J \omega_0$$

где $J \omega = L$ - **момент импульса** (или момент количества движения), $M \Delta \tau$ - **импульс момента сил** (или импульс вращающего момента).

Эти величины векторные и совпадают по направлению с векторами ω и M .

Кинетическая энергия вращающегося тела. Работа.

Полная кинетическая энергия вращающегося твердого тела равна сумме кинетических энергий всех его материальных точек:

$$E_k = \frac{\omega^2}{2} \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 = \frac{J \omega^2}{2}$$

J - момент инерции тела относительно оси вращения.

Если тело совершает поступательное и вращательное движения одновременно, то его **полная кинетическая энергия** равна

$$E_k = \frac{m\vartheta^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}$$

При вращении твердого тела его потенциальная энергия не изменяется, поэтому **элементарная работа внешних сил** равна приращению кинетической энергии тела:

$$dA = dE$$

$$dA = d\left(\frac{J\omega^2}{2}\right) = J\varepsilon\omega dt$$

Учитывая, что $M = \varepsilon J$

$$\omega dt = d\varphi$$

$$dA = Md\varphi$$

Работа внешних сил при повороте твердого тела на конечный угол φ равна

$$A = \int_0^\varphi Md\varphi.$$

Закон сохранения момента импульса

При вращательном движении тела каждая его частица движется с линейной скоростью

$$\vartheta_i = \omega r_i$$

r_i - радиус окружности, которую описывает частица массой m_i , ω -угловая скорость, одинаковая для всех точек тела.

Момент импульса вращающегося тела равен сумме моментов импульсов отдельных его частиц:

$$L = \omega \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 = \omega J.$$

Единица момента сил - (кг*м²/с).

Момент импульса - вектор, совпадающий по направлению с вектором угловой скорости.

Изменение момента импульса равно импульсу момента сил:

$$dL = d(J\vec{\omega}) = Jd\omega = Mdt$$

Если суммарный момент всех внешних сил, действующих на систему тела относительно произвольной неподвижной оси, равен нулю, т.е. $\mathbf{M}=\mathbf{0}$, то $d\mathbf{L}=\mathbf{0}$ и векторная сумма моментов импульсов тел системы не изменяется с течением времени.

Закон сохранения момента импульса: сумма моментов импульсов всех тел изолированной системы сохраняется

$$d(J\omega) = 0$$

$$J\omega = const.$$

| Поступательное движение | Вращательное движение | Поступательное движение | Вращательное движение |
|----------------------------------|---|----------------------------|---------------------------------|
| Основной закон динамики | | Работа и мощность | |
| $F \cdot \Delta t = mv_2 - mv_1$ | $M \cdot \Delta \omega = J \cdot \omega_2 - J \cdot \omega_1$ | $A = F \cdot s$ | $A = M \cdot \varphi$ |
| $F = m \cdot a$ | $M = J \cdot \varepsilon$ | $N = F \cdot v$ | $N = M \cdot \omega$ |
| Закон сохранения | | Кинетическая энергия | |
| момента импульса | импульса | | |
| $\sum_{i=1}^n m_i v_i = const$ | $\sum_{i=1}^n J_i \omega_i = const$ | $E_{кин} = \frac{mv^2}{2}$ | $E_{кин} = \frac{J\omega^2}{2}$ |

Вопросы:

1. Сформулируйте закон сохранения энергии в механике. Работа и энергия.
2. Удар абсолютно упругих и неупругих тел.
3. Что такое момент инерции, момент силы, момент импульса?
4. Уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси. Закон сохранения момента импульса.

Лекция 3

Тема: Физика колебаний

1. Гармонические колебания и их характеристики.
2. Гармонические осцилляторы.
3. Сложение гармонических колебаний.
4. Затухающие и вынужденные колебания.
5. Амплитуда и фаза вынужденных колебаний. Резонанс.

1. Гармонические колебания и их характеристики

Колебаниями называются движения или процессы, которые характеризуются определенной повторяемостью во времени.

Единый подход к изучению механических и электромагнитных колебаний применялся английским физиком Д. У. Рэлеем (1842—1919), А. Г. Столетовым, русским инженером-экспериментатором П. Н. Лебедевым (1866—1912). Большой вклад в развитие теории колебаний внесли Л. И. Мандельштам (1879—1944) и его ученики.

Колебания называются **свободными** (или **собственными**), если они совершаются за счет первоначально сообщенной энергии при последующем отсутствии внешних воздействий на колебательную систему (систему, совершающую колебания). Простейшим типом колебаний являются **гармонические колебания** — колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по закону синуса (косинуса).

Две причины рассмотрения гармонических колебаний:

1) колебания, встречающиеся в природе и технике, часто имеют характер, близкий к гармоническому;

2) различные **периодические процессы** (процессы, повторяющиеся через равные промежутки времени) можно представить как наложение гармонических колебаний. Гармонические колебания величины s описываются уравнением типа

$$s = A \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (3.1)$$

где A — максимальное значение колеблющейся величины, называемое **амплитудой колебания**, ω_0 — **круговая (циклическая) частота**, φ — **начальная фаза колебания** в момент времени $t=0$, $(\omega_0 t + \varphi)$ — **фаза колебания** в момент времени t . Фаза колебания определяет значение колеблющейся величины в данный момент времени. Так как косинус изменяется в пределах от +1 до -1, то s может принимать значения от $+A$ до $-A$.

Определенные состояния системы, совершающей гармонические колебания, повторяются через промежуток времени T , называемый **периодом колебания**, за который фаза колебания получает приращение 2π , т. е.

$$\omega_0(t+T) + \varphi = (\omega_0 t + \varphi) + 2\pi,$$

откуда

$$T = 2\pi/\omega_0. \quad (3.2)$$

Величина, обратная периоду колебаний,

$$\nu = 1/T, \quad (3.3)$$

т. е. число полных колебаний, совершаемых в единицу времени, называется **частотой колебаний**. Сравнивая (1.2) и (1.3), получим

$$\omega_0 = 2\pi\nu.$$

Единица частоты — **герц** (Гц): 1 Гц — частота периодического процесса, при которой за 1 с совершается один цикл процесса.

Запишем первую и вторую производные по времени от гармонически колеблющейся величины s :

$$\frac{ds}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi) = A\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi + \pi/2); \quad (3.4)$$

$$\frac{d^2s}{dt^2} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi) = A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi + \pi), \quad (3.5)$$

т. е. имеем гармонические колебания с той же циклической частотой.

Из выражения (3.5) следует **дифференциальное уравнение гармонических колебаний**

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \omega_0^2 s = 0 \quad (3.6)$$

(где $s = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$).

Механические гармонические колебания

Пусть материальная точка совершает прямолинейные гармонические колебания вдоль оси координат x около положения равновесия, принятого за начало координат. Тогда зависимость координаты x от времени t задается уравнением, аналогичным уравнению, где $s=x$:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi). \quad (3.7)$$

Скорость v и ускорение a колеблющейся точки соответственно равны

$$\begin{aligned} v &= -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi) = A\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi + \pi/2); \\ a &= -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi) = A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi + \pi). \end{aligned} \quad (3.8)$$

Сила $F=ma$, действующая на колеблющуюся материальную точку массой m

$$F = -m\omega_0^2 x.$$

Кинетическая энергия материальной точки, совершающей прямолинейные гармонические колебания, равна

$$T = \frac{mv^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi), \quad (3.9)$$

или

$$T = \frac{mA^2\omega_0^2}{4} [1 - \cos 2(\omega_0 t + \varphi)]. \quad (3.10)$$

Потенциальная энергия материальной точки, совершающей гармонические колебания под действием упругой силы F , равна

$$\Pi = -\int_0^x F dx = \frac{m\omega_0^2 x^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi), \quad (3.11)$$

или

$$\Pi = \frac{mA^2\omega_0^2}{2} [1 + \cos 2(\omega_0 t + \varphi)]. \quad (3.12)$$

Полная энергия:

$$E = T + \Pi = mA^2\omega_0^2/2. \quad (3.13)$$

2. Гармонический осциллятор. Пружинный, физический и математический маятники

Гармоническим осциллятором называется система, совершающая колебания, описываемые уравнением (3.6):

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0. \quad (3.14)$$

Примерами гармонического осциллятора являются пружинный, физический и математический маятники, колебательный контур.

1. Пружинный маятник — это груз массой m , подвешенный на абсолютно упругой пружине и совершающий гармонические колебания под действием упругой силы $F = -kx$, где k — жесткость пружины. Уравнение движения маятника

$$m\ddot{x} = -kx, \text{ или } \ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0.$$

Пружинный маятник совершает гармонические колебания по закону $x = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$ с циклической частотой

$$\omega_0 = \sqrt{k/m} \quad (3.15)$$

и периодом

$$T = 2\pi\sqrt{m/k}. \quad (3.16)$$

Потенциальная энергия пружинного маятника равна

$$\Pi = kx^2/2.$$

2. Физический маятник — это твердое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг неподвижной горизонтальной оси, проходящей через точку O , не совпадающую с центром масс C тела.

Момент M возвращающей силы можно записать в виде

$$M = J\ddot{\alpha} = J\ddot{\alpha} = F_\tau l = -mgl \sin \alpha \approx -mg\alpha,$$

где J — момент инерции маятника относительно оси, проходящей через точку подвеса O , l — расстояние между ней и центром масс маятника, $F_\tau = -mg \sin \alpha \approx -mg\alpha$ — возвращающая сила (знак минус обусловлен тем, что направления F_τ и α всегда противоположны; $\sin \alpha \approx \alpha$)

$$J\ddot{\alpha} + mgl\alpha = 0, \text{ или } \ddot{\alpha} + \frac{mgl}{J}\alpha = 0.$$

Принимая

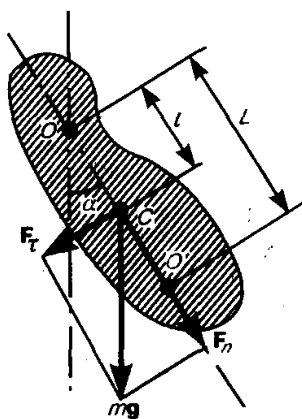
$$\omega_0 = \sqrt{mgl/J}, \quad \ddot{\alpha} + \omega_0^2 \alpha = 0,$$

При малых колебаниях физический маятник совершает гармонические колебания с циклической частотой ω_0 и периодом

$$T = 2\pi/\omega_0 = 2\pi\sqrt{J/(mgl)} = 2\pi\sqrt{L/g},$$

где $L = J/(ml)$ — приведенная длина физического маятника.

3. Математический маятник — это идеализированная система, состоящая из материальной точки массой m , подвешенной на нерастяжимой невесомой нити, и колеблющаяся под действием силы тяжести



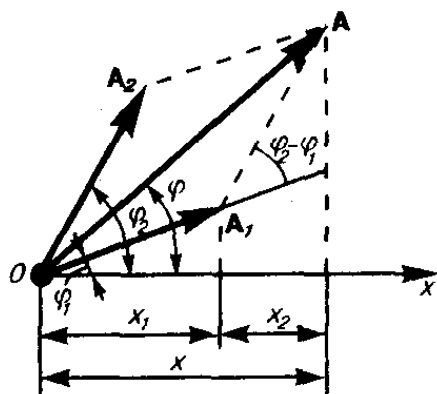
Момент инерции математического маятника

$$J = ml^2,$$

Для периода малых колебаний математического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}.$$

3. Сложение гармонических колебаний одного направления и одинаковой частоты. Биения



Колеблющееся тело может участвовать в нескольких колебательных процессах, тогда необходимо найти результирующее колебание, иными словами, колебания необходимо сложить. Сложим гармонические колебания одного направления и одинаковой частоты

$$\begin{cases} x_1 = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1), \\ x_2 = A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_2), \end{cases}$$

Уравнение результирующего колебания будет

$$x = x_1 + x_2 = A \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1); \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}.$$

Периодические изменения амплитуды колебания, возникающие при сложении двух гармонических колебаний с близкими частотами, называются **биениями**.

Частота биений равна разности частот складываемых колебаний:

$$\omega_b = \Delta\omega.$$

Период биений

$$T_b = 2\pi/\Delta\omega.$$

Любые сложные периодические колебания $s=f(t)$ можно представить в виде суперпозиции одновременно совершающихся гармонических колебаний с различными амплитудами, начальными фазами, а также частотами, кратными циклической частоте ω_0 :

$$s = f(t) = \frac{A_0}{2} + A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + A_2 \cos(2\omega_0 t + \varphi_2) + \dots + A_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n).$$

Сложение взаимно перпендикулярных колебаний

Рассмотрим результат сложения двух гармонических колебаний одинаковой частоты ω , происходящих во взаимно перпендикулярных направлениях вдоль осей x и y .

$$\begin{cases} x = A \cos \omega t, \\ y = B \cos(\omega t + \alpha), \end{cases}$$

где α — разность фаз обоих колебаний, A и B — амплитуды складываемых колебаний. Записывая складываемые колебания в виде

$$x/A = \cos \omega t;$$

$$y/B = \cos(\omega t + \alpha) = \cos \omega t \cos \alpha - \sin \omega t \sin \alpha$$

и заменяя во втором уравнении $\cos \omega t$ на x/A и $\sin \omega t$ на $\sqrt{1 - (x/A)^2}$, получим после несложных преобразований *уравнение эллипса*, оси которого ориентированы относительно координатных осей произвольно:

$$\frac{x^2}{A^2} - \frac{2xy}{AB} \cos \alpha + \frac{y^2}{B^2} = \sin^2 \alpha.$$

Так как траектория результирующего колебания имеет форму эллипса, то такие колебания называются **эллиптически поляризованными**.

Уравнение **линейно поляризованными** колебаниями;

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1.$$

Если $A=B$, то эллипс вырождается в *окружность*. Такие колебания называются **циркулярно поляризованными колебаниями** или **колебаниями, поляризованными по кругу**.

4. Дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний. Автоколебания

Свободные затухающие колебания — колебания, амплитуды которых из-за потерь энергии реальной колебательной системой с течением времени уменьшаются.

Дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний линейной системы задается в виде

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + 2\delta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = 0,$$

где s — колеблющаяся величина, описывающая тот или иной физический процесс, $\delta = \text{const}$ — **коэффициент затухания**, ω_0 — циклическая частота свободных *незатухающих* колебаний той же колебательной системы, т. е. при $\delta=0$ (при отсутствии потерь энергии) называется **собственной частотой** колебательной системы.

$$A = A_0 e^{-\delta t}$$

амплитуда затухающих колебаний, а A_0 — начальная амплитуда. Промежуток времени $\tau = 1/\delta$, в течение которого амплитуда затухающих колебаний уменьшается в e раз, называется **временем релаксации**.

Период затухающих колебаний равен

$$T = 2\pi/\omega = 2\pi/\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}.$$

Если $A(t)$ и $A(t+T)$ — амплитуды двух последовательных колебаний, соответствующих моментам времени, отличающимся на период, то отношение

$$\frac{A(t)}{A(t+T)} = e^{\delta T}$$

называется **декрементом затухания**, а его логарифм

$$\theta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \delta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N_e}$$

логарифмическим декрементом затухания; N_e — число колебаний, совершаемых за время уменьшения амплитуды в e раз.

Для характеристики колебательной системы пользуются понятием **добротности** Q , которая при малых значениях логарифмического декремента равна

$$Q = \frac{\pi}{\theta} = \pi N_e = \frac{\pi}{\delta T_0} = \frac{\omega_0}{2\delta}$$

Автоколебания — незатухающие колебания, поддерживаемые в диссипативной системе за счет постоянного внешнего источника энергии, причем свойства этих колебаний определяются самой системой.

Колебания, возникающие под действием внешней периодически изменяющейся силы или внешней периодически изменяющейся э.д.с., называются соответственно **вынужденными механическими** и **вынужденными электромагнитными колебаниями**.

Линейное неоднородное дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + 2\delta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = x_0 \cos \omega t,$$

применяя впоследствии его решение для вынужденных колебаний конкретной физической природы (x_0 в случае механических колебаний равно F_0/m , в случае электромагнитных — U_m/L).

5. Амплитуда и фаза вынужденных колебаний (механических и электромагнитных). Резонанс

Из формулы

$$A = \frac{x_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}},$$

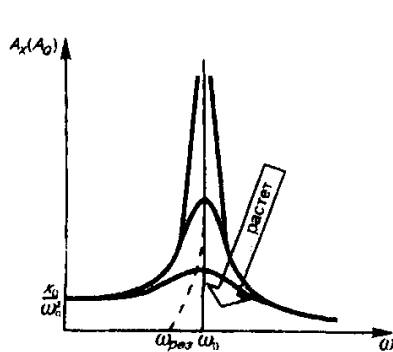
следует, что амплитуда A смещения (заряда) имеет максимум. Чтобы определить **резонансную частоту** $\omega_{\text{рез}}$, — частоту, при которой амплитуда A смещения (заряда) достигает максимума, — нужно найти максимум функции, или, что то же самое, минимум подкоренного выражения. Продифференцировав подкоренное выражение по ω и приравняв его нулю, получим условие, определяющее $\omega_{\text{рез}}$:

$$-4(\omega_0^2 - \omega^2)\omega + 8\delta^2\omega = 0.$$

Это равенство выполняется при $\omega=0, \pm\sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}$, у которых только лишь положительное значение имеет физический смысл. Следовательно, резонансная частота

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}.$$

Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты вынуждающей силы (частоты вынуждающего переменного напряжения) к частоте, равной или близкой собственной частоте колебательной системы, называется **резонансом** (соответственно **механическим** или **электрическим**). При $\delta^2 \ll \omega_0^2$ значение $\omega_{\text{рез}}$ практически совпадает с собственной частотой ω_0 колебательной системы.



$$A_{\text{рез}} = \frac{x_0}{2\delta\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}.$$

На рисунке приведены зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты при различных значениях δ . Если $\omega \rightarrow 0$, то все кривые достигают одного и того же, отличного от нуля, предельного значения x_0/ω_0^2 , которое называют **статическим отклонением**. В случае механических колебаний

$$x_0/\omega_0^2 = F_0/(m\omega_0^2), \text{ в случае электромагнитных —}$$

$U_m/(L\omega_0^2)$. Если $\omega \rightarrow \infty$, то все кривые асимптотически стремятся к нулю. Приведенная совокупность кривых называется **резонансными кривыми**.

При малом затухании ($\delta^2 \ll \omega_0^2$) резонансная амплитуда смещения (заряда)

$$A_{\text{рез}} = \frac{x_0}{2\delta\omega_0} = \frac{\omega_0}{2\delta} \frac{x_0}{\omega_0^2} = Q \frac{x_0}{\omega_0^2},$$

где Q — добротность колебательной системы, x_0/ω_0^2 — рассмотренное выше статическое отклонение. Отсюда следует, что добротность Q характеризует резонансные свойства колебательной системы: чем больше Q , тем больше $A_{\text{рез}}$.

Вопросы:

1. Что такое гармонические колебания и их характеристики?
2. Приведите примеры гармонических осцилляторов.
3. Как происходит сложение гармонических колебаний?
4. Затухающие и вынужденные колебания. Резонанс.

Лекция 4

Тема: Основы молекулярной физики и термодинамики.

1. Статистический и термодинамический методы исследования.
2. Идеальный газ. Газовые законы.
3. Уравнение состояния. Статистические распределения.
4. Первое начало термодинамики. Теплоемкость. Работа в термодинамике.
5. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам.
6. Второе начало термодинамики. Энтропия. Тепловые двигатели и холодильные машины. Цикл Карно.

1. Статистический и термодинамический методы исследования.

Молекулярная физика — раздел физики, изучающий строение и свойства вещества исходя из молекулярно-кинетических представлений, основывающихся на том, что все тела состоят из молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении.

Термодинамика — раздел физики, изучающий общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями.

Термодинамическая температурная шкала определяется по одной реперной точке, в качестве которой взята **тройная точка воды** (температура, при которой лед, вода и насыщенный пар при давления 609 Па находятся в термодинамическом равновесии). Температура этой точки по термодинамической шкале равна 273,16 К (точно). Градус Цельсия равен кельвину. В термодинамической шкале температура замерзания воды равна 273,15 К (при том же давлении, что и в Международной практической шкале), поэтому, по определению, термодинамическая температура и температура по Международной практической шкале связаны соотношением

$$T = 273,15 + t.$$

Температура $T = 0$ К называется **нулем кельвин**. Анализ различных процессов показывает, что 0 К недостижим, хотя приближение к нему сколь угодно близко возможно.

2. Идеальный газ. Газовые законы.

Идеальный газ — это газ, в котором можно пренебречь взаимодействием между молекулами.

| Название процесса | Постоянный параметр | Формула газового закона | Название газового закона | Графическое представление газового закона |
|-------------------|---------------------|---|--------------------------|---|
| Изотермический | T температура | $p \cdot V = \text{const}$ $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 = \dots$ | Бойля – Мариотта | |
| Изобарный | p давление | $\frac{V}{T} = \text{const}$ $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \dots$ | Гей-Люссака | |
| Изохорный | V объем | $\frac{p}{T} = \text{const}$ $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = \dots$ | Шарля | |

Закон Авогадро*: моли любых газов при одинаковых температуре и давлении занимают одинаковые объемы. При нормальных условиях этот объем равен $22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$.

По определению, в одном моле различных веществ содержится одно и то же число молекул, называемое **постоянной Авогадро**: $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.

Закон Дальтона*: давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений p_1, p_2, \dots, p_n входящих в нее газов:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n.$$

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.

3. Уравнение состояния идеального газа. Основное уравнение МКТ идеальных газов.

3.1. Уравнение Клапейрона — Менделеева

Как уже указывалось, состояние некоторой массы газа определяется тремя термодинамическими параметрами: давлением p , объемом V и температурой T . Между этими параметрами существует определенная связь, называемая **уравнением состояния**, которое в общем виде дается выражением

$$f(p, V, T) = 0,$$

где каждая из переменных является функцией двух других.

$$pV/T = B = \text{const.}$$

Это выражение является **уравнением Клапейрона**, в котором B — газовая постоянная, *различная для разных газов*.

Русский ученый Д. И. Менделеев (1834—1907) объединил уравнение Клапейрона с законом Авогадро, отнес уравнение к одному молю, используя молярный объем V_m . Уравнению

$$pV_m = RT$$

удовлетворяет лишь идеальный газ, и оно является **уравнением состояния идеального газа**, называемым также **уравнением Клапейрона — Менделеева**.

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

Уравнение Клапейрона — Менделеева для массы m газа

$$pV = \frac{m}{M} RT = \nu RT,$$

где $\nu = m/M$ — **количество вещества**.

Часто пользуются несколько иной формой уравнения состояния идеального газа, вводя **постоянную Больцмана**:

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

$$p = nkT$$

3.2. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов

Если газ в объеме V содержит N молекул, движущихся со скоростями v_1, v_2, \dots, v_N , то целесообразно рассматривать **среднюю квадратную скорость**

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2},$$

характеризующую всю совокупность молекул газа.

Уравнение

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2.$$

называется **основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеальных газов.**

$$pV = \frac{1}{3} N m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2,$$

или

$$pV = \frac{2}{3} N \frac{m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2}{2} = \frac{2}{3} E,$$

где E — суммарная кинетическая энергия поступательного движения всех молекул газа.

$$\begin{aligned} \langle v_{\text{кв}} \rangle &= \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \\ \langle v_{\text{кв}} \rangle &= \sqrt{\frac{3RT}{m_0 N_A}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}, \\ \langle \epsilon_0 \rangle &= E/N = m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 / 2 = \frac{3}{2} kT \end{aligned}$$

4. Первое начало термодинамики. Изопроцессы.

Опыт показывает, что в соответствии с законом сохранения энергии при любом способе перехода системы из первого состояния во второе изменение внутренней энергии $\Delta U = U_2 - U_1$ будет одинаковым и равным разности между количеством теплоты Q , полученным системой, и работой A , совершенной системой против внешних сил:

$$\Delta U = Q - A,$$

или

$$Q = \Delta U + A.$$

Это уравнение выражает **первое начало термодинамики**: теплота, сообщаемая системе, расходуется на изменение ее внутренней энергии и на совершение ею работы против внешних сил.

В дифференциальной форме будет иметь вид

$$dQ = dU + dA,$$

где dU — бесконечно малое изменение внутренней энергии системы, δA — элементарная работа, δQ — бесконечно малое количество теплоты.

Если система периодически возвращается в первоначальное состояние, то изменение ее внутренней энергии $\Delta U = 0$. Тогда, согласно первому началу термодинамики,

$$A = Q,$$

т. е. вечный двигатель первого рода — периодически действующий двигатель, который совершал бы большую работу, чем сообщенная ему извне энергия, — невозможен (одна из формулировок первого начала термодинамики).

Применение первого начала термодинамики к изопроцессам

Первый закон термодинамики применителен к изопроцессам.

1. Изотермический $T=\text{const}$, то $dU=0$; $dQ=dA$

2. Изохорный $V=\text{const}$, то $dA=0$; $dQ=dU$

3. Изобарный $P=\text{const}$, то $dQ=dU+dA$

4. Адиабатный $\Delta Q=0$;

$A = -\Delta U$ -адиабатное расширение

$\Delta U = -A$ -адиабатное сжатие.

Круговым процессом (или **циклом**) называется процесс, при котором система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное. Если за **цикл** совершается положительная работа $A = \oint p dV > 0$ (цикл протекает по часовой стрелке), то он называется **прямым** (рис. 4.1, а), если за цикл совершается отрицательная работа $A = \oint p dV < 0$ (цикл протекает против часовой стрелки), то он называется **обратным** (рис. 4.1 б).

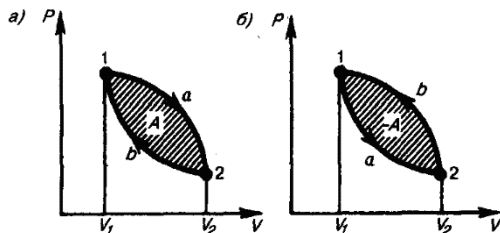


Рис. 4.1.

Прямой цикл используется в *тепловых двигателях* — периодически действующих двигателях, совершающих работу за счет полученной извне теплоты.

Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

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

Энтропия. Второе начало термодинамики.

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

Приведенное количество теплоты, сообщаемое телу на бесконечно малом участке процесса, равно $\delta Q/T$. Строгий теоретический анализ показывает, что приведенное количество теплоты, сообщаемое телу в *любом обратимом круговом процессе*, равно нулю:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0.$$

Таким образом,

$$\frac{\delta Q}{T} = dS.$$

Функция состояния, дифференциалом которой является $\delta Q/T$, называется **энтропией** и обозначается S .

Для обратимых процессов изменение энтропии

$$\Delta S = 0.$$

В термодинамике доказывается, что энтропия системы, совершающей *необратимый цикл*, возрастает:

$$\Delta S > 0.$$

Неравенство Клаузиуса

$$\Delta S \geq 0,$$

т. е. *энтропия замкнутой системы может либо возрасть (в случае необратимых процессов), либо оставаться постоянной (в случае обратимых процессов)*.

Если система совершает равновесный переход из состояния 1 в состояние 2, то, изменение энтропии

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \frac{dU + \delta A}{T},$$

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = S_2 - S_1 = \frac{m}{M} \left(C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right),$$

т. е. изменение энтропии $\Delta S_{1 \rightarrow 2}$ идеального газа при переходе его из состояния 1 в состояние 2 *не зависит от вида процесса перехода* $1 \rightarrow 2$.

Так как для адиабатического процесса $\delta Q = 0$, то $\Delta S = 0$ и, следовательно, $S = \text{const}$, т. е. *адиабатический обратимый процесс протекает при постоянной энтропии*.

При изотермическом процессе ($T_1 = T_2$)

$$\Delta S = \frac{m}{M} R \ln \frac{V_2}{V_1};$$

При изохорном процессе ($V_1 = V_2$)

$$\Delta S = \frac{m}{M} C_V \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

Согласно Больцману (1872), *энтропия системы и термодинамическая вероятность* связаны между собой следующим образом:

$$S = k \ln W,$$

где k — постоянная Больцмана.

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

Второе начало термодинамики

Используя понятие энтропии и неравенство Клаузиуса **второе начало термодинамики** можно сформулировать как **закон возрастания энтропии** замкнутой

системы при необратимых процессах: *любой необратимый процесс в замкнутой системе происходит так, что энтропия системы при этом возрастает.*

Можно дать более краткую формулировку второго начала термодинамики: *в процессах, происходящих в замкнутой системе, энтропия не убывает.*

Формула Больцмана позволяет объяснить постулируемое вторым началом термодинамики возрастание энтропии в замкнутой системе при необратимых процессах: *возрастание энтропии означает переход системы из менее вероятных в более вероятные состояния.*

Укажем еще две формулировки второго начала термодинамики:

1) **по Кельвину:** *невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу;*

2) **по Клаузиусу:** *невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является передача теплоты от менее нагретого тела к более нагретому.*

Первые два начала термодинамики дают недостаточно сведений о поведении термодинамических систем при нуле Кельвина. Они дополняются **третьим началом термодинамика**, или **теоремой Нернста*** — **Планка:** *энтропия всех тел в состоянии равновесия стремится к нулю по мере приближения температуры к нулю Кельвина:*

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0.$$

6. Цикл Карно и его КПД. Теорема Карно. Приведенная теплота.

Из формулировки второго начала термодинамики по Кельвину следует, что вечный двигатель второго рода — периодически действующий двигатель, совершающий работу за счет охлаждения одного источника теплоты, — невозможен.

Принцип действия теплового двигателя приведен на рис. 6.1. 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**, за цикл передается количество теплоты Q_2 , при этом совершается работа $A = Q_1 - Q_2$.

Чтобы термический коэффициент полезного действия теплового двигателя был равен 1, необходимо выполнение условия $Q_2 = 0$, т. е. тепловой двигатель должен иметь один источник теплоты, а это невозможно. Так, французский физик и инженер Н. Л. С. Карно (1796 — 1832) показал, что для работы теплового двигателя необходимо не менее двух источников теплоты с различными температурами, иначе это противоречило бы второму началу термодинамики.

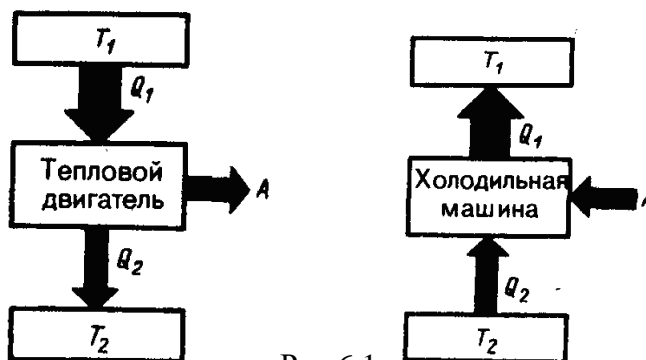


Рис.6.1.

Без совершения работы нельзя отбирать теплоту от менее нагретого тела и отдавать ее более нагретому. Это утверждение есть не что иное, как второе начало термодинамики в формулировке Клаузиуса.

Карно теоретически проанализировал обратимый наиболее экономичный цикл, состоящий из двух изотерм и двух адиабат. Его называют **циклом Карно**.

Цикл Карно изображен на рис. 6.2, где изотермические расширение и сжатие заданы соответственно кривыми 1—2 и 3—4, а адиабатические расширение и сжатие — кривыми 2—3 и 4—1. При изотермическом процессе $U=\text{const}$, поэтому количество теплоты Q_1 , полученное газом от нагревателя, равно работе расширения A_{12} , совершаемой газом при переходе из состояния 1 в состояние 2:

$$A_{12} = \frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_1.$$

При адиабатическом расширении 2—3 теплообмен с окружающей средой отсутствует и работа расширения A_{23} совершается за счет изменения внутренней энергии:

$$A_{23} = -\frac{m}{M} C_V (T_2 - T_1).$$

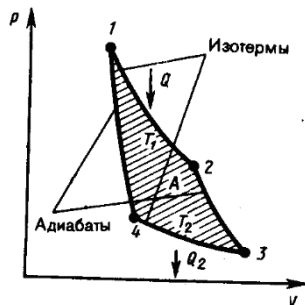


Рис.6.2.

Количество теплоты Q_2 , отданное газом холодильнику при изотермическом сжатии, равно работе сжатия A_{34} :

$$A_{34} = \frac{m}{M} RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = -Q_2.$$

Работа адиабатического сжатия

$$A_{41} = -\frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2) = -A_{23}.$$

Термический к. п. д. цикла Карно

$$\eta = A/Q_1 = (Q_1 - Q_2)/Q_1.$$

Применив уравнение $TV^{\gamma-1} = \text{const}$, для адиабат 2—3 и 4—1, получим

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}, \quad T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1},$$

откуда

$$\begin{aligned} V_2/V_1 &= V_3/V_4, \\ \eta &= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{\frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - \frac{m}{M} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{\frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \end{aligned}$$

т. е. для цикла Карно к. п. д. действительно определяется только температурами нагревателя и холодильника.

Согласно теореме Карно, химический состав рабочего тела не влияет на результаты сравнения температур, поэтому такая термодинамическая шкала не связана со свойствами какого-то определенного термометрического тела.

Вопросы:

1. Какие существуют методы исследования?
2. Что такое идеальный газ. Газовые законы. Уравнение состояния. Статистические распределения.
3. Сформулируйте первое начало термодинамики. Теплоемкость. Работа в термодинамике. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам.
4. Сформулируйте второе начало термодинамики. Обратимые и необратимые процессы. Энтропия.
5. Как работают тепловые двигатели и холодильные машины?.

Лекция 5

Тема: Электростатика и постоянный ток.

1. Электрический заряд. Закон сохранения электрических зарядов.
2. Электростатическое поле. Напряженность. Принцип суперпозиции.
3. Теорема Гаусса. Применение теоремы Гаусса к расчету напряженностей электростатических полей. Работа электростатического поля.
4. Потенциал и напряженность электростатического поля.

1. Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда

Опытным путем (1910—1914) американский физик Р. Милликен (1868—1953) показал, что электрический заряд **дискретен**, т. е. заряд любого тела составляет целое кратное от **элементарного электрического заряда** e ($e=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл). **Электрон** ($m_e=9,11 \cdot 10^{-31}$ кг) и **протон** ($m_p=1,67 \cdot 10^{-27}$ кг) являются соответственно носителями элементарных отрицательного и положительного зарядов.

Из обобщения опытных данных был установлен *фундаментальный закон природы*, экспериментально подтвержденный в 1843 г. английским физиком М. Фарадеем (1791—1867), — **закон сохранения заряда**: алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы (системы, не обменивающейся зарядами с внешними телами) остается неизменной, какие бы процессы ни происходили внутри этой системы.

Электрический заряд — величина релятивистски инвариантная, т. е. не зависит от системы отсчета, а значит, не зависит от того, движется этот заряд или покоится.

В зависимости от концентрации свободных зарядов тела делятся на проводники, диэлектрики и полупроводники.

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

Закон Кулона (1785): сила взаимодействия F между двумя неподвижными точечными зарядами, находящимися *в вакууме*, пропорциональна зарядам Q_1 и Q_2 и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними:

$$F = k \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2},$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц.

Сила F направлена по прямой, соединяющей взаимодействующие заряды, т. е. является центральной, и соответствует притяжению ($F < 0$) в случае разноименных зарядов и отталкиванию ($F > 0$) в случае одноименных зарядов. Эта сила называется **кулоновской силой**. В векторной форме закон Кулона имеет вид

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \frac{\mathbf{r}_{12}}{r}, \quad (5.1.1)$$

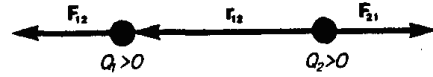
где \mathbf{F}_{12} — сила, действующая на заряд Q_1 со стороны заряда Q_2 , \mathbf{r}_{12} — радиус-вектор, соединяющий заряд Q_2 с зарядом Q_1 , $r = |\mathbf{r}_{12}|$ (рис. 5.1). На заряд Q_2 со стороны заряда Q_1 действует сила $\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12}$.

В СИ коэффициент пропорциональности равен $k = 1/(4\pi\epsilon_0)$.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}.$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2), \text{ или } \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м},$$

$$1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}.$$



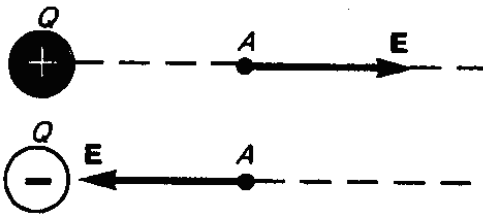
2. Электростатическое поле. Напряженность.

Если в пространство, окружающее электрический заряд, внести другой заряд, то на него будет действовать кулоновская сила; значит, в пространстве, окружающем электрические заряды, существует **силовое поле**.

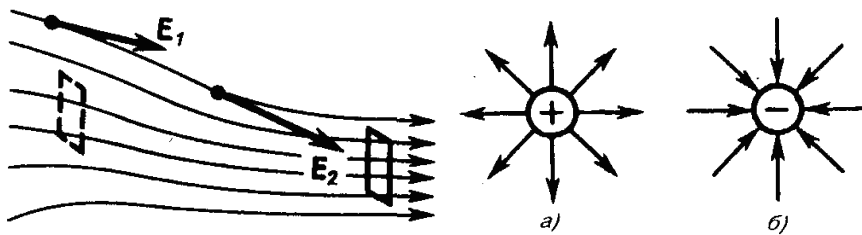
Напряженность электростатического поля в данной точке есть физическая величина, определяемая силой, действующей на пробный единичный положительный заряд, помещенный в эту точку поля:

$$\mathbf{E} = \mathbf{F}/Q_0.$$

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r} \text{ или } E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}.$$



Графически электростатическое поле изображают с помощью **линий напряженности** — линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \mathbf{E} .



Величина

$$d\Phi_E = E_n dS = \mathbf{E} d\mathbf{S}$$

называется **потоком вектора напряженности** через площадку dS .

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \oint_S \mathbf{E} d\mathbf{S},$$

Принцип суперпозиции электростатических полей. Поле диполя

Формула выражает **принцип суперпозиции (наложения) электростатических полей**, согласно которому напряженность \mathbf{E} результирующего поля, создаваемого системой

зарядов, равна *геометрической сумме* напряженностей полей, создаваемых в данной точке каждым из зарядов в отдельности.

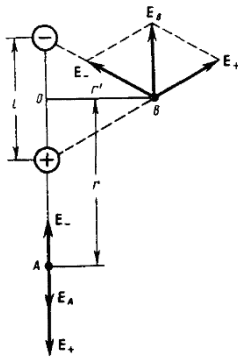
$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i.$$

Электрический диполь — система двух равных по модулю разноименных точечных зарядов $(+Q, -Q)$, расстояние l между которыми значительно меньше расстояния до рассматриваемых точек поля. Вектор

$$\mathbf{p} = |Q|l,$$

совпадающий по направлению с плечом диполя и равный произведению заряда $|Q|$ на плечо l , называется **электрическим моментом диполя** или **дипольным моментом**

1. Напряженность поля на продолжении оси диполя в точке A (рис. 5.1). Как



видно из рисунка, напряженность поля диполя в точке A направлена по оси диполя и по модулю равна

$$E_A = E_+ - E_-.$$

Обозначив расстояние от точки A до середины оси диполя через r для вакуума можно записать

$$E_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{Q}{(r-l/2)^2} - \frac{Q}{(r+l/2)^2} \right] = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{(r+l/2)^2 - (r-l/2)^2}{(r-l/2)^2 (r+l/2)^2}.$$

Согласно определению диполя, $l/2 \ll r$, поэтому

$$E_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{r^3}.$$

Рис.5.1.

2. Напряженность поля на перпендикуляре, восставленном к оси из его середины, в точке B (рис. 5.1). Точка B равноудалена от зарядов, поэтому

$$E_+ = E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{(r')^2 + l^2/4} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{(r')^2},$$

где r' — расстояние от точки B до середины плеча диполя. Из подобия равнобедренных треугольников, опирающихся на плечо диполя и вектор \mathbf{E}_B , получим

$$\frac{E_B}{E_+} = \frac{l}{\sqrt{(r')^2 + (l/2)^2}} \approx \frac{l}{r'}, \quad E_B = E_+ l/r'.$$

$$E_B = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ql}{(r')^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{(r')^3}.$$

Вектор \mathbf{E}_B имеет направление, противоположное вектору электрического момента диполя (вектор \mathbf{p} направлен от отрицательного заряда к положительному).

3. Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме

Вычисление напряженности поля системы электрических зарядов с помощью принципа суперпозиции электростатических полей можно значительно упростить, используя выведенную немецким ученым К. Гауссом (1777—1855) теорему, определяющую поток вектора напряженности электрического поля сквозь произвольную замкнутую поверхность.

$$\Phi_E = \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} 4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0}.$$

Таким образом, для поверхности любой формы, если она замкнута и заключает в себя точечный заряд Q , поток вектора \mathbf{E} будет равен Q/ϵ_0 , т. е.

$$\Phi_E = \oint_S \mathbf{E} d\mathbf{S} = \oint_S E_n dS = Q/\epsilon_0.$$

Знак потока совпадает со знаком заряда Q .

$$\Phi_E = \oint_S \mathbf{E} d\mathbf{S} = \oint_S (\sum_i \mathbf{E}_i) d\mathbf{S} = \sum_i \oint_S \mathbf{E}_i d\mathbf{S}.$$

$$\oint_S \mathbf{E} d\mathbf{S} = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n Q_i.$$

Последняя формула выражает **теорему Гаусса для электростатического поля в вакууме**: поток вектора напряженности электростатического поля *в вакууме* сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности зарядов, деленной на ϵ_0 . Эта теорема выведена математически для векторного поля любой природы русским математиком М. В. Остроградским (1801—1862), а затем независимо от него применительно к электростатическому полю — К. Гауссом.

$$\sum_i Q_i = \int_V \rho dV.$$

$$\oint_S \mathbf{E} d\mathbf{S} = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV.$$

Применение теоремы Гаусса к расчету некоторых электростатических полей в вакууме

1. Поле равномерно заряженной бесконечной плоскости.

$$E = \sigma/(2\epsilon_0).$$

2. Поле двух бесконечных параллельных разноименно заряженных плоскостей

$$E = \sigma/\epsilon_0.$$

3. Поле равномерно заряженной сферической поверхности.

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \quad (r \geq R).$$

4. Поле объемно заряженного шара

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^3} r' \quad (r' \leq R).$$

5. Поле равномерно заряженного бесконечного цилиндра (нити).

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\tau}{r} \quad (r \geq R).$$

Работа электростатического поля. Циркуляция вектора напряженности электростатического поля

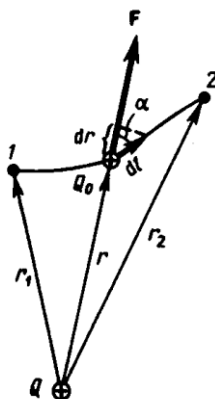
Если в электростатическом поле точечного заряда Q из точки 1 в точку 2 вдоль произвольной траектории (рис. 5.16) перемещается другой точечный заряд Q_0 , то сила, приложенная к заряду, совершает работу. Работа силы \mathbf{F} на элементарном перемещении $d\mathbf{l}$ равна

$$dA = \mathbf{F} d\mathbf{l} = F dl \cos \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ_0}{r^2} dl \cos \alpha.$$

Так как $dl/\cos \alpha = dr$, то

$$dA = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ_0}{r^2} dr.$$

Работа при перемещении заряда Q_0 из точки 1 в точку 2



$$A_{12} = \int_{r_1}^{r_2} dA = \frac{QQ_0}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{QQ_0}{r_1} - \frac{QQ_0}{r_2} \right)$$

не зависит от траектории перемещения, а определяется только положениями начальной 1 и конечной 2 точек. Следовательно, электростатическое поле точечного заряда является **потенциальным**, а электростатические силы — **консервативными**.

$$\oint_L dA = 0.$$

Интеграл $\oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l} = \oint_L E_l dl = 0$ называется **циркуляцией вектора напряженности**.

4. Потенциал электростатического поля

Потенциал φ в какой-либо точке электростатического поля есть физическая величина, определяемая потенциальной энергией единичного положительного заряда, помещенного в эту точку.

$$\varphi = U/Q_0.$$

Потенциал поля, создаваемого точечным зарядом Q , равен

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}. \quad ($$

$$A_{12} = U_1 - U_2 = Q_0 (\varphi_1 - \varphi_2),$$

Разность потенциалов двух точек 1 и 2 в электростатическом поле определяется работой, совершаемой силами поля, при перемещении единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2.

$$\begin{aligned} A_{12} &= \int_1^2 Q_0 \mathbf{E} d\mathbf{l}, \\ \varphi_1 - \varphi_2 &= \int_1^2 \mathbf{E} d\mathbf{l} = \int_1^2 E_l dl, \\ \varphi &= A_{\infty}/Q_0. \end{aligned}$$

Потенциал — физическая величина, определяемая работой по перемещению единичного положительного заряда при удалении его из данной точки поля в бесконечность.

Единица потенциала — **вольт** (В): 1 В есть потенциал такой точки поля, в которой заряд в 1 Кл обладает потенциальной энергией 1 Дж (1 В = 1 Дж/Кл).

1 В/м: 1 Н/Кл = 1 Н·м/(Кл·м) = 1 Дж/(Кл·м) = 1 В/м.

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{r_i}.$$

5. Напряженность как градиент потенциала. Эквипотенциальные поверхности

Найдем взаимосвязь между напряженностью электростатического поля, являющейся его *силовой характеристикой*, и потенциалом — *энергетической характеристикой поля*.

$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad \mathbf{E} = -\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \mathbf{k} \right),$$

где $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ — единичные векторы координатных осей x, y, z .

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi, \text{ или } \mathbf{E} = -\nabla \varphi,$$

т. е. напряженность E поля равна градиенту потенциала со знаком минус. Знак минус определяется тем, что вектор напряженности E поля направлен в *сторону убывания* потенциала.

Для графического изображения распределения потенциала электростатического поля, как и в случае поля тяготения, пользуются **эквипотенциальными поверхностями** — поверхностями, во всех точках которых потенциал φ имеет одно и то же значение.

Вычисление разности потенциалов по напряженности поля

1. Поле равномерно заряженной бесконечной плоскости

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{x_1}^{x_2} E dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} dx = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} (x_2 - x_1).$$

2. Поле двух бесконечных параллельных разноименно заряженных плоскостей

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_0^d E dx = \int_0^d \frac{\sigma}{\varepsilon_0} dx = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} d.$$

3. Поле равномерно заряженной сферической поверхности

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q}{r^2} dr = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q}{r} \qquad \varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R}.$$

4. Поле объемно заряженного шара

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q}{r^2} dr = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

5. Поле равномерно заряженного бесконечного цилиндра

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

Вопросы:

1. Что такое электрический заряд. Закон сохранения электрических зарядов.
2. Напряженность. Теорема Гаусса. Применение теоремы Гаусса к расчету напряженностей электростатических полей.
3. Работа электростатического поля. Потенциал электростатического поля.
4. Напряженность как градиент потенциала. Эквипотенциальные поверхности

Тема: Постоянный электрический ток.

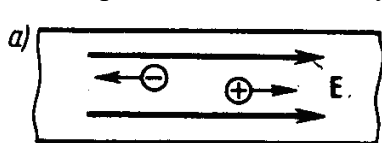
1. Общие характеристики и условия существования электрического тока.
2. Сторонние силы. Электродвижущая сила и напряжение
3. Закон Ома. Сопротивление проводников.
4. Работа и мощность тока. Закон Джоуля — Ленца
5. Закон Ома для неоднородного участка цепи
6. Правила Кирхгофа для разветвленных цепей

1. Общие характеристики и условия существования электрического тока.

Электрическим током называется любое упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов.

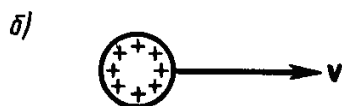
Для возникновения и существования электрического тока необходимо, с одной стороны, наличие свободных **носителей тока** — заряженных частиц, способных перемещаться упорядоченно, а с другой — *наличие электрического поля*, энергия которого, каким-то образом восполняясь, расходовалась бы на их упорядоченное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

Количественной мерой электрического тока служит **сила тока** I скалярная физическая величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени:



$$I = \frac{dQ}{dt}.$$

Если сила тока и его направление не изменяются со временем, то такой ток называется **постоянным**. Для постоянного тока



$$I = Q/t,$$

где Q — электрический заряд, проходящий за время t через поперечное сечение проводника. Единица силы тока — ампер (А).

Физическая величина, определяемая силой тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника, перпендикулярного направлению тока, называется **плотностью тока**:

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}.$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = ne \langle v \rangle S,$$

$$j = ne \langle v \rangle.$$

$$I = \int_S j dS,$$

2. Сторонние силы. Электродвижущая сила и напряжение

Для существования постоянного тока необходимо наличие в цепи устройства, способного создавать и поддерживать разность потенциалов за счет работы сил неэлектростатического происхождения. Такие устройства называются **источниками тока**. Силы *неэлектростатического происхождения*, действующие на заряды со стороны источников тока, называются **сторонними**.

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

$$\mathcal{E} = A/Q_0, \quad F_{\text{ст}} = E_{\text{ст}} Q_0,$$

$$A = \oint F_{\text{ст}} dl = Q_0 \oint E_{\text{ст}} dl, \quad \mathcal{E} = \oint E_{\text{ст}} dl,$$

$$\mathcal{E}_{12} = \int_1^2 E_{\text{ст}} dl.$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{\text{ст}} + \mathbf{F}_e = Q_0(\vec{E}_{\text{ст}} + \vec{E})$$

$$A_{12} = Q_0 \int_1^2 E_{\text{ст}} dl + Q_0 \int_1^2 E dl.$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E dl = \int_1^2 E_l dl,$$

$$A_{12} = Q_0 \mathcal{E}_{12} + Q_0 (\varphi_1 - \varphi_2).$$

$$A_{12} = Q_0 \mathcal{E}_{12}.$$

Напряжением U на участке 1—2 называется физическая величина, определяемая работой, совершаемой суммарным полем электростатических (кулоновских) и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда на данном участке цепи.

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}.$$

3. Закон Ома. Сопротивление проводников

Немецкий физик Г. Ом (1787;—1854) экспериментально установил, что сила тока I , текущего по однородному металлическому проводнику (т. е. проводнику, в котором не действуют сторонние силы), пропорциональна напряжению U на концах проводника:

$$I = U/R,$$

где R — электрическое сопротивление проводника. Это уравнение выражает **закон Ома для участка цепи** (не содержащего источника тока): сила тока в проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника.

1 Ом — сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 В течет постоянный ток 1 А. Величина

$$G = 1/R$$

называется **электрической проводимостью** проводника. Единица проводимости — **сименс** (См): 1 См — проводимость участка электрической цепи сопротивлением 1 Ом.

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ — коэффициент пропорциональности, характеризующий материал проводника и называемый **удельным электрическим сопротивлением**. Единица удельного электрического сопротивления — ом·метр (Ом·м).

$$\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \frac{U}{l}, \quad (5.3.3)$$

где величина, обратная удельному сопротивлению,

$$\gamma = 1/\rho$$

называется **удельной электрической проводимостью** вещества проводника. Ее единица — сименс на метр (См/м). Учитывая, что $U/l = E$ — напряженность электрического поля в проводнике, $I/S = j$ — плотность тока, тогда можно записать в виде

$$j = \gamma E.$$

Так как в изотропном проводнике носители тока в каждой точке движутся в направлении вектора \mathbf{E} , то направления \mathbf{j} и \mathbf{E} совпадают.

$$\mathbf{j} = \gamma \mathbf{E}.$$

Это выражение **закон Ома в дифференциальной форме**, связывающий плотность тока в любой точке внутри проводника с напряженностью электрического поля в этой же точке. Это соотношение справедливо и для переменных полей.

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t), \quad R = R_0 (1 + \alpha t),$$

где ρ и ρ_0 , R и R_0 — соответственно удельные сопротивления и сопротивления проводника при t и 0°C , α — **температурный коэффициент сопротивления**, для чистых металлов (при не очень низких температурах) близкий к $1/273 \text{ K}^{-1}$. Следовательно, температурная зависимость сопротивления может быть представлена в виде

$$R = \alpha R_0 T,$$

где T — термодинамическая температура.

4. Работа и мощность тока. Закон Джоуля — Ленца

Работа тока

$$dA = U dq = IU dt.$$

Если сопротивление проводника R , то, используя закон Ома $I = U/R$, получим

$$dA = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt.$$

$$P = \frac{dA}{dt} = UI = I^2 R = U^2/R.$$

1 Вт·ч — работа тока мощностью 1 Вт в течение 1 ч;

1 Вт·ч = 3600 Вт·с = $3,6 \cdot 10^3$ Дж; 1 кВт·ч = 10^3 Вт·ч = $3,6 \cdot 10^6$ Дж.

$$dQ = dA.$$

$$dQ = IU dt = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt.$$

Это выражение представляет собой **закон Джоуля—Ленца**, экспериментально установленный независимо друг от друга Дж. Джоулем и Э. Х. Ленцем.

$$dQ = I^2 R dt = \frac{\rho dl}{dS} (j \cdot S)^2 dt = \rho j^2 dV dt.$$

Количество теплоты, выделяющееся за единицу времени в единице объема, называется **удельной тепловой мощностью тока**. Она равна

$$w = \rho j^2.$$

$$w = jE = \gamma E^2.$$

Эти формулы являются обобщенным выражением **закона Джоуля—Ленца в дифференциальной форме**, пригодным для любого проводника.

5. Законы Ома

Следующее выражение представляет собой **закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме**, который является **обобщенным законом Ома**.

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}}{R}.$$

Если на данном участке цепи *источник тока отсутствует* ($\mathcal{E}_{12} = 0$), то приходим к **закону Ома для однородного участка цепи**:

$$I = (\varphi_1 - \varphi_2)/R = U/R$$

Если же электрическая цепь *замкнута*, то выбранные точки 1 и 2 совпадают, $\varphi_1 = \varphi_2$; тогда получаем **закон Ома для замкнутой цепи**:

$$I = \mathcal{E}/R,$$

где \mathcal{E} — э.д.с., действующая в цепи, R — суммарное сопротивление всей цепи. В общем случае $R = r + R_1$, где r — внутреннее сопротивление источника тока, R_1 — сопротивление внешней цепи.

Поэтому закон Ома для замкнутой цепи будет иметь вид

$$I = \mathcal{E}/(r + R_1).$$

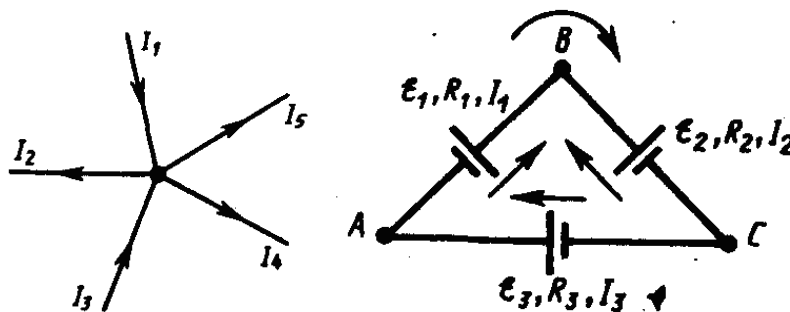
Если цепь *разомкнута* и, следовательно, в ней ток отсутствует ($I = 0$), то из закона Ома получим, что $\mathcal{E}_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$, т. е. э.д.с., действующая в разомкнутой цепи, равна разности потенциалов на ее концах.

6. Правила Кирхгофа для разветвленных цепей

Обобщенный закон Ома позволяет рассчитать практически любую сложную цепь. Однако непосредственный расчет разветвленных цепей, содержащих несколько замкнутых контуров (контуров могут иметь общие участки, каждый из контуров может иметь несколько источников тока и т. д.), довольно сложен. Эта задача решается более просто с помощью двух правил Кирхгофа.

Первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_k I_k = 0.$$



Складывая почленно эти уравнения, получим

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3.$$

Это уравнение выражает **второе правило Кирхгофа**: в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I_i на сопротивления R_i соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме э.д.с., встречающихся в этом контуре:

$$\sum_i I_i R_i = \sum_k \mathcal{E}_k.$$

Вопросы:

1. Какие условия существования электрического тока?
2. Что такое сторонние силы, электродвижущая сила, напряжение?
3. Закон Ома. Сопротивление проводников.
4. Работа и мощность тока. Закон Джоуля — Ленца
5. Законы Ома
6. Правила Кирхгофа для разветвленных цепей

Лекция 6

Тема: Магнитное поле в вакууме и в веществе.

1. Магнитное поле. Принцип суперпозиции.
2. Закон Био - Савара - Лапласа.
3. Закон Ампера. Сила Лоренца. Эффект Холла.
4. Циркуляция вектора В магнитного поля в вакууме
5. Теорема Гаусса для магнитного поля при перемещении проводника с током в магнитном поле.

1. Магнитное поле и его характеристики

Опыт показывает, что, подобно тому, как в пространстве, окружающем электрические заряды, возникает электростатическое поле, так и в пространстве, окружающем токи и постоянные магниты, возникает силовое поле, называемое **магнитным**.

Подобно тому, как при исследовании электростатического поля использовались точечные заряды, при исследовании магнитного поля используется *замкнутый плоский контур с током (рамка с током)*, линейные размеры которого малы по сравнению с расстоянием до токов, образующих магнитное поле. Направление нормали определяется *правилом правого винта*: за положительное направление нормали принимается направление поступательного движения винта, головка которого вращается в направлении тока, текущего в рамке (рис. 6.1).

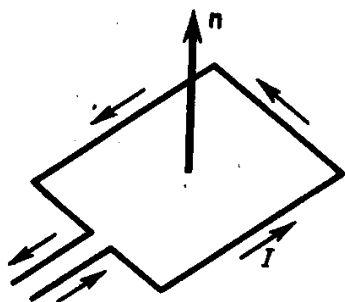


Рис.6.1.

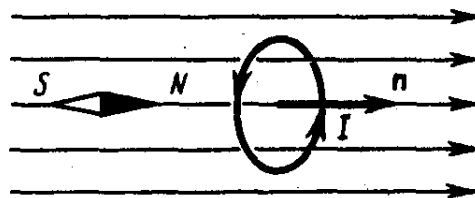


Рис.6.2.

За направление магнитного поля в данной точке принимается направление, вдоль которого располагается положительная нормаль к рамке (рис. 6.2).

Вращающий момент сил зависит как от свойств поля в данной точке, так и от свойств рамки и определяется формулой

$$\mathbf{M} = [\mathbf{p}_m \mathbf{B}],$$

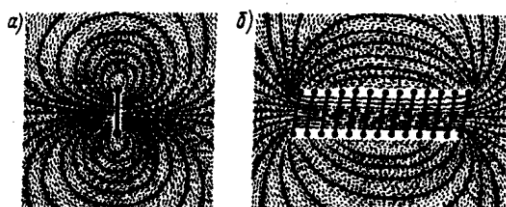
где \mathbf{p}_m — **вектор магнитного момента** рамки с током (\mathbf{B} — **вектор магнитной индукции**, количественная характеристика магнитного поля). Для плоского контура с током I

$$\mathbf{p}_m = IS\mathbf{n},$$

где S — площадь поверхности контура (рамки), \mathbf{n} — единичный вектор нормали к поверхности рамки. Направление \mathbf{p}_m совпадает, таким образом, с направлением положительной нормали.

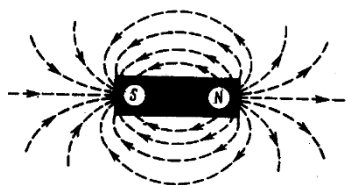
Магнитная индукция в данной точке *однородного* магнитного поля определяется максимальным вращающим моментом, действующим на рамку с магнитным моментом, равным единице, когда нормаль к рамке перпендикулярна направлению поля.

$$B = M_{\max}/p_m.$$



Так как магнитное поле является *силовым*, то его, по аналогии с электрическим, изображают с помощью **линий магнитной индукции** — линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \mathbf{B} .

Линии магнитной индукции всегда *замкнуты* и охватывают проводники с током. Этим они отличаются от линий напряженности электростатического поля, которые являются *разомкнутыми* (начинаются на положительных зарядах и кончаются на отрицательных).



Вектор магнитной индукции \mathbf{B} характеризует *резльтирующее* магнитное поле, создаваемое всеми *макро- и микротоками*, т. е. при одном и том же токе и прочих равных условиях вектор \mathbf{B} в *различных* средах будет иметь *разные* значения.

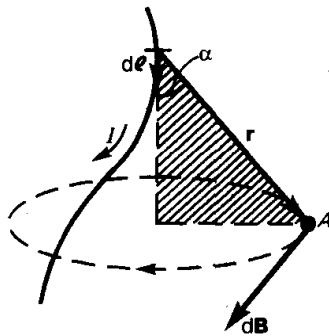
Магнитное поле *макродтоков* описывается **вектором напряженности H** .

$$B = \mu_0 \mu H,$$

где μ_0 — магнитная постоянная, μ — безразмерная величина — **магнитная проницаемость среды**, показывающая, во сколько раз магнитное поле макродтоков H усиливается за счет поля микродтоков среды. Для вакуума $\mu=1$.

2. Закон Био — Савара — Лапласа и его применение к расчету магнитного поля

Магнитное поле постоянных токов различной формы изучалось французскими учеными Ж. Био (1774—1862) и Ф. Саваром (1791—1841). Результаты этих опытов были обобщены выдающимся французским математиком и физиком П. Лапласом.



Закон Био — Савара — Лапласа для проводника с током I , элемент dl которого создает в некоторой точке A (рис. 6.5) индукцию поля dB , записывается в виде

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I [dl, r]}{r^3},$$

где dl — вектор, по модулю равный длине dl элемента проводника и совпадающий по направлению с током, r — радиус-вектор, проведенный из элемента dl проводника в точку A поля, r — модуль радиуса-вектора r .

Модуль вектора dB определяется выражением

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I dl \sin \alpha}{r^2},$$

где α — угол между векторами dl и r .

Для магнитного поля, как и для электрического, справедлив **принцип суперпозиции**: магнитная индукция результирующего поля, создаваемого несколькими токами или движущимися зарядами, равна векторной сумме магнитных индукций складываемых полей, создаваемых каждым током или движущимся зарядом в отдельности:

$$B = \sum_{i=1}^n B_i.$$

1. Магнитное поле прямого тока

$$dB = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R} \sin \alpha d\alpha.$$

$$B = \int dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{R} \int_0^\pi \sin \alpha d\alpha = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I}{R}.$$

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I}{R}.$$

2. Магнитное поле в центре кругового проводника с током

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{R^2} dl.$$

$$B = \int dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{R^2} \int dl = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R^2} 2\pi R = \mu_0 \mu \frac{I}{2R}.$$

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2R}.$$

3. Закон Ампера. Сила Лоренца

Модуль силы Ампера вычисляется по формуле

$$dF = IB \, dl \sin \alpha,$$

где α — угол между векторами dl и B .

Закон Ампера применяется для определения силы взаимодействия двух токов.

Опыт показывает, что магнитное поле действует не только на проводники с током, но и на отдельные заряды, движущиеся в магнитном поле. Сила, действующая на электрический заряд Q , движущийся в магнитном поле со скоростью v , называется **силой Лоренца** и выражается формулой

$$F = Q[vB],$$

где B — индукция магнитного поля, в котором заряд движется.

Направление силы Лоренца определяется с помощью **правила левой руки**: если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входил вектор B , а четыре вытянутых пальца направить вдоль вектора v (для $Q > 0$ направления I и v совпадают, для $Q < 0$ — противоположны), то отогнутый большой палец покажет направление силы, действующей на *положительный заряд*.

Модуль силы Лоренца равен

$$F = QvB \sin \alpha,$$

где α — угол между v и B .

Отметим еще раз, что магнитное поле *не действует на покоящийся электрический заряд*. В этом существенное отличие магнитного поля от электрического. *Магнитное поле действует только на движущиеся в нем заряды.*

Эффект Холла

Эффект Холла* (1879) — это возникновение в металле (или полупроводнике) с током плотностью j , помещенном в магнитное поле B , электрического поля в направлении, перпендикулярном B и j .

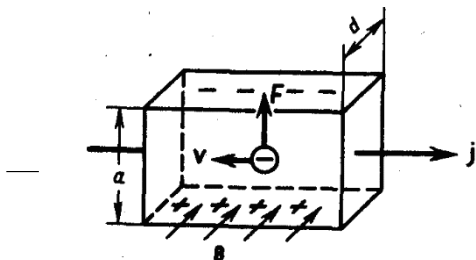


Рис.6.6.

Таким образом, у верхнего края пластинки возникнет повышенная концентрация электронов (он зарядится отрицательно), а у нижнего — их недостаток (зарядится положительно). В результате этого между краями пластинки возникнет дополнительное поперечное электрическое поле, направленное снизу вверх. Когда напряженность E_B этого поперечного поля достигнет такой величины, что его действие на заряды будет уравнивать силу Лоренца, то установится стационарное распределение зарядов в поперечном направлении. Тогда

$$eE_B = e\Delta\phi/a = evB, \text{ или } \Delta\phi = vBa,$$

где a — ширина пластинки, $\Delta\phi$ — *поперечная (холловская) разность потенциалов*.

Учитывая, что сила тока $I = jS = nevS$ (S — площадь поперечного сечения пластинки толщиной d , n — концентрация электронов, v — средняя скорость упорядоченного движения электронов), получим

$$\Delta\varphi = \frac{I}{nead} Ba = \frac{1}{en} \frac{IB}{d} = R \frac{IB}{d},$$

т. е. холловская поперечная разность потенциалов прямо пропорциональна магнитной индукции B , силе тока I и обратно пропорциональна толщине пластинки d . $R=1/(en)$ — **постоянная Холла**, зависящая от вещества.

5. Циркуляция вектора \mathbf{B} магнитного поля в вакууме

Циркуляцией вектора \mathbf{B} по заданному замкнутому контуру называется интеграл

$$\oint_L \mathbf{B} d\mathbf{l} = \oint_L B_l d\mathbf{l},$$

где $d\mathbf{l}$ — вектор элементарной длины контура, направленной вдоль обхода контура, $B_l = B \cos \alpha$ — составляющая вектора \mathbf{B} в направлении касательной к контуру (с учетом выбранного направления обхода), α — угол между векторами \mathbf{B} и $d\mathbf{l}$.

Закон полного тока для магнитного поля в вакууме (теорема о циркуляции вектора \mathbf{B}):

циркуляция вектора \mathbf{B} по произвольному замкнутому контуру равна произведению магнитной постоянной μ_0 на алгебраическую сумму токов, охватываемых этим контуром:

$$\oint_L \mathbf{B} d\mathbf{l} = \oint_L B_l d\mathbf{l} = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k,$$

где n — число проводников с токами, охватываемых контуром L произвольной формы.

Сравнивая выражения для циркуляции векторов \mathbf{E} и \mathbf{B} , видим, что между ними существует *принципиальное различие*. Циркуляция вектора \mathbf{E} электростатического поля всегда равна нулю, т. е. электростатическое поле является *потенциальным*. Циркуляция вектора \mathbf{B} магнитного поля не равна нулю. Такое поле называется *вихревым*.

Магнитные поля соленоида и тороида

Рассчитаем, применяя теорему о циркуляции, индукцию магнитного поля внутри соленоида.

Для нахождения магнитной индукции B выберем замкнутый прямоугольный контур $ABCD$, как показано на рис. 6.13. Циркуляция вектора \mathbf{B} по замкнутому контуру $ABCD$, охватывающему все N витков равна

$$\oint_{ABCD} B_l d\mathbf{l} = \mu_0 NI.$$

$$\int_{DA} B_l d\mathbf{l} = Bl = \mu_0 NI.$$

Тогда магнитная индукция поля внутри соленоида (в вакууме):

$$B = \mu_0 NI/l.$$

Важное значение для практики имеет также магнитное поле **тороида** — кольцевой катушки, витки которой намотаны на сердечник, имеющий форму тора (рис. 6.14). Магнитное поле, как показывает опыт, сосредоточено внутри тороида, вне его поле отсутствует.

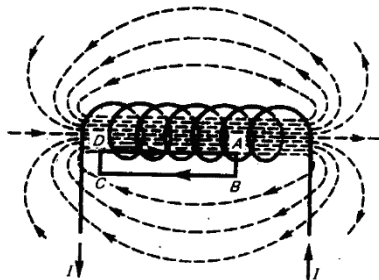


Рис. 6.7

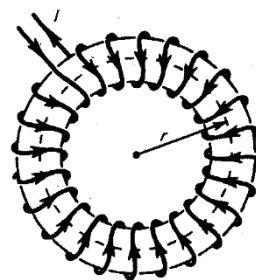


Рис. 6.8

Линии магнитной индукции в данном случае, как следует из соображений симметрии, есть окружности, центры которых расположены по оси тороида. В качестве

контура выберем одну такую окружность радиуса r . Тогда, по теореме о циркуляции $B \cdot 2\pi r = \mu_0 NI$, откуда следует, что магнитная индукция внутри тороида (в вакууме)

$$B = \mu_0 NI / (2\pi r),$$

где N — число витков тороида.

Если контур проходит вне тороида, то токов он не охватывает и $B \cdot 2\pi r = 0$. Это означает, что поле вне тороида отсутствует (что показывает и опыт).

6. Поток вектора магнитной индукции. Теорема Гаусса для поля \mathbf{B}

Потоком вектора магнитной индукции (магнитным потоком) через площадку dS называется *скалярная* физическая величина, равная

$$d\Phi_B = \mathbf{B} d\mathbf{S} = B_n dS,$$

где $B_n = B \cos \alpha$ — проекция вектора \mathbf{B} на направление нормали к площадке dS (α — угол между векторами \mathbf{n} и \mathbf{B}), $d\mathbf{S} = dS \mathbf{n}$ — вектор, модуль которого равен dS , а направление его совпадает с направлением нормали \mathbf{n} к площадке.

Поток вектора магнитной индукции Φ_B через произвольную поверхность S равен

$$\Phi_B = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = \int_S B_n dS.$$

Для однородного поля и плоской поверхности, расположенной перпендикулярно вектору \mathbf{B} , $B_n = B = \text{const}$ и

$$\Phi_B = BS.$$

Из этой формулы определяется единица магнитного потока **вебер** (Вб): 1 Вб — магнитный поток, проходящий сквозь плоскую поверхность площадью 1 м^2 , расположенную перпендикулярно однородному магнитному полю, индукция которого равна 1 Тл ($1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$).

Теорема Гаусса для поля \mathbf{B} : поток вектора магнитной индукции сквозь любую замкнутую поверхность равен нулю:

$$\oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = \oint_S B_n dS = 0.$$

Эта теорема отражает факт отсутствия магнитных зарядов, вследствие чего линии магнитной индукции не имеют ни начала, ни конца и являются замкнутыми.

$$B = \mu_0 \mu NI / l.$$

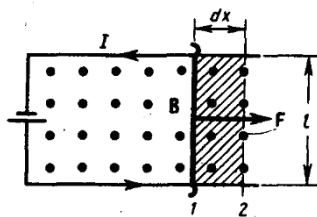
$$\Phi_1 = BS,$$

Потокосцепление

$$\Psi = \Phi_1 N = NBS = \mu_0 \mu \frac{N^2 I}{l} S.$$

Работа по перемещению проводника и контура с током в магнитном поле

На проводник с током в магнитном поле действуют силы, определяемые законом Ампера. Если проводник не закреплен (например, одна из сторон контура изготовлена в виде подвижной перемычки, рис. 6.9), то под действием силы Ампера он будет в магнитном поле перемещаться. Следовательно, магнитное поле совершает работу по перемещению проводника с током.



Сила, направление которой определяется по правилу левой руки, а значение — по закону Ампера, равна

$$F = IlB.$$

Под действием этой силы проводник переместится параллельно самому себе на отрезок dx из положения 1 в положение 2. Работа, совершаемая магнитным полем, равна

$$dA = Fdx = IBldx = IBdS = Id\Phi,$$

$$dA = Id\Phi,$$

т. е. работа по перемещению проводника с током в магнитном поле равна произведению силы тока на магнитный поток, *пересеченный движущимся проводником*.

Ускорители заряженных частиц

Типы ускорителей заряженных частиц:

1. Линейный ускоритель. Ускорение частиц осуществляется электростатическим полем, создаваемым, например, высоковольтным генератором Ван-де-Граафа. Заряженная частица проходит поле однократно: заряд Q , проходя разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$, приобретает энергию $W = Q(\varphi_1 - \varphi_2)$. Таким способом частицы ускоряются до ≈ 10 МэВ. Их дальнейшее ускорение с помощью источников постоянного напряжения невозможно из-за утечки зарядов, пробоев и т. д.

2. Линейный резонансный ускоритель. Ускорение заряженных частиц осуществляется переменным электрическим полем сверхвысокой частоты, *синхронно* изменяющимся с движением частиц. Таким способом протоны ускоряются до энергий порядка десятков мегаэлектрон-вольт, электроны — до десятков гигаэлектрон-вольт.

3. Циклотрон — циклический резонансный ускоритель тяжелых частиц (протонов, ионов). Между полюсами сильного электромагнита помещается вакуумная камера, в которой находятся два электрода (1 и 2) в виде полых металлических полуцилиндров, или дуантов. К дуантам приложено переменное электрическое поле. Магнитное поле, создаваемое электромагнитом, однородно и перпендикулярно плоскости дуантов.

4. Фазотрон (синхроциклотрон) — циклический резонансный ускоритель тяжелых заряженных частиц (например, протонов, ионов, α -частиц), в котором управляющее магнитное поле постоянно, а частота ускоряющего электрического поля медленно изменяется с периодом.

5. Синхротрон — циклический резонансный ускоритель ультрарелятивистских электронов, в котором управляющее магнитное поле изменяется во времени, а частота ускоряющего электрического поля постоянна. Электроны в синхротроне ускоряются до энергий 5—10 ГэВ.

6. Синхрофазотрон — циклический резонансный ускоритель тяжелых заряженных частиц (протонов, ионов), в котором объединяются свойства фазотрона и синхротрона, т. е. управляющее магнитное поле и частота ускоряющего электрического поля одновременно изменяются во времени так, чтобы радиус равновесной орбиты частиц оставался постоянным. Протоны ускоряются в синхрофазотроне до энергий 500 ГэВ.

7. Бетатрон — циклический индукционный ускоритель электронов, в котором ускорение осуществляется вихревым электрическим полем, индуцируемым переменным магнитным полем, удерживающим электроны на круговой орбите. В бетатроне в отличие от рассмотренных выше ускорителей не существует проблемы синхронизации. Электроны в бетатроне ускоряются до энергий 100 МэВ. При $W > 100$ МэВ режим ускорения в бетатроне нарушается электромагнитным излучением электронов. Особенно распространены бетатроны на энергии 20—50 МэВ.

Вопросы:

1. Что такое магнитное поле. Принцип суперпозиции.
2. О чем гласят законы Био - Савара – Лапласа, Ампера, Лоренца?
3. В чем заключается эффект Холла?

4. Циркуляция вектора \mathbf{B} магнитного поля в вакууме.
5. Теорема Гаусса для магнитного поля при перемещении проводника с током в магнитном поле.

Лекция 7

Тема: Явление электромагнитной индукции.

1. Основной закон электромагнитной индукции. Опыты Фарадея.
2. Вращение рамки в магнитном поле
3. Индуктивность контура. Самоиндукция
4. Взаимная индукции. Трансформатор.
5. Энергия магнитного поля. Плотность энергии магнитного поля.

1. Основной закон электромагнитной индукции. Опыты Фарадея.

Известно, что электрические токи создают вокруг себя магнитное поле. Связь магнитного поля с током привела к многочисленным попыткам возбудить ток в контуре с помощью магнитного поля. Эта фундаментальная задача была блестяще решена в 1831 г. английским физиком М. Фарадеем, открывшим **явление электромагнитной индукции**. Оно заключается в том, что в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции, охватываемого этим контуром, возникает электрический ток, получивший название индукционного.

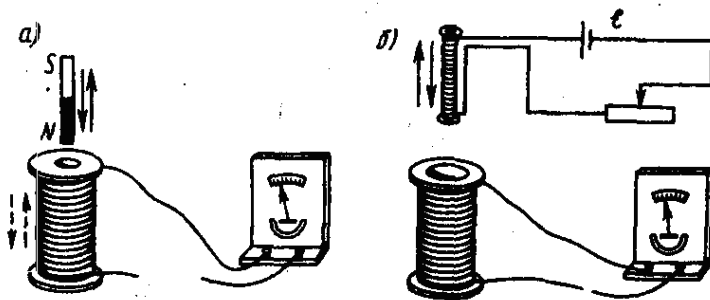


Рис.7.1.

Закон Фарадея и его вывод из закона сохранения энергии

Обобщая результаты своих многочисленных опытов, Фарадей пришел к количественному закону электромагнитной индукции. Он показал, что всякий раз, когда происходит изменение сцепленного с контуром потока магнитной индукции, в контуре возникает индукционный ток; возникновение индукционного тока указывает на наличие в цепи электродвижущей силы, называемой **электродвижущей силой электромагнитной индукции**. Значение индукционного тока, а следовательно, и э.д.с. электромагнитной индукции \mathcal{E}_i , определяются только скоростью изменения магнитного потока, т. е.

$$\mathcal{E}_i \sim \frac{d\Phi}{dt}.$$

Знак магнитного потока зависит от выбора положительной нормали к контуру.

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Знак минус показывает, что увеличение потока $\left(\frac{d\Phi}{dt} > 0\right)$ вызывает э. д. с. $\mathcal{E}_i < 0$, т. е. поле индукционного тока направлено навстречу потоку; уменьшение потока $\left(\frac{d\Phi}{dt} < 0\right)$ вызывает $\mathcal{E}_i > 0$, т.е. направления потока и поля индукционного тока совпадают. Знак минус в формуле определяется правилом Ленца — общим правилом для нахождения направления индукционного тока, выведенного в 1833 г.

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

2. Вращение рамки в магнитном поле

Явление электромагнитной индукции применяется для преобразования механической энергии в энергию электрического тока. Для этой цели используются **генераторы**, принцип действия которых можно рассмотреть на примере плоской рамки, вращающейся в однородном магнитном поле (рис. 7.2).

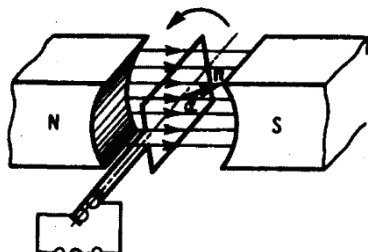


Рис. 7.2

При вращении рамки в ней будет возникать переменная э.д.с. индукции

$$\Phi = B \cdot S = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t,$$

где $\alpha = \omega t$ — угол поворота рамки в момент времени t (начало отсчета выбрано так, чтобы при $t=0$ было $\alpha=0$).

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t,$$

При $\sin \omega t = 1$ э.д.с. \mathcal{E}_i максимальна, т. е.

$$\mathcal{E}_{\max} = BS\omega.$$

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t.$$

Таким образом, если в однородном магнитном поле равномерно вращается рамка, то в ней возникает переменная э.д.с., изменяющаяся по гармоническому закону.

Процесс превращения механической энергии в электрическую обратим. Если по рамке, помещенной в магнитное поле, пропускать электрический ток, то на нее будет действовать вращающий момент и рамка начнет вращаться. На этом принципе основана работа **электродвигателей**, предназначенных для превращения электрической энергии в механическую.

Индукционный ток возникает не только в линейных проводниках, но и в массивных сплошных проводниках, помещенных в переменное магнитное поле. Эти токи оказываются замкнутыми в толще проводника и поэтому называются **вихревыми**. Их также называют **токами Фуко** — по имени первого исследователя.

3. Индуктивность контура. Самоиндукция

Электрический ток, текущий в замкнутом контуре, создает вокруг себя магнитное поле, индукция которого, по закону Био — Савара — Лапласа, пропорциональна току. Сцепленный с контуром магнитный поток Φ поэтому пропорционален току I в контуре:

$$\Phi = LI, \quad (7.3.1)$$

где коэффициент пропорциональности L называется **индуктивностью контура**.

Из выражения (7.3.1) определяется единица индуктивности **генри** (Гн): 1 Гн — индуктивность такого контура, магнитный поток самоиндукции которого при токе в 1 А равен 1 Вб:

$$1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб/А} = 1 \text{ В} \cdot \text{с/А}.$$

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l},$$

т. е. индуктивность соленоида зависит от числа витков соленоида N , его длины l , площади S и магнитной проницаемости μ вещества, из которого изготовлен сердечник соленоида.

Применяя к явлению самоиндукции закон Фарадея, получим, что э. д. с. самоиндукции

$$\mathcal{E}_s = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d(LI)}{dt} = - \left(L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt} \right).$$

$$\mathcal{E}_s = - L \frac{dI}{dt},$$

где знак минус, обусловленный правилом Ленца, показывает, что наличие индуктивности в контуре приводит к *замедлению изменения* тока в нем.

$\frac{dI}{dt} > 0$ и $\mathcal{E}_s < 0$, т. е. ток самоиндукции направлен навстречу току, обусловленному внешним источником, и замедляет его возрастание.

$\frac{dI}{dt} < 0$ и $\mathcal{E}_s > 0$, т. е. индукционный ток имеет такое же направление, как и убывающий ток в контуре, и замедляет его убывание.

Токи при размыкании и замыкании цепи

При всяком изменении силы тока в проводящем контуре возникает э. д. с. самоиндукции, в результате чего в контуре появляются дополнительные токи, называемые **экстратоками самоиндукции**.

Рассмотрим процесс выключения тока в цепи, содержащей источник тока с э.д.с. \mathcal{E} , резистор сопротивлением R и катушку индуктивностью L . Под действием внешней э. д. с. в цепи течет постоянный ток

$$I_0 = \mathcal{E}/R$$

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}, \quad IR = -L \frac{dI}{dt}.$$

$$\frac{dI}{I} = - \frac{R}{L} dt.$$

$$I = I_0 e^{-t/\tau},$$

где $\tau = L/R$ — постоянная, называемая **временем релаксации**. τ есть время, в течение которого сила тока уменьшается в e раз.

Таким образом, в процессе отключения источника тока сила тока убывает по экспоненциальному закону и определяется кривой I на рис. 7.3. Чем больше индуктивность цепи и меньше ее сопротивление, тем больше τ и, следовательно, тем медленнее уменьшается ток в цепи при ее размыкании.

При замыкании цепи помимо внешней э. д. с. \mathcal{E} возникает э. д. с. самоиндукции $\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}$, препятствующая, согласно правилу Ленца, возрастанию тока. По закону Ома, $IR = \mathcal{E} + \mathcal{E}_s$,

Рис.7.3.

$$IR = \mathcal{E} - L \frac{dI}{dt}.$$

Введя новую переменную $u = IR - \mathcal{E}$, преобразуем это уравнение к виду

$$\frac{du}{u} = - \frac{dt}{\tau},$$

где τ — время релаксации.

В момент замыкания ($t=0$) сила тока $I = 0$ и $u = -\mathcal{E}$. Следовательно, интегрируя по u (от $-\mathcal{E}$ до $IR - \mathcal{E}$) и t (от 0 до t), находим $\ln[(IR - \mathcal{E})/(-\mathcal{E})] = -t/\tau$, или

$$I = I_0 (1 - e^{-t/\tau}),$$

где $I_0 = \mathcal{E}/R$ — установившийся ток (при $t \rightarrow \infty$).

4. Взаимная индукция

Рассмотрим два неподвижных контура (1 и 2), расположенных достаточно близко друг от друга (рис. 7.4). Если в контуре 1 течет ток I_1 , то магнитный поток, создаваемый этим током (поле, создающее этот поток, на рисунке изображено сплошными линиями), пропорционален I_1 . Обозначим через Φ_{21} ту часть потока, которая пронизывает контур 2. Тогда

$$\Phi_{21} = L_{21} I_1,$$

где L_{12} — коэффициент пропорциональности.

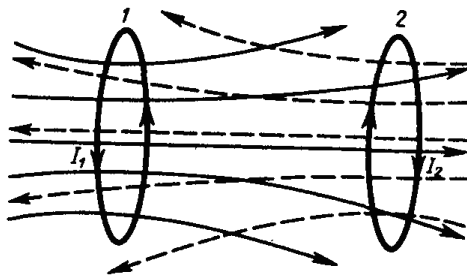


Рис. 7.4.

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}.$$

$$\Phi_{12} = L_{12} I_2.$$

$$\mathcal{E}_{11} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}.$$

Явление возникновения э.д.с. в одном из контуров при изменении силы тока в другом называется **взаимной индукцией**. Коэффициенты пропорциональности L_{21} и L_{12} называются **взаимной индуктивностью контуров**.

$$L_{12} = L_{21}.$$

$$\Phi_2 = BS = \mu_0 \mu \frac{N_1 I_1}{l} S.$$

Тогда полный магнитный поток (потокосцепление) сквозь вторичную обмотку, содержащую N_2 витков,

$$\Psi = \Phi_2 N_2 = \mu_0 \mu \frac{N_1 N_2}{l} S I_1.$$

$$L_{21} = \frac{\Psi}{I_1} = \mu_0 \mu \frac{N_1 N_2}{l} S.$$

$$L_{12} = L_{21} = \mu_0 \mu \frac{N_1 N_2}{l} S.$$

5. Трансформаторы

Принцип действия трансформаторов, применяемых для повышения или понижения напряжения переменного тока, основан на явлении взаимной индукции. Впервые трансформаторы были сконструированы и введены в практику русским электротехником П.Н. Яблочковым (1847—1894) и русским физиком И.Ф. Усагиным (1855—1919). Принципиальная схема трансформатора показана на рис.

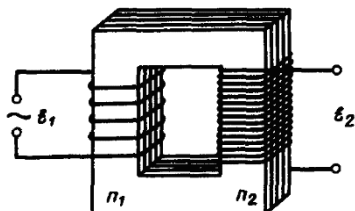


Рис. 7.5.

Ток I_1 первичной обмотки определяется согласно закону Ома:

$$\mathcal{E}_1 - \frac{d}{dt} (N_1 \Phi) = I_1 R_1,$$

где R_1 — сопротивление первичной обмотки. Падение напряжения $I_1 R_1$ на сопротивлении R_1 при быстропеременных полях мало по сравнению с каждой из двух э.д.с., поэтому

$$\mathcal{E}_1 \approx N_1 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Э.д.с. взаимной индукции, возникающая во вторичной обмотке,

$$\mathcal{E}_2 = - \frac{d(N_2 \Phi)}{dt} = - N_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

э.д.с., возникающая во вторичной обмотке,

$$\mathcal{E}_2 = - \frac{N_2}{N_1} \mathcal{E}_1,$$

где знак минус показывает, что э.д.с. в первичной и вторичной обмотках противоположны по фазе.

Отношение числа витков N_2/N_1 , показывающее, во сколько раз э.д.с. во вторичной обмотке трансформатора больше (или меньше), чем в первичной, называется **коэффициентом трансформации**.

$$\mathcal{E}_2 I_2 \approx \mathcal{E}_1 I_1,$$

$$\mathcal{E}_2 / \mathcal{E}_1 = I_1 / I_2 = N_2 / N_1,$$

т. е. токи в обмотках обратно пропорциональны числу витков в этих обмотках.

Если $N_2/N_1 > 1$, то имеем дело с **повышающим трансформатором**.

Если $N_2/N_1 < 1$, то имеем дело с **понижающим трансформатором**.

6. Энергия магнитного поля

Проводник, по которому протекает электрический ток, всегда окружен магнитным полем, причем магнитное поле появляется и исчезает вместе с появлением и исчезновением тока. Магнитное поле, подобно электрическому, является носителем энергии. Работа по созданию магнитного потока Φ будет равна

$$A = \int_0^I L I dI = LI^2/2.$$

Следовательно, энергия магнитного поля, связанного с контуром,

$$W = LI^2/2.$$

Энергию магнитного поля можно представить как функцию величин, характеризующих это поле в окружающем пространстве.

$$W = \frac{1}{2} \mu_0 \mu \frac{N^2 I^2}{l} S.$$

Так как $I = Bl/(\mu_0 \mu N)$ и $B = \mu_0 \mu H$, то

$$W = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} V = \frac{BH}{2} V,$$

где $Sl = V$ — объем соленоида.

Магнитное поле соленоида однородно и сосредоточено внутри него, поэтому энергия заключена в объеме соленоида и распределена в нем с постоянной объемной плотностью

$$w = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{BH}{2}.$$

Вопросы:

1. Сформулируйте закон электромагнитной индукции. Опыты Фарадея.
2. Что такое индуктивность контура, самоиндукция, взаимная индукция?
3. Принцип работы трансформатора?
4. Энергия магнитного поля. Плотность энергии магнитного поля.

Лекция 8

Тема: Волновая и квантовая оптика.

1. Развитие волновой и корпускулярной теории света.
2. Временная и пространственная когерентность.
3. Интерференция световых волн.
4. Методы наблюдения интерференции света.

1. Развитие волновой и корпускулярной теории света

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

Согласно корпускулярной теории (теории истечения), свет представляет собой поток частиц (корпускул), испускаемых светящимися телами и летящих по прямолинейным траекториям.

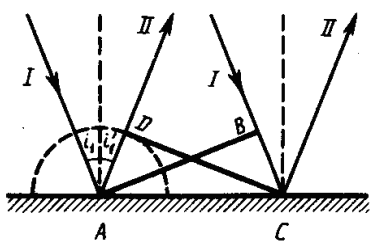
Из теории Ньютона следовало постоянство синуса угла падения i_1 к синусу угла преломления i_2 :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v}{c} = n,$$

где c — скорость распространения света в вакууме, v — скорость распространения света в среде. Так как n в среде всегда больше единицы, то, *по теории Ньютона*, $v > c$, т. е. скорость распространения света в среде должна быть всегда больше скорости его распространения в вакууме.

Согласно волновой теории, развитой на основе аналогии оптических и акустических явлений, свет представляет собой упругую волну, распространяющуюся в особой среде — эфире. Эфир заполняет все мировое пространство, пронизывает все тела и обладает механическими свойствами — упругостью и плотностью. Согласно Гюйгенсу, большая скорость распространения света обусловлена особыми свойствами эфира.

Волновая теория основывается на **принципе Гюйгенса**: каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн дает положение волнового фронта в следующий момент времени.



По *теории Гюйгенса*, $v < c$, т. е. скорость распространения света в среде должна быть всегда меньше скорости его распространения в вакууме.

Таким образом, к началу XVIII в. существовало два противоположных подхода к объяснению природы света: корпускулярная теория Ньютона и волновая теория Гюйгенса. Обе эти теории объясняли прямолинейное распространение света, законы отражения и преломления. XVIII век стал веком борьбы этих теорий. К началу XIX столетия корпускулярная теория была полностью отвергнута и восторжествовала волновая теория. Большая заслуга в этом отношении принадлежит английскому физiku Т. Юнгу, исследовавшему явления дифракции и

интерференции, и французскому физiku О. Френелю (1788—1887), дополнившему принцип Гюйгенса и объяснившему эти явления.

Наука о свете накапливала экспериментальные данные, свидетельствующие о взаимосвязи световых, электрических и магнитных явлений, что позволило Максвеллу в 70-х годах прошлого столетия создать электромагнитную теорию света. Согласно электромагнитной теории Максвелла,

$$c/v = \sqrt{\epsilon\mu} = n,$$

где c и v — соответственно скорости распространения света в вакууме и в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ и магнитной проницаемостью μ . Эта трудность была преодолена в конце XIX в. Лоренцем, предложившим **электронную теорию**, согласно которой диэлектрическая проницаемость ϵ зависит от длины волны падающего света. Теория Лоренца ввела представление об электронах, колеблющихся внутри атома, и позволила объяснить явления испускания и поглощения света веществом.

Перечисленные затруднения и противоречия были преодолены благодаря смелой гипотезе (1900) немецкого физика М. Планка (1858—1947), согласно которой излучение и поглощение света происходит не непрерывно, а дискретно, т. е. **определенными порциями (квантами)**, энергия которых определяется частотой ν :

$$\epsilon_0 = h\nu,$$

где h — постоянная Планка.

Теория Планка не нуждалась в понятии об эфире. Она объяснила тепловое излучение черного тела. Эйнштейн в 1905 г. создал **квантовую теорию света**, согласно которой не только *излучение* света, но и его *распространение* происходит в виде **потока световых квантов — фотонов**, энергия которых определяется соотношением (8.3), а масса

$$m_\phi = \frac{\epsilon_0}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}.$$

Все многообразие изученных свойств и законов распространения света, его взаимодействия с веществом показывает, что свет имеет сложную природу. Он представляет собой *единство противоположных видов движения* — **корпускулярного (квантового) и волнового (электромагнитного)**. Длительный путь развития привел к современным представлениям о **двойственной корпускулярно-волновой природе света**.

2. Временная и пространственная когерентность

Интерференцию света можно объяснить, рассматривая интерференцию волн. Необходимым условием интерференции волн является их **когерентность**, т. е. согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных или волновых процессов. Этому условию удовлетворяют **монохроматические волны** — неограниченные в пространстве волны одной определенной и строго постоянной частоты.

Прерывистое излучение света атомами в виде отдельных коротких импульсов называется **волновым цугом**.

Средняя продолжительность одного цуга $\tau_{\text{ког}}$ называется **временем когерентности**. Когерентность существует только в пределах одного цуга, и время когерентности не может превышать время излучения, т. е. $\tau_{\text{ког}} < \tau$. За это время волна распространяется в вакууме на расстояние $l_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}}$, называемое **длиной когерентности (или длиной цуга)**.

Когерентность колебаний, которые совершаются в одной и той же точке пространства, определяемая степенью монохроматичности волн, называется **временной когерентностью**.

Наряду с временной когерентностью для описания когерентных свойств волн в плоскости, перпендикулярной направлению их распространения, вводится понятие **пространственной когерентности**. Два источника, размеры и взаимное расположение которых позволяют (при необходимой степени монохроматичности света) наблюдать интерференцию, называются **пространственно-когерентными**. **Радиусом когерентности** (или **длиной пространственной когерентности**) называется максимальное поперечное направлению распространения волны расстояние, на котором возможно проявление интерференции.

3. Интерференция световых волн

Предположим, что две монохроматические световые волны, накладываются друг на друга, возбуждают в определенной точке пространства колебания одинакового направления: $x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$ и $x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$. Так как волны когерентны, то $\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$ имеет постоянное во времени (но свое для каждой точки пространства) значение, поэтому интенсивность результирующей волны ($I \sim A^2$)

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (8.5)$$

В точках пространства, где $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) > 0$, интенсивность $I > I_1 + I_2$, где $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) < 0$, интенсивность $I < I_1 + I_2$.

Следовательно, при наложении двух (или нескольких) когерентных световых волн происходит пространственное перераспределение светового потока, в результате чего в одних местах возникают максимумы, а в других — минимумы интенсивности. Это явление называется **интерференцией света**.

Произведение геометрической длины s пути световой волны в данной среде на показатель n преломления этой среды называется **оптической длиной пути L** , а $\Delta = L_2 - L_1$ — разность оптических длин проходимых волнами путей — называется **оптической разностью хода**. Если оптическая разность хода равна целому числу длин волн в вакууме

$$\Delta = \pm m \lambda_0 \quad (m=0, 1, 2, \dots),$$

то $\delta = \pm 2m\pi$, и колебания, возбуждаемые в точке M обеими волнами, будут происходить в одинаковой фазе. Следовательно, это условие является **условием интерференционного максимума**.

Если оптическая разность хода

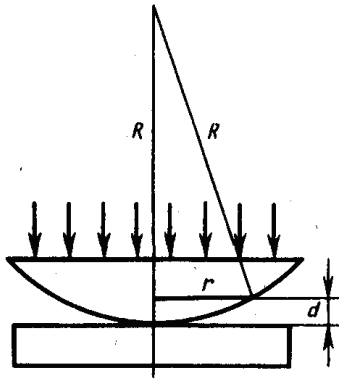
$$\Delta = \pm (2m+1) \frac{\lambda_0}{2} \quad (m=0, 1, 2, \dots),$$

то $\delta = \pm (2m+1)\pi$, и колебания, возбуждаемые в точке M обеими волнами, будут происходить в противофазе. Следовательно, это условие является **условием интерференционного минимума**.

Методы наблюдения интерференции световых волн

- Метод Юнга.
- Зеркала Френеля
- Бипризма Френеля.

3. Кольца Ньютона. Кольца Ньютона, являющиеся классическим примером полос равной толщины, наблюдаются при отражении света от воздушного зазора, образованного плоскопараллельной пластинкой и соприкасающейся с ней плосковыпуклой линзой с большим радиусом кривизны (рис). Параллельный пучок света падает нормально на плоскую поверхность линзы и частично отражается от верхней и нижней поверхностей воздушного зазора между линзой и пластинкой. При наложении отраженных лучей возникают полосы равной толщины, при нормальном падении света имеющие вид концентрических окружностей.



$$\Delta = 2d + \lambda_0/2,$$

где d — ширина зазора.

$R^2 = (R - d)^2 + r^2$, где R — радиус кривизны линзы, r — радиус кривизны окружности, всем точкам которой соответствует одинаковый зазор d .

Учитывая, что d мало, получим $d = r^2/(8R)$.

Следовательно,

$$\Delta = r^2/R + \lambda_0/2.$$

Выражения для радиусов m -го светлого кольца и m -го темного кольца соответственно

$$r_m = \sqrt{(m - 1/2) \lambda_0 R} \quad (m = 1, 2, 3, \dots),$$

$$r_m^* = \sqrt{m \lambda_0 R} \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

Измеряя радиусы соответствующих колец, можно (зная радиус кривизны линзы R) определить λ_0 и, наоборот, по известной λ_0 найти радиус кривизны R линзы.

5. Применение интерференции света. Интерферометр

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

Явление интерференции применяется также для улучшения качества оптических приборов (**просветление оптики**) и получения высокоотражающих покрытий.

Создание высокоотражающих покрытий стало возможным лишь на основе **многолучевой интерференции**.

Явление интерференции также применяется в очень точных измерительных приборах, называемых интерферометрами.

Тема: Дифракция света.

1. Принцип Гюйгенса-Френеля.
2. Метод зон Френеля. Дифракция Фраунгофера.
3. Формула Вульфа-Брэгга. Критерий Рэлея.

1. Принцип Гюйгенса — Френеля

Дифракцией называется *огибание волнами препятствий*, встречающихся на их пути, или в более широком смысле — любое *отклонение распространения волн вблизи препятствий от законов геометрической оптики*. Явление дифракции объясняется с помощью *принципа Гюйгенса*, согласно которому *каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн задает положение волнового фронта в следующий момент времени*.

Согласно **принципу Гюйгенса — Френеля**, световая волна, возбуждаемая каким-либо источником S , может быть представлена как *результат суперпозиции когерентных вторичных волн*, «излучаемых» фиктивными источниками. Такими источниками могут служить бесконечно малые элементы любой замкнутой поверхности, охватывающей источник S .

2. Метод зон Френеля. Прямолинейное распространение света

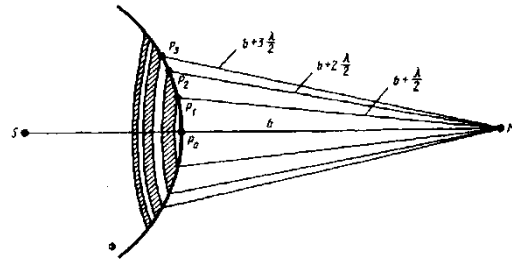
Принцип Гюйгенса — Френеля в рамках волновой теории должен был ответить на вопрос о прямолинейном распространении света. Френель решил эту задачу, рассмот-

рев взаимную интерференцию вторичных волн и применив прием, получивший название **метода зон Френеля**.

Френель разбил волновую поверхность Φ на кольцевые зоны такого размера, чтобы расстояния от краев зоны до M отличались на $\lambda/2$, т. е. $P_1M - P_0M = P_2M - P_1M = P_3M - P_2M = \dots = \lambda/2$. Подобное разбиение фронта волны на зоны можно выполнить, проведя с центром в точке M сферы радиусами $b + \frac{\lambda}{2}$, $b + 2\frac{\lambda}{2}$, $b + 3\frac{\lambda}{2}$, Так как колебания от соседних зон проходят до точки M расстояния, отличающиеся на $\lambda/2$, то в точку M они приходят в противоположной фазе и при наложении эти колебания будут взаимно ослаблять друг друга. Поэтому амплитуда результирующего светового колебания в точке M

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots,$$

где A_1, A_2, \dots — амплитуды колебаний, возбуждаемых 1-й, 2-й, ..., m -й зонами.



Для оценки амплитуд колебаний найдем площади зон Френеля. Пусть внешняя граница m -й зоны выделяет на волновой поверхности сферический сегмент высоты h_m . Обозначив площадь этого сегмента через σ_m , найдем, что площадь m -й зоны Френеля равна $\Delta\sigma_m = \sigma_m - \sigma_{m-1}$, где σ_{m-1} — площадь сферического сегмента, выделяемого внешней границей $(m-1)$ -й зоны. Из рисунка следует, что

$$r_m^2 = a^2 - (a - h_m)^2 = (b + m\lambda/2)^2 - (b + h_m)^2.$$

После элементарных преобразований, учитывая, что $\lambda \ll a$ и $\lambda \ll b$, получим

$$h_m = \frac{bm\lambda}{2(a+b)}.$$

Площадь сферического сегмента и площадь m -й зоны Френеля соответственно равны

$$\sigma_m = 2\pi a h_m = \frac{\pi a b \lambda}{a+b} m, \quad \Delta\sigma_m = \sigma_m - \sigma_{m-1} = \frac{\pi a b \lambda}{a+b}.$$

Амплитуда колебания A_m от некоторой m -й зоны Френеля равна среднему арифметическому от амплитуд примыкающих к ней зон, т. е.

$$A_m = \frac{A_{m-1} + A_{m+1}}{2}.$$

$$A = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \left(\frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2} \right) + \dots = \frac{A_1}{2},$$

Таким образом, амплитуда результирующих колебаний в произвольной точке M определяется как бы действием только половины центральной зоны Френеля. Следовательно, действие всей волновой поверхности на точку M сводится к действию ее малого участка, меньшего центральной зоны.

Радиус внешней границы m -й зоны Френеля:

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m \lambda}.$$

Дифракцию Френеля можно наблюдать на круглом отверстии и на диске.

2.2. Дифракция Фраунгофера на одной щели

Немецкий физик И. Фраунгофер (1787—1826) рассмотрел **дифракцию плоских световых волн**, или **дифракцию в параллельных лучах**. **Дифракция Фраунгофера**, имеющая большое практическое значение, наблюдается в том случае, когда источник света и точка наблюдения бесконечно удалены от препятствия, вызвавшего дифракцию.

если число зон Френеля четное, то

$$a \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots),$$

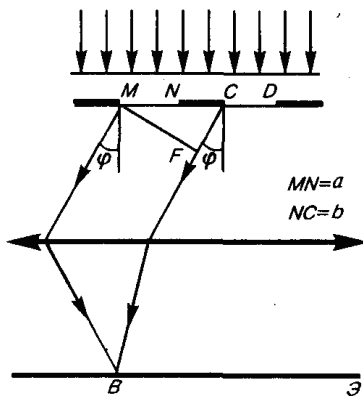
и в точке B наблюдается **дифракционный минимум** (полная темнота), если же число зон Френеля нечетное, то

$$a \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

и наблюдается **дифракционный максимум**, соответствующий действию одной некомпенсированной зоны Френеля.

Отметим, что в направлении $\varphi=0$ щель действует как одна зона Френеля, и в этом направлении свет распространяется с наибольшей интенсивностью, т. е. в точке B_0 наблюдается **центральный дифракционный максимум**.

2.3. Дифракция Фраунгофера на дифракционной решетке



Большое практическое значение имеет дифракция, наблюдаемая при прохождении света через **одномерную дифракционную решетку** — систему параллельных щелей равной ширины, лежащих в одной плоскости и разделенных равными по ширине непрозрачными промежутками.

Рассмотрим дифракционную решетку. На рисунке для наглядности показаны только две соседние щели MN и CD . Если ширина каждой щели равна a , а ширина непрозрачных участков между щелями b , то величина $d=a+b$ называется **постоянной (периодом) дифракционной решетки**.

$$\Delta = CF = (a + b) \sin \varphi = d \sin \varphi.$$

Очевидно, что в тех направлениях, в которых *ни одна* из щелей не распространяет свет, он не будет распространяться и при двух щелях, т. е. *прежние (главные) минимумы* интенсивности будут наблюдаться в направлениях, определяемых условием:

$$a \sin \varphi = \pm m \lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots).$$

Кроме того, вследствие взаимной интерференции световых лучей, посылаемых двумя щелями, в некоторых направлениях они будут гасить друг друга, т. е. возникнут **дополнительные минимумы**. Очевидно, что эти дополнительные минимумы будут наблюдаться в тех направлениях, которым соответствует разность хода лучей $\lambda/2, 3\lambda/2, \dots$, посылаемых, например, от крайних левых точек M и C обеих щелей. Таким образом, **условие дополнительных минимумов**:

$$d \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m=0, 1, 2, \dots).$$

Наоборот, действие одной щели будет усиливать действие другой, если

$$d \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} = \pm m \lambda \quad (m=0, 1, 2, \dots),$$

т. е. выражение задает условие **главных максимумов**.

Таким образом, полная дифракционная картина, для двух щелей определяется из условий:

$d \sin \varphi = \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$ — **главные минимумы**;

$d \sin \varphi = \frac{\lambda}{2}, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda, \dots$ — **дополнительные минимумы**;

$d \sin \varphi = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$ — **главные максимумы**,

т. е. между двумя главными максимумами располагается один дополнительный минимум.

Если дифракционная решетка состоит из N щелей, то условием главных минимумов является условие (2.4.2), условием главных максимумов — условие (2.4.3), а условием дополнительных минимумов

$$d \sin \varphi = \pm m' \lambda / N \quad (m' = 1, 2, \dots, N-1, N+1, \dots, 2N-1, 2N+1, \dots),$$

Максимумы интенсивности (дифракционные максимумы) наблюдаются в тех направлениях, в которых все отраженные атомными плоскостями волны будут находиться в одинаковой фазе. Эти направления удовлетворяют **формуле Вульфа — Брэггов**

$$2d \sin \theta = m \lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots),$$

т. е. при разности хода между двумя лучами, отраженными от соседних кристаллографических плоскостей, кратной целому числу длин волн λ , наблюдается дифракционный максимум.

Понятие о голографии

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

Вопросы:

1. Развитие волновой и корпускулярной теории света.
2. Временная и пространственная когерентность.
3. Интерференция световых волн.
4. Методы наблюдения интерференции света.
5. Интерферометр. Принцип Гюйгенса-Френеля.
6. Метод зон Френеля. Дифракция Фраунгофера.
7. Формула Вульфа-Брэгга.

Лекция 9

Тема: Квантовая природа излучения

1. Тепловое излучение. Закон Кирхгофа.
2. Закон Стефана-Больцмана. Законы Вина.
3. Квантовая гипотеза Планка.
4. Внешний фотоэлектрический эффект и его законы.
5. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Масса и импульс фотона. Давление света.
6. Эффект Комптона.

1. Тепловое излучение. Закон Кирхгофа.

Тела, нагретые до достаточно высоких температур, светятся. Свечение тел, обусловленное нагреванием, называется **тепловым (температурным) излучением**. При высоких температурах излучаются короткие (видимые и ультрафиолетовые) электромагнитные волны, при низких — преимущественно длинные (инфракрасные).

Тепловое излучение — практически единственный вид излучения, который может быть **равновесным**.

Количественной характеристикой теплового излучения служит **спектральная плотность энергетической светимости (излучательности)** тела — мощность излучения с единицы площади поверхности тела в интервале частот единичной ширины:

$$R_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+d\nu}^{\text{изл}}}{d\nu},$$

где $dW_{\nu,\nu+d\nu}^{\text{изл}}$ — энергия электромагнитного излучения, испускаемого за единицу времени (мощность излучения) с единицы площади поверхности тела в интервале частот от ν до $\nu+d\nu$.

Единица спектральной плотности энергетической светимости ($R_{\nu,T}$) — **джоуль на метр в квадрате** (Дж/м²).

Записанную формулу можно представить в виде функции длины волны:

$$dW_{\nu,\nu+d\nu}^{\text{изл}} = R_{\nu,T}d\nu = R_{\lambda,T}d\lambda.$$

Так как $c = \lambda\nu$, то

$$\frac{d\lambda}{d\nu} = -\frac{c}{\nu^2} = -\frac{\lambda^2}{c},$$

где знак минус указывает на то, что с возрастанием одной из величин (ν или λ) другая величина убывает. Поэтому в дальнейшем знак минус будем опускать. Таким образом,

$$R_{\nu,T} = R_{\lambda,T} \frac{\lambda^2}{c}. \quad (9.1)$$

С помощью формулы (9.1) можно перейти от $R_{\nu,T}$ к $R_{\lambda,T}$ и наоборот.

Зная спектральную плотность энергетической светимости, можно вычислить **интегральную энергетическую светимость (интегральную излучательность)** (ее называют просто энергетической светимостью тела), просуммировав по всем частотам:

$$R_T = \int_0^{\infty} R_{\nu,T} d\nu. \quad (9.2)$$

Способность тел поглощать падающее на них излучение характеризуется **спектральной поглощательной способностью**

$$A_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+d\nu}^{\text{погл}}}{dW_{\nu,\nu+d\nu}},$$

показывающей, какая доля энергии, приносимой за единицу времени на единицу площади поверхности тела падающими на нее электромагнитными волнами с частотами от ν до $\nu+d\nu$, поглощается телом.

Тело, способное поглощать полностью при любой температуре все падающее на него излучение любой частоты, называется **черным**. Следовательно, спектральная поглощательная способность черного тела для всех частот и температур тождественно равна единице ($A_{\nu,T}^{\text{ч}} \equiv 1$).

Закон Кирхгофа

Кирхгоф, опираясь на второй закон термодинамики и анализируя условия равновесного излучения в изолированной системе тел, установил количественную связь между спектральной плотностью энергетической светимости и спектральной поглощательной способностью тел.

Закон Кирхгофа:

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T}. \quad (9.3)$$

Для черного тела $A_{\nu,T}^{\text{ч}} \equiv 1$, поэтому из закона Кирхгофа (см. (9.3)) вытекает, что $R_{\nu,T}$ для черного тела равна $r_{\nu,T}$. Таким образом, **универсальная функция Кирхгофа $r_{\nu,T}$** есть не

что иное, как *спектральная плотность энергетической светимости черного тела*. Следовательно, согласно закону Кирхгофа, для всех тел отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглощательной способности равно спектральной плотности энергетической светимости черного тела *при той же температуре и частоте*.

$$R_T = \int_0^{\infty} A_{\nu,T} r_{\nu,T} d\nu.$$

Для серого тела

$$R_T^e = A_T \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = A_T R_e, \quad (9.4)$$

где

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu$$

— **энергетически светимость черного тела** (зависит только от температуры).

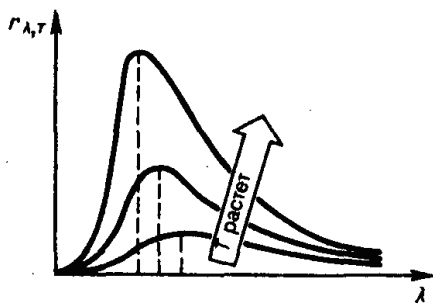
Закон Кирхгофа описывает только тепловое излучение, являясь настолько характерным для него, что может служить надежным критерием для определения природы излучения. Излучение, которое закону Кирхгофа не подчиняется, не является тепловым.

2. Законы Стефана — Больцмана и смещения Вина.

Австрийский физик И. Стефан (1835—1893), анализируя экспериментальные данные (1899), и Л. Больцман, применяя термодинамический метод (1884), решили эту задачу лишь частично, установив зависимость энергетической светимости R_e от температуры. Согласно **закону Стефана — Больцмана**,

$$R_e = \sigma T^4, \quad (9.5)$$

т.е. энергетическая светимость черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры; σ — постоянная Стефана — Больцмана: ее экспериментальное значение равно $5,69 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.



Немецкий физик В. Вин (1864—1928), опираясь на законы термо- и электродинамики, установил зависимость длины волны λ_{\max} , соответствующей максимуму функции $r_{\lambda,T}$, от температуры T . Согласно **закону смещения Вина**,

$$\lambda_{\max} = b/T. \quad (9.6)$$

т. е. длина волны λ_{\max} , соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости $r_{\lambda,T}$ черного тела, обратно пропорциональна его термодинамической

температуре, b — постоянная Вина; ее экспериментальное значение равно $2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$. Выражение (9.6) потому называют **законом смещения Вина**, что оно показывает смещение положения максимума функции $r_{\lambda,T}$ по мере возрастания температуры в область коротких длин волн. Закон Вина объясняет, почему при понижении температуры нагретых тел в их спектре все сильнее преобладает длинноволновое излучение (например, переход белого каления в красное при остывании металла).

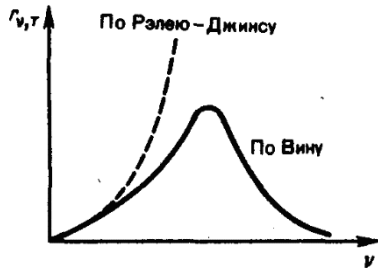
3. Формулы Рэлея — Джинса и Планка. Квантовая гипотеза Планка.

Из рассмотрения законов Стефана — Больцмана и Вина следует, что термодинамический подход к решению задачи о нахождении универсальной функции Кирхгофа $r_{\nu,T}$ не дал желаемых результатов. Следующая строгая попытка

теоретического вывода зависимости $r_{\nu,T}$ принадлежит английским ученым Д. Рэлею и Д. Джинсу (1899—1946), которые применили к тепловому излучению методы статистической физики, воспользовавшись классическим законом равномерного распределения энергии по степеням свободы.

Формула Рэлея — Джинса для спектральной плотности энергетической светимости черного тела имеет вид

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \langle \varepsilon \rangle = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT, \quad (9.9)$$



где $\langle \varepsilon \rangle = kT$ — средняя энергия осциллятора с собственной частотой ν .

Энергетическая светимость черного тела

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = \frac{2\pi kT}{c^2} \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \infty,$$

в то время как по закону Стефана — Больцмана R_e пропорциональна четвертой степени температуры. Этот результат получил название «ультрафиолетовой катастрофы».

В области больших частот хорошее согласие с опытом дает **формула Вина** (закон излучения Вина), полученная им из общих теоретических соображений:

$$r_{\nu,T} = C\nu^3 A e^{-A\nu/T},$$

где $r_{\nu,T}$ — спектральная плотность энергетической светимости черного тела, C и A — постоянные величины.

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} e^{-h\nu/(kT)}.$$

Согласно выдвинутой Планком **квантовой гипотезе**, атомные осцилляторы излучают энергию не непрерывно, а определенными порциями — квантами, причем энергия кванта пропорциональна частоте колебания:

$$\varepsilon_0 = h\nu = hc/\lambda, \quad (9.8)$$

где $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — **постоянная Планка**. Так как излучение испускается порциями, то энергия осциллятора ε может принимать лишь определенные *дискретные значения*, кратные целому числу элементарных порций энергии ε_0 :

$$\varepsilon = n h \nu \quad (n=0, 1, 2, \dots).$$

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{h\nu}{e^{h\nu/(kT)} - 1},$$

а спектральная плотность энергетической светимости черного тела

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/(kT)} - 1} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/(kT)} - 1}.$$

Таким образом, Планк вывел для универсальной функции Кирхгофа формулу

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/(kT)} - 1}, \quad (9.9)$$

которая блестяще согласуется с экспериментальными данными по распределению энергии в спектрах излучения черного тела *во всем интервале частот и температур*.

4. Внешний фотоэлектрический эффект и его законы.

Гипотеза Планка, блестяще решившая задачу теплового излучения черного тела, получила подтверждение и дальнейшее развитие при объяснении фотоэффекта — явления, открытие и исследование которого сыграло важную роль в становлении квантовой теории. Различают фотоэффект внешний, внутренний и вентильный. **Внешним фотоэлектрическим эффектом (фотоэффектом)** называется испускание электронов

веществом под действием электромагнитного излучения. Внешний фотоэффект наблюдается в твердых телах (металлах, полупроводниках, диэлектриках), а также в газах на отдельных атомах и молекулах (фотоионизация). Фотоэффект обнаружен (1889 г.) Г. Герцем, наблюдавшим усиление процесса разряда при облучении искрового промежутка ультрафиолетовым излучением.

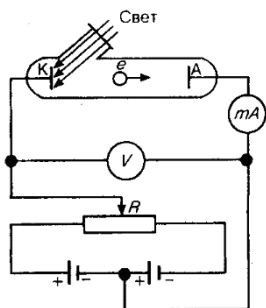


Рис.9.4.

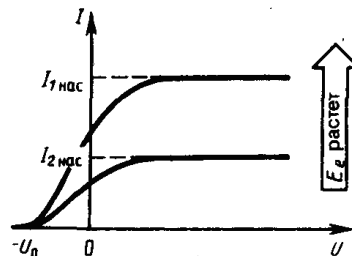


Рис.9.5.

Внутренний фотоэффект — это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу. В результате концентрация носителей тока внутри тела увеличивается, что приводит к возникновению **фотопроводимости** (повышению электропроводности полупроводника или диэлектрика при его освещении) или к возникновению э.д.с.

Вентильный фотоэффект, являющийся разновидностью внутреннего фотоэффекта, — возникновение э.д.с. (фото-э.д.с.) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля). Вентильный фотоэффект открывает, таким образом, пути для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую.

На рис. 9.4. приведена экспериментальная установка для исследования **вольт-амперной характеристики фотоэффекта** — зависимости фототока I , образуемого потоком электронов, испускаемых катодом под действием света, от напряжения U между электродами. Такая зависимость, соответствующая двум различным освещенностям E , катода (частота света в обоих случаях одинакова), приведена на рис. 9.5. По мере увеличения U фототок постепенно возрастает, т. е. все большее число фотоэлектронов достигает анода. Пологий характер кривых показывает, что электроны вылетают из катода с различными скоростями. Максимальное значение тока $I_{\text{нас}}$ — **фототок насыщения** — определяется таким значением U , при котором все электроны, испускаемые катодом, достигают анода:

$$I_{\text{нас}} = en,$$

где n — число электронов, испускаемых катодом в 1 с.

Из вольт-амперной характеристики следует, что при $U=0$ фототок не исчезает. Следовательно, электроны, выбитые светом из катода, обладают некоторой начальной скоростью v , а значит, и отличной от нуля кинетической энергией и могут достигнуть анода без внешнего поля. Для того чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить **задерживающее напряжение** U_0 . При $U=U_0$ ни один из электронов, даже обладающий при вылете из катода максимальной скоростью v_{max} , не может преодолеть задерживающего поля и достигнуть анода. Следовательно,

$$mv_{\text{max}}^2/2 = eU_0,$$

т. е., измерив задерживающее напряжение U_0 , можно определить максимальные значения скорости и кинетической энергии фотоэлектронов.

При изучении вольт-амперных характеристик разнообразных материалов (важна чистота поверхности, поэтому измерения проводятся в вакууме и на свежих поверхностях) при различных частотах падающего на катод излучения и различных энер-

гетических освещенностях катода и обобщения полученных данных были установлены следующие **три закона внешнего фотоэффекта**.

I. Закон Столетова: при фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырывааемых из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света (сила фототока насыщения пропорциональна энергетической освещенности E_e катода).

II. Максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой ν .

III. Для каждого вещества существует *красная граница* фотоэффекта, т. е. минимальная частота ν_0 света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

5. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.

А. Эйнштейн в 1905 г. показал, что явление фотоэффекта и его закономерности могут быть объяснены на основе предложенной им *квантовой теории фотоэффекта*. Согласно Эйнштейну, свет частотой ν не только *испускается*, как это предполагал Планк, но и *распространяется* в пространстве и *поглощается* веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых $\epsilon_0 = h\nu$. Таким образом, распространение света нужно рассматривать не как непрерывный волновой процесс, а как поток локализованных в пространстве дискретных световых квантов, движущихся со скоростью c распространения света в вакууме. Кванты электромагнитного излучения получили название **фотонов**.

По Эйнштейну, каждый квант поглощается только одним электроном. Поэтому число вырванных фотоэлектронов должно быть пропорционально интенсивности света (I закон фотоэффекта). Безынерционность фотоэффекта объясняется тем, что передача энергии при столкновении фотона с электроном происходит почти мгновенно.

Энергия падающего фотона расходуется на совершение электроном работы выхода A из металла и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии $mv_{\max}^2/2$. По закону сохранения энергии,

$$h\nu = A + mv_{\max}^2/2. \quad (9.10)$$

Уравнение (9.10) называется **уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта**.

$$\nu_0 = A/h$$

- красная граница фотоэффекта для данного металла.

Масса и импульс фотона. Давление света

Согласно гипотезе световых квантов Эйнштейна, свет испускается, поглощается и распространяется дискретными порциями (квантами), названными **фотонами**. Энергия фотона $\epsilon_0 = h\nu$. Его масса находится из закона взаимосвязи массы и энергии:

$$m_\gamma = h\nu/c^2. \quad (9.11)$$

Фотон — элементарная частица, которая всегда (в любой среде!) движется со скоростью света c и имеет массу покоя, равную нулю. Следовательно, масса фотона отличается от массы таких элементарных частиц, как электрон, протон и нейтрон, которые обладают отличной от нуля массой покоя и могут находиться в состоянии покоя.

Импульс фотона p_γ получим, если из теории относительности положим массу покоя фотона $m_{0\gamma} = 0$:

$$p_\gamma = \epsilon_0/c = h\nu/c. \quad (9.12)$$

Давление света на поверхность равно импульсу, который передают поверхности в 1 с N фотонов:

$$p = \frac{2h\nu}{c} \rho N + \frac{h\nu}{c} (1-\rho) N = (1+\rho) \frac{h\nu}{c} N.$$

$Nh\nu = E_e$ есть энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени, т. е. энергетическая освещенность поверхности, а $E_e/c = w$ — объемная плотность энергии излучения. Поэтому давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность,

$$p = \frac{E_e}{c} (1+\rho) = w (1+\rho).$$

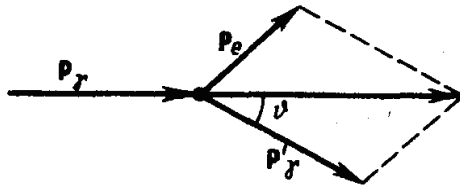
6. Эффект Комптона и его элементарная теория

Наиболее полно корпускулярные свойства света проявляются в эффекте Комптона. Американский физик А. Комpton (1892—1962), исследуя в 1923 г. рассеяние монохроматического рентгеновского излучения веществами с легкими атомами (парафин, бор), обнаружил, что в составе рассеянного излучения наряду с излучением первоначальной длины волны наблюдается также более длинноволновое излучение. Опыты показали, что разность $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ не зависит от длины волны λ падающего излучения и природы рассеивающего вещества, а определяется только углом рассеяния θ .

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_C \sin^2(\theta/2), \quad (9.13)$$

где λ' — длина волны рассеянного излучения, λ_C — **комптоновская длина волны** (при рассеянии фотона на электроне $\lambda_C = 2,426$ пм).

Эффектом Комптона называется упругое рассеяние коротковолнового электромагнитного излучения (рентгеновского и γ -излучений) на свободных (или слабосвязанных) электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны.



Согласно закону сохранения энергии,

$$W_0 + \varepsilon_\gamma = W + \varepsilon',$$

а согласно закону сохранения импульса,

$$\mathbf{p}_\gamma = \mathbf{p}_e + \mathbf{p}'_\gamma,$$

где $W_0 = m_0 c^2$ — энергия электрона до столкновения, $\varepsilon_\gamma = h\nu$ — энергия налетающего фотона, $W = \sqrt{p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4}$ — энергия электрона после столкновения (используется релятивистская формула, так как скорость электрона отдачи в общем случае значительна), $\varepsilon'_\gamma = h\nu'$ — энергия рассеянного фотона.

$$m_0 c^2 + h\nu = \sqrt{p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4} + h\nu'.$$

$$p_e^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2 \frac{h^2}{c^2} \nu\nu' \cos \theta.$$

$$m_0 c^2 (\nu - \nu') = h\nu\nu' (1 - \cos \theta).$$

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) = \frac{2h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2}.$$

Как эффект Комптона, так и фотоэффект на основе квантовых представлений обусловлены взаимодействием фотонов с электронами. В первом случае фотон рассеивается, во втором — поглощается. Рассеяние происходит при взаимодействии фотона

со свободным электроном, а фотоэффект — со связанными электронами. Можно показать, что при столкновении фотона со свободным электроном не может произойти поглощения фотона, так как это находится в противоречии с законами сохранения импульса и энергии. Поэтому при взаимодействии фотонов со свободными электронами может наблюдаться только их рассеяние, т. е. эффект Комптона.

Вопросы:

1. Что такое тепловое излучение?
2. Сформулируйте законы Кирхгофа, Стефана-Больцмана, Вина.
3. Квантовая гипотеза Планка. Внешний фотоэффект и его законы.
4. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Фотон. Давление света.
5. Эффект Комптона.

Лекция 10

Тема: Элементы квантовой физики атомов.

1. Гипотеза де Бройля.
2. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.
3. Волновая функция и ее статический смысл.
4. Атомное ядро. Дефект массы. Спин.
5. Ядерные силы. Модели ядра. Радиоактивность и его виды.
6. Ядерные реакции и их основные типы.

1. Гипотеза де Бройля.

Французский ученый Луи де Бройль (1892—1987), осознавая существующую в природе симметрию и развивая представления о двойственной корпускулярно-волновой природе света, выдвинул в 1923 г. гипотезу об *универсальности корпускулярно-волнового дуализма*. Де Бройль утверждал, что не только фотоны, но и электроны и любые другие частицы материи наряду с корпускулярными обладают также волновыми свойствами.

Итак, согласно де Бройлю, с *каждым микрообъектом* связываются, с одной стороны, *корпускулярные* характеристики — энергия E и импульс p , а с другой — *волновые характеристики* — частота ν и длина волны λ . Количественные соотношения, связывающие корпускулярные и волновые свойства частиц, такие же, как для фотонов:

$$E = h\nu, \quad p = h/\lambda. \quad (10.1)$$

Смелость гипотезы де Бройля заключалась именно в том, что соотношение (10.1) постулировалось не только для фотонов, но и для других микрочастиц, в частности для таких, которые обладают массой покоя. Таким образом, любой частице, обладающей импульсом, сопоставляют волновой процесс с длиной волны, определяемой **по формуле де Бройля**:

$$\lambda = h/p. \quad (10.2)$$

Это соотношение справедливо для любой частицы с импульсом p .

Представление о двойственной корпускулярно-волновой природе частиц вещества углубляется еще тем, что на частицы вещества переносится связь между полной энергией частицы ε и частотой ν волн де Бройля:

$$\varepsilon = h\nu. \quad (10.3)$$

Это свидетельствует о том, что соотношение между энергией и частотой в формуле (10.3) имеет характер *универсального соотношения*, справедливого как для фотонов, так и для любых других микрочастиц. Справедливость же соотношения (10.3) вытекает из согласия с опытом тех теоретических результатов, которые получены с его помощью в квантовой механике, атомной и ядерной физике.

Некоторые свойства волн де Бройля

Рассмотрим свободно движущуюся со скоростью v частицу массой m . Вычислим для нее фазовую и групповую скорости волн де Бройля. Фазовая скорость,

$$v_{\text{фаз}} = \frac{\omega}{k} = \frac{\hbar\omega}{\hbar k} = \frac{E}{p} = \frac{mc^2}{mv} = \frac{c^2}{v} \quad (10.4)$$

($E=\hbar\omega$ и $p=\hbar k$, где $k=2\pi/\lambda$ —волновое число). Так как $c>v$, то фазовая скорость волн де Бройля больше скорости света в вакууме (фазовая скорость волн может быть как меньше, так и больше c в отличие от групповой скорости волн. Групповая скорость,

$$u = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(\hbar\omega)}{d(\hbar k)} = \frac{dE}{dp}.$$

Для свободной частицы $E=\sqrt{m_0^2c^4+p^2c^2}$ и

$$\frac{dE}{dp} = \frac{pc^2}{\sqrt{m_0^2c^4+p^2c^2}} = \frac{pc^2}{E} = \frac{mvc^2}{mc^2} = v.$$

Следовательно, групповая скорость волн де Бройля равна скорости частицы.

Групповая скорость фотона $u = \frac{pc^2}{E} = \frac{mcc^2}{mc^2} = c$, т. е. равна скорости самого фотона.

Волны де Бройля испытывают дисперсию. Действительно, подставив в выражение (10.4) $v_{\text{фаз}}=E/p$ формулу $E=\sqrt{m_0^2c^4+p^2c^2}$, увидим, что скорость волн де Бройля зависит от длины волны. Это обстоятельство сыграло в свое время большую роль в развитии положений квантовой механики. После установления корпускулярно-волнового дуализма делались попытки связать корпускулярные свойства частиц с волновыми и рассматривать частицы как «узкие» волновые пакеты, «составленные» из волн де Бройля.

2. Соотношение неопределенностей

В. Гейзенберг, учитывая волновые свойства микрочастиц и связанные с волновыми свойствами ограничения в их поведении, пришел в 1927 г. к выводу, что объект микромира невозможно одновременно с любой наперед заданной точностью характеризовать и координатой и импульсом. Согласно **соотношению неопределенностей Гейзенберга**, микрочастица (микрообъект) не может иметь одновременно и определенную координату (x, y, z), и определенную соответствующую проекцию импульса (p_x, p_y, p_z), причем неопределенности этих величин удовлетворяют условиям

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar, \quad \Delta y \Delta p_y \geq \hbar, \quad \Delta z \Delta p_z \geq \hbar, \quad (10.5)$$

т. е. произведение неопределенностей координаты и соответствующей ей проекции импульса не может быть меньше величины порядка \hbar .

Из соотношения неопределенностей (10.5) следует, что, например, если микрочастица находится в состоянии с точным значением координаты ($\Delta x = 0$), то в этом состоянии соответствующая проекция ее импульса оказывается совершенно неопределенной ($\Delta p_x \rightarrow \infty$), и наоборот. Таким образом, для микрочастицы не существует состояний, в которых ее координаты и импульс имели бы одновременно точные

значения. Отсюда вытекает и фактическая невозможность одновременно с любой наперед заданной точностью измерить координату и импульс микрообъекта.

В квантовой теории рассматривается также соотношение неопределенностей для энергии E и времени t , т. е. неопределенности этих величин удовлетворяют условию

$$\Delta E \Delta t \geq h. \quad (10.6)$$

Подчеркнем, что ΔE — неопределенность энергии некоторого состояния системы, Δt — промежуток времени, в течение которого оно существует. Следовательно, система, имеющая среднее время жизни Δt , не может быть охарактеризована определенным значением энергии; разброс энергии $\Delta E = h/\Delta t$ возрастает с уменьшением среднего времени жизни. Частота излученного фотона также должна иметь неопределенность $\Delta \nu = \Delta E/h$, т. е. линии спектра должны характеризоваться частотой, равной $\nu \pm \Delta E/h$. Опыт действительно показывает, что все спектральные линии размыты; измеряя ширину спектральной линии, можно оценить порядок времени существования атома в возбужденном состоянии.

3. Волновая функция и ее статистический смысл

Экспериментальное подтверждение идеи де Бройля об универсальности корпускулярно-волнового дуализма, ограниченность применения классической механики к микрообъектам, диктуемая соотношением неопределенностей, а также противоречие целого ряда экспериментов с применяемыми в начале XX в. теориями привели к новому этапу развития квантовой теории — созданию **квантовой механики**, описывающей законы движения и взаимодействия микрочастиц с учетом их волновых свойств. Ее создание и развитие охватывает период с 1900 г. (формулировка Планком квантовой гипотезы; до 20-х годов XX в.; оно связано прежде всего с работами австрийского физика Э. Шредингера (1887—1961), немецкого физика В. Гейзенберга и английского физика П. Дирака (1902—1984).

Чтобы устранить трудности, немецкий физик М. Борн (1882—1970) в 1926 г. предположил, что по волновому закону меняется не сама вероятность, а величина, названная **амплитудой вероятности** и обозначаемая $\Psi(x, y, z, t)$. Эту величину называют также **волновой функцией** (или **Ψ -функцией**). Амплитуда вероятности может быть комплексной, и вероятность W пропорциональна квадрату ее модуля:

$$W \sim |\Psi(x, y, z, t)|^2 \quad (10.7)$$

($|\Psi|^2 = \Psi\Psi^*$, Ψ^* — функция, комплексно сопряженная с Ψ). Таким образом, описание состояния микрообъекта с помощью волновой функции имеет **статистический, вероятностный характер**: квадрат модуля волновой функции (квадрат модуля амплитуды волн де Бройля) определяет вероятность нахождения частицы в момент времени t в области с координатами x и $x+dx$, y и $y+dy$, z и $z+dz$.

Итак, в квантовой механике состояние микрочастиц описывается принципиально по-новому — с помощью волновой функции, которая является *основным носителем информации об их корпускулярных и волновых свойствах*. Вероятность нахождения частицы в элементе объема dV равна

$$dW = |\Psi|^2 dV. \quad (10.8)$$

Величина

$$|\Psi|^2 = dW/dV$$

(квадрат модуля Ψ -функции) имеет смысл **плотности вероятности**, т. е. определяет вероятность нахождения частицы в единичном объеме в окрестности точки с координатами x, y, z . Таким образом, физический смысл имеет не сама Ψ -функция, а квадрат ее модуля $|\Psi|^2$, которым задается *интенсивность волн де Бройля*.

Вероятность найти частицу в момент времени t в конечном объеме V , согласно теореме сложения вероятностей, равна

$$W = \int_V dW = \int_V |\Psi|^2 dV.$$

Так как $|\Psi|^2 dV$ определяется как вероятность, то необходимо волновую функцию Ψ нормировать так, чтобы вероятность достоверного события обращалась в единицу, если за объем V принять бесконечный объем всего пространства. Это означает, что при данном условии частица должна находиться где-то в пространстве. Следовательно, условие нормировки вероятностей

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi|^2 dV = 1, \quad (10.9)$$

где данный интеграл (10.12) вычисляется по всему бесконечному пространству, т. е. по координатам x, y, z от $-\infty$ до ∞ .

Волновая функция удовлетворяет **принципу суперпозиции**: если система может находиться в различных состояниях, описываемых волновыми функциями $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n, \dots$ то она также может находиться в состоянии Ψ , описываемом линейной комбинацией этих функций:

$$\Psi = \sum_n C_n \Psi_n,$$

где C_n ($n=1, 2, \dots$) — произвольные, вообще говоря, комплексные числа. Сложение *волновых функций* (амплитуд вероятностей), а не *вероятностей* (определяемых квадратами модулей волновых функций) принципиально отличает квантовую теорию от классической статистической теории, в которой для независимых событий справедлива *теорема сложения вероятностей*.

Волновая функция Ψ , являясь основной характеристикой состояния микрообъектов, позволяет в квантовой механике вычислять средние значения физических величин, характеризующих данный микрообъект. Например, среднее расстояние $\langle r \rangle$ электрона от ядра вычисляют по формуле

$$\langle r \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} r |\Psi|^2 dV,$$

4. Атомное ядро.

Э. Резерфорд, исследуя прохождение α -частиц с энергией в несколько мегаэлектрон-вольт через тонкие пленки золота, пришел к выводу о том, что атом состоит из положительно заряженного ядра и окружающих его электронов. Проанализировав эти опыты, Резерфорд также показал, что атомные ядра имеют размеры примерно $10^{-14} — 10^{-15}$ м (линейные размеры атома примерно 10^{-10} м).

Атомное ядро состоит из элементарных частиц — **протонов и нейтронов** (протонно-нейтронная модель ядра была предложена российским физиком Д. Д. Иваненко (р. 1904), а впоследствии развита В. Гейзенбергом).

Протон (p) имеет положительный заряд, равный заряду электрона, и массу покоя $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1836 m_e$, где m_e — масса электрона. Нейтрон (n) — нейтральная частица с массой покоя $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1839 m_e$. Протоны и нейтроны называются **нуклонами** (от лат. nucleus — ядро). Общее число нуклонов в атомном ядре называется **массовым числом** A .

Атомное ядро характеризуется **зарядом** Ze , где Z — **зарядовое число** ядра, равное числу протонов в ядре и совпадающее с порядковым номером химического элемента в Периодической системе элементов Менделеева. Известные в настоящее время 107 элементов таблицы Менделеева имеют зарядовые числа ядер от $Z=1$ до $Z=107$.

Ядро обозначается тем же символом, что и нейтральный атом: ${}_Z^AX$, где X — символ химического элемента, Z атомный номер (число протонов в ядре), A — массовое число (число нуклонов в ядре).

Ядра с одинаковыми Z , но разными A (т. е. с разными числами нейтронов $N=A-Z$) называются **изотопами**, а ядра с одинаковыми A , но разными Z — **изобарами**. Например, водород ($Z=1$) имеет три изотопа: ${}_1^1\text{H}$ — протий ($Z=1, N=0$), ${}_1^2\text{H}$ — дейтерий ($Z=1, N=1$), ${}_1^3\text{H}$ — тритий ($Z=1, N=2$), олово — десять, и т. д. В подавляющем большинстве случаев изотопы одного и того же химического элемента обладают одинаковыми химическими и почти одинаковыми физическими свойствами (исключение составляют, например, изотопы водорода), определяющимися в основном структурой электронных оболочек, которая является одинаковой для всех изотопов данного элемента. Примером ядер-изобар могут служить ядра ${}_{10}^{10}\text{Be}$, ${}_{5}^{10}\text{B}$, ${}_{6}^{10}\text{C}$. В настоящее время известно более 2500 ядер, отличающихся либо Z , либо A , либо тем и другим.

Радиус ядра задается эмпирической формулой

$$R = R_0 A^{1/3},$$

где $R_0 = (1,3 \div 1,7) 10^{-15}$ м.

Дефект массы и энергия связи ядра

Энергия связи нуклонов в ядре

$$E_{\text{св}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}]c^2, \quad (10.10)$$

где m_p , m_n , $m_{\text{я}}$ — соответственно массы протона, нейтрона и ядра. В таблицах обычно приводятся не массы $m_{\text{я}}$ ядер, а массы m атомов. Поэтому для энергии связи ядра пользуются формулой

$$E_{\text{св}} = [Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - m]c^2, \quad (10.11)$$

где m_{H} — масса атома водорода. Так как m_{H} больше m_p на величину m_e , то первый член в квадратных скобках включает в себя массу Z электронов.

Величина

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{\text{я}}$$

называется **дефектом массы** ядра. На эту величину уменьшается масса всех нуклонов при образовании из них атомного ядра.

Часто вместо энергии связи рассматривают **удельную энергию связи** $\delta E_{\text{св}}$ — энергию связи, отнесенную к одному нуклону. Она характеризует устойчивость (прочность) атомных ядер, т. е. чем больше $\delta E_{\text{св}}$, тем устойчивее ядро.

Спин ядра и его магнитный момент

Собственный момент импульса ядра — спин ядра — складывается из спинов нуклонов и из орбитальных моментов импульса нуклонов (моментов импульса, обусловленных движением нуклонов внутри ядра). Обе эти величины являются векторами, поэтому спин ядра представляет их векторную сумму. Спин ядра *квантуется по закону*

$$L_{\text{я}} = \hbar \sqrt{I(I+1)},$$

где I — **спиновое ядерное квантовое число** (его часто называют просто спином ядра), которое принимает целые или полуцелые значения $0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, \dots$. Ядра с четными A имеют целые I , с нечетными — полуцелые I .

Атомное ядро кроме спина обладает **магнитным моментом** $\mu_{\text{я}}$. Магнитный момент ядра связан со спином ядра: $\mu_{\text{я}} = g_{\text{я}} L_{\text{я}}$, где $g_{\text{я}}$ — коэффициент пропорциональности, называемый **ядерным гиромагнитным отношением**.

Единицей магнитных моментов ядер служит **ядерный магнетон**

$$\mu_{\text{я}} = e\hbar/(2m_p) = 5,0508 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл},$$

где m_p — масса протона. Ядерный магнетон в $m_p/m_e \approx 1836$ раз меньше магнетона Бора, поэтому магнитные свойства атомов определяются в основном магнитными свойствами его электронов.

5. Ядерные силы. Модели ядра

Между составляющими ядро нуклонами действуют особые, специфические для ядра силы, значительно превышающие кулоновские силы отталкивания между протонами. Они называются **ядерными силами**.

С помощью экспериментальных данных по рассеянию нуклонов на ядрах, ядерным превращениям и т.д. доказано, что ядерные силы намного превышают гравитационные, электрические и магнитные взаимодействия и не сводятся к ним. Ядерные силы относятся к классу так называемых **сильных взаимодействий**.

Перечислим основные свойства ядерных сил:

- 1) ядерные силы являются *силами притяжения*;
- 2) ядерные силы являются *короткодействующими* — их действие проявляется только на расстояниях примерно 10^{-15} м. При увеличении расстояния между нуклонами ядерные силы быстро уменьшаются до нуля, а при расстояниях, меньших их радиуса действия, оказываются примерно в 100 раз больше кулоновских сил, действующих между протонами на том же расстоянии;
- 3) ядерным силам свойственна *зарядовая независимость*: ядерные силы, действующие между двумя протонами, или двумя нейтронами, или, наконец, между протоном и нейтроном, одинаковы по величине. Отсюда следует, что ядерные силы имеют неэлектрическую природу;
- 4) ядерным силам свойственно *насыщение*, т. е. каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов. Насыщение проявляется в том, что удельная энергия связи нуклонов в ядре (если не учитывать легкие ядра) при увеличении числа нуклонов не растет, а остается приблизительно постоянной;
- 5) ядерные силы зависят от взаимной *ориентации спинов* взаимодействующих нуклонов. Например, протон и нейтрон образуют дейтрон (ядро изотопа ^2_1H) только при условии параллельной ориентации их спинов;
- 6) ядерные силы *не являются центральными*, т. е. действующими по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.

Из большого числа моделей, каждая из которых обязательно использует подобранные произвольные параметры, согласующиеся с экспериментом, рассмотрим две: **капельную и оболочечную**.

Радиоактивность и его виды

Французский физик А. Беккерель (1852—1908) в 1896 г. при изучении люминесценции солей урана случайно обнаружил *самопроизвольное* испускание ими излучения неизвестной природы, которое действовало на фотопластинку, ионизировало воздух, проникало сквозь тонкие металлические пластинки, вызывало люминесценцию ряда веществ. Продолжая исследование этого явления, супруги Кюри — Мария (1867—1934) и Пьер — обнаружили, что беккерелевское излучение свойственно не только урану, но и многим другим тяжелым элементам, таким, как торий и актиний. Они показали также, что урановая смоляная обманка (руда, из которой добывается металлический уран) испускает излучение, интенсивность которого во много раз

превышает интенсивность излучения урана. Таким образом удалось выделить два новых элемента — носителя беккерелевского излучения: полоний $^{210}_{84}\text{Po}$ и радий $^{226}_{88}\text{Ra}$.

Обнаруженное излучение было названо **радиоактивным излучением**, а само явление — испускание радиоактивного излучения — **радиоактивностью**.

В настоящее время под **радиоактивностью** понимают способность некоторых атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) превращаться в другие ядра с испусканием различных видов радиоактивных излучений и элементарных частиц. Радиоактивность подразделяется на **естественную** (наблюдается у неустойчивых изотопов, существующих в природе) и **искусственную** (наблюдается у изотопов, полученных посредством ядерных реакций).

Закон радиоактивного распада. Правила смещения

Под радиоактивным распадом, или просто распадом, понимают естественное радиоактивное превращение ядер, происходящее самопроизвольно. Атомное ядро, испытывающее радиоактивный распад, называется **материнским**, возникающее ядро — **дочерним**.

Теория радиоактивного распада строится на предположении о том, что радиоактивный распад является спонтанным процессом, подчиняющимся законам статистики. Так как отдельные радиоактивные ядра распадаются независимо друг от друга, то можно считать, что число ядер dN , распавшихся в среднем за интервал времени от t до $t+dt$, пропорционально промежутку времени dt и числу N нераспавшихся ядер к моменту времени t :

$$dN = -\lambda N dt, \quad (10.12)$$

где λ — постоянная для данного радиоактивного вещества величина, называемая **постоянной радиоактивного распада**; знак минус указывает, что общее число радиоактивных ядер в процессе распада уменьшается. Разделив переменные и интегрируя:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt, \quad \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt, \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t,$$

получим

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (10.13)$$

где N_0 — начальное число *нераспавшихся* ядер (в момент времени $t=0$), N — число *нераспавшихся* ядер в момент времени t . Формула (10.13) выражает **закон радиоактивного распада**, согласно которому число нераспавшихся ядер убывает со временем по экспоненциальному закону.

Интенсивность процесса радиоактивного распада характеризуют две величины: период полураспада $T_{1/2}$ и среднее время жизни τ радиоактивного ядра. **Период полураспада** $T_{1/2}$ — время, за которое исходное число радиоактивных ядер *в среднем* уменьшается вдвое. Тогда

$$N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}},$$

откуда

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = 0,693/\lambda.$$

Среднее время жизни τ радиоактивного ядра:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N t dt = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N_0 t e^{-\lambda t} dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

Таким образом, среднее время жизни τ радиоактивного ядра есть величина, обратная постоянной радиоактивного распада λ .

Активностью A нуклида (общее название атомных ядер, отличающихся числом протонов Z и нейтронов N) в радиоактивном источнике называется число распадов, происходящих с ядрами образца в 1 с:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N. \quad (10.14)$$

Единица активности в СИ — **беккерель (Бк)**: 1 Бк — активность нуклида, при которой за 1 с происходит один акт распада. До сих пор в ядерной физике применяется и внесистемная единица активности нуклида в радиоактивном источнике — **кюри (Ки)**: 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

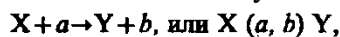
Радиоактивный распад происходит в соответствии с так называемыми **правилами смещения**, позволяющими установить, какое ядро возникает в результате распада данного материнского ядра. Правила смещения:



где ${}_Z^AX$ — материнское ядро, Y — символ дочернего ядра, ${}_2^4\text{He}$ — ядро гелия (α -частица), ${}_{-1}^0e$ — символическое обозначение электрона (заряд его равен -1 , а массовое число — нулю). Правила смещения являются ничем иным, как следствием двух законов, выполняющихся при радиоактивных распадах, — сохранения электрического заряда и сохранения массового числа: сумма зарядов (массовых чисел) возникающих ядер и частиц равна заряду (массовому числу) исходного ядра.

6. Ядерные реакции и их основные типы

Ядерные реакции — это превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с γ -квантами) или друг с другом. Наиболее распространенным видом ядерной реакции является реакция, записываемая символически следующим образом:



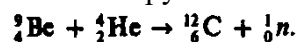
где X и Y — исходное и конечное ядра, a и b — бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частицы.

В отличие от радиоактивного распада, который протекает всегда с выделением энергии, ядерные реакции могут быть как **экзотермическими** (с выделением энергии), так и **эндотермическими** (с поглощением энергии).

Ядерные реакции классифицируются по следующим признакам:

- 1) *по роду участвующих в них частиц* — реакции под действием нейтронов; реакции под действием заряженных частиц (например, протонов, дейтронов, α -частиц); реакции под действием γ -квантов;
- 2) *по энергии вызывающих их частиц* — реакции при малых энергиях (порядка электрон-вольт), происходящие в основном с участием нейтронов; реакции при средних энергиях (до нескольких мегаэлектрон-вольт), происходящие с участием γ -квантов и заряженных частиц (протоны, α -частицы); реакции при высоких энергиях (сотни и тысячи мегаэлектрон-вольт), приводящие к рождению отсутствующих в свободном состоянии элементарных частиц и имеющие большое значение для их изучения;
- 3) *по роду участвующих в них ядер* — реакции на легких ядрах ($A < 50$); реакции на средних ядрах ($50 < A < 100$); реакции на тяжелых ядрах ($A > 100$);
- 4) *по характеру происходящих ядерных превращений* — реакции с испусканием нейтронов; реакции с испусканием заряженных частиц; реакции захвата (в этих реакциях составное ядро не испускает никаких частиц, а переходит в основное состояние, излучая один или несколько γ -квантов).

Английский физик Д. Чэдвик (1891—1974) предположил (1932), а впоследствии доказал, что новое проникающее излучение представляет собой не γ -кванты, а поток тяжелых нейтральных частиц, названных им **нейтронами**. Таким образом, нейтроны были обнаружены в следующей ядерной реакции:



Эта реакция не является единственной, ведущей к выбрасыванию из ядер нейтронов (например, нейтроны возникают в реакциях ${}^7_3\text{Li}(\alpha, n){}^{10}_5\text{B}$ и ${}^{11}_5\text{B}(\alpha, n){}^{14}_7\text{N}$).

Характер ядерных реакций под действием нейтронов зависят от их скорости (энергии). В зависимости от энергии нейтроны условно делят на две группы: **медленные и быстрые**. Область энергий медленных нейтронов включает в себя область **ультрахолодных** (с энергией до 10^{-7} эВ), **очень холодных** ($10^{-7} — 10^{-4}$ эВ), **холодных** ($10^{-4} — 10^{-3}$ эВ), **тепловых** ($10^{-3} — 0,5$ эВ) и **резонансных** ($0,5 — 10^4$ эВ) нейтронов. Ко второй группе можно отнести **быстрые** ($10^4 — 10^8$ эВ), **высокоэнергетичные** ($10^8 — 10^{10}$ эВ) и **релятивистские** ($\geq 10^{10}$ эВ) нейтроны.

Замедлить нейтроны можно пропуская их через какое-либо вещество, содержащее водород (например, парафин, вода). Проходя через такие вещества, быстрые нейтроны испытывают рассеяние на ядрах и замедляются до тех пор, пока их энергия не станет равной, например, энергии теплового движения атомов вещества замедлителя, т. е. равной приблизительно kT .

Испускаемые при делении ядер вторичные нейтроны могут вызвать новые акты деления, что делает возможным осуществление **цепной реакции деления** — ядерной реакции, в которой частицы, вызывающие реакцию, образуются как продукты этой реакции. Цепная реакция деления характеризуется **коэффициентом размножения k** нейтронов, который равен отношению числа нейтронов в данном поколении к их числу в предыдущем поколении. *Необходимым условием* для развития цепной реакции деления является *требование* $k \geq 1$.

Вопросы:

1. Сформулируйте гипотезу де Бройля, соотношение неопределенностей Гейзенберга.
2. Волновая функция и ее статический смысл.
3. Атомное ядро. Дефект массы. Спин.
4. Ядерные силы. Модели ядра.
5. Радиоактивность и его виды. Ядерные реакции и их основные типы.

Материалы практических занятий (10 часов)

Цель: Применение основных положений и законов физики к решению задач.

1. Механика материальной точки. Законы сохранения импульса и энергии (1 час)

№ задач: 1.1, 1.5, 1.9, 2.1, 2.2, 2.8, 2.10

Вращательное движение твердого тела. Колебания (1 час)

№ задач: 3.1, 3.2, 3.3, 4.1, 4.2, 4.5, 4.9, 15.1, 15.3, 15.4, 15.8

2. Физические основы молекулярно-кинетической теории и термодинамики (1 час)

№ задач: 6.1, 6.2, 6.4, 6.5, 7.1, 7.2, 7.3, 7.7

3. Электростатика. Силовые характеристики поля. Электрический ток. Постоянный ток (2 часа)

№ задач: 9.2, 9.5, 10.6, 10.8, 10.10, 11.3, 11.6, 11.7

4. Магнитное поле постоянного тока. Электромагнитная индукция (2 часа)

№ задач: 12.1, 12.2, 13.1, 13.2, 13.3, 14.1, 14.6, 14.8

5. Волновая оптика. Квантово-оптические явления (2 часа)

№ задач: 18.1, 18.2, 18.3, 19.1, 20.2, 21.1, 21.5, 21.6, 21.7

6. Элементы физики атома и ядра (1 час)

№ задач: 22.2, 24.1, 24.2, 24.5, 24.6, 24.9

Литература:

1. В.Т. Ветрова. Сборник задач по физике с индивидуальными заданиями: Учебное пособие для вузов.- Мн.: Выш.шк., 1991.-386 с.
2. Чертов А. Г. Задачник по физике / А. Г. Чертов, А.А. Воробьев. – 7-е изд. – М.: Физматлит, 2001. – 640 с.
3. Волькенштейн Б.С. Сборник задач по общему курсу физики / Б.С. Волькенштейн. – 11-е изд. – М.: Физматлит, 1985-2006. – 384 с.
4. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики для втузов. –М.: ОНИКС 21век: Мир и Образование, 2005. – 384 с

Материалы лабораторных занятий (10 часов)

Образец оформления лабораторной работы в тетради:

1. Номер и название работы.
2. Цель работы, приборы.
3. Кратко о теории метода, рабочие формулы.
4. Таблица для результатов измерений, начерченная заранее, заполняемая в процессе работы.
5. Построение графика, если дано в задании работы.
6. Прodelать все расчеты и найти погрешность результатов.
7. Записать вывод о проделанной работе.

Введение. Измерение физических величин и их математическая обработка.

Л.р. № 3 Изучение движения тел по наклонной плоскости.

Л.р. № 2 Определение момента инерции тракторного шатуна.

Л.р. № 1 Изучение движения тел при наличии сил вязкого трения.

Л.р. № 11. Изучение электростатического поля.

Л.р. № 3 Изучение закона Ома.

Л.р. № 15. Изучение намагниченности парамагнетиков.

Подробное описание лабораторных работ даны в нижеуказанных литературах.

Литература:

1. Мукашева А.К. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Физика». ч.1-2. Астана. 2015 с.
2. Абельдина Ж.К. Введение в виртуальную физику: учебное пособие – Астана: ТОО Мастер По, 2012. – 177 с.

Задания для самостоятельной работы обучающихся (СРО)

Задача 1. Две материальные точки движутся в одной и той же системе отсчета согласно заданным уравнениям. В какой момент времени скорости этих точек будут одинаковыми? Найти скорости и ускорения точек в этот момент времени

| № задания | Уравнение движения первой точки, м | Уравнение движения второй точки, м |
|-----------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1 | $X = 20 + 4t - 4,5t^2$ | $X = 2 + 2t + 0,5t^2$ |
| 2 | $X = 12 + 19t + 0,6t^2$ | $X = 21 + 16t + 1,6t^2$ |
| 3 | $X = 8 + 12t - 0,3t^2$ | $X = 9 + 15t - 0,9t^2$ |
| 4 | $X = 23 + 2,6t + 1,5t^2$ | $X = 16 + 8t - 0,75t^2$ |
| 5 | $X = 24 + 6t + 0,5t^2$ | $X = 8 + 20t - 1,5t^2$ |
| 6 | $X = 6 + 17,8t - 1,75t^2$ | $X = 17 + 3t + 0,1t^2$ |
| 7 | $X = 30 + 15t - 1,25t^2$ | $X = 25 + 14t + 1,25t^2$ |
| 8 | $X = 11 + 3t - 0,1t^2$ | $X = 10 + 6t - 0,4t^2$ |
| 9 | $X = 21 + 19,4t - 0,35t^2$ | $X = 15 + 8t + 0,6t^2$ |
| 10 | $X = 13 + 12,9t - 1,8t^2$ | $X = 30 + 5,2t - 0,7t^2$ |
| 11 | $X = 7 + 1,2t + 1,6t^2$ | $X = 4 + 18t - 0,8t^2$ |
| 12 | $X = 29 + 10t + 0,5t^2$ | $X = 18 + 14t + 0,3t^2$ |
| 13 | $X = 15 + 9,4t - 1,5t^2$ | $X = 24 + 7t - 0,7t^2$ |
| 14 | $X = 4 + 16t + 0,15t^2$ | $X = 5 + 19,5t - 1,6t^2$ |
| 15 | $X = 26 + 2,2t + 1,8t^2$ | $X = 32 + 15t + 0,2t^2$ |
| 16 | $X = 19 + 6,2t - 0,8t^2$ | $X = 20 + 4t + 1,4t^2$ |
| 17 | $X = 18 + 10t + 0,45t^2$ | $X = 11 + 11t + 0,4t^2$ |
| 18 | $X = 3 + 18t - 1,25t^2$ | $X = 26 + 7t + 1,5t^2$ |
| 19 | $X = 25 + 20t - 0,2t^2$ | $X = 6 + 16t - 0,1t^2$ |
| 20 | $X = 10 + 7t + 0,65t^2$ | $X = 19 + 13t - 0,85t^2$ |
| 21 | $X = 27 + 14,7t + 1,2t^2$ | $X = 3 + 30t - 0,5t^2$ |
| 22 | $X = 2 + 16t - 0,7t^2$ | $X = 29 + 17t - 0,9t^2$ |
| 23 | $X = 22 + 6,2t + 1,5t^2$ | $X = 23 + 14t + 0,2t^2$ |
| 24 | $X = 14 + 15t - 0,2t^2$ | $X = 12 + 10,2t + 1,4t^2$ |
| 25 | $X = 5 + 12t + 1,7t^2$ | $X = 14 + 14,2t + 0,6t^2$ |
| 26 | $X = 28 + 20t - 0,4t^2$ | $X = 28 + 13,4t + 1,8t^2$ |
| 27 | $X = 16 + 14,3t - 2t^2$ | $X = 7 + 1,2t + 0,3t^2$ |
| 28 | $X = 9 + 9t + 0,8t^2$ | $X = 22 + 7t + 1,2t^2$ |

Задача 2. Автомобиль массой m , двигавшийся со скоростью v_0 , останавливается под действием силы торможения F_T за время t , пройдя при этом равнозамедленно расстояние s . Найти неизвестные величины согласно номеру задания в таблице, выполнить дополнительное задание

| № задания | m , т | v_0 , км/ч | F_T , Н | t , с | s , м | Построить график зависимости |
|----------------------|--------------------------|------------------------|-----------|---------|-----------------------|--|
| 1 2 3 4 | 1,5 2,0 2,5 3,0 | 70 | 8000 | ? | ? | Тормозного расстояния от массы автомобиля |
| 5 6 7 8 | 2,0 | 60 80 100 120 | ? | 5,0 | ? | Тормозного расстояния от скорости автомобиля |
| 9 10 11 12 | 2,5 | 60 80 100 120 | 5000 | ? | ? | Времени торможения от скорости автомобиля |
| 13 14 15 16 | 1,2 1,4 1,6 1,8 | 80 | ? | 4,0 | ? | Необходимой силы торможения от массы автомобиля при заданном времени торможения |
| 17 18 19 20 | 3,0 | 70 90 110 130 | ? | ? | 30 | Необходимой силы торможения от скорости автомобиля при заданном тормозном расстоянии |
| 21 22 23 24 | 1,5 | 80 | ? | ? | 25 50 75 100 | Необходимой силы торможения на заданном тормозном расстоянии |
| 25 26 27 28 | 2,0 3,0 4,0 5,0 | 90 | 10000 | ? | ? | Тормозного расстояния от массы автомобиля |

Задача 3. Имеется пружина, которая под действием силы F может растягиваться на x см. Если к этой пружине подвесить груз массой m , то период вертикальных колебаний груза будет равен T . Найти искомую величину согласно номеру задания в таблице. Массой пружины пренебречь.

| № задания | F , Н | x , см | m , кг | T , с |
|-----------|---------|----------|----------|---------|
| 1 | ? | 0,5 | 0,02 | 0,4 |
| 2 | 0,925 | ? | 0,5 | 0,8 |
| 3 | 1,58 | 2,5 | ? | 0,5 |
| 4 | 10,36 | 7,0 | 0,15 | ? |
| 5 | ? | 5,0 | 0,25 | 1,2 |
| 6 | 0,266 | ? | 0,9 | 4,0 |
| 7 | 14,8 | 6,0 | ? | 0,08 |
| 8 | 0,162 | 1,5 | 0,7 | ? |
| 9 | ? | 4,0 | 0,2 | 0,04 |
| 10 | 61,69 | ? | 0,45 | 0,12 |
| 11 | 5,55 | 9,0 | ? | 0,8 |
| 12 | 19,74 | 8,0 | 0,04 | ? |
| 13 | ? | 3,5 | 0,75 | 0,2 |
| 14 | 21,93 | ? | 0,05 | 0,06 |
| 15 | 0,395 | 2,0 | ? | 1,26 |
| 16 | 8,88 | 6,0 | 0,6 | ? |
| 17 | ? | 1,0 | 0,4 | 1,2 |
| 18 | 59,22 | ? | 0,01 | 0,02 |
| 19 | 13,88 | 4,5 | ? | 0,16 |
| 20 | 3,7 | 3,0 | 0,32 | ? |
| 21 | ? | 5,0 | 0,08 | 0,04 |
| 22 | 0,329 | ? | 0,3 | 0,6 |
| 23 | 20,05 | 6,5 | ? | 0,08 |
| 24 | 0,592 | 4,0 | 0,24 | ? |
| 25 | ? | 2,0 | 0,06 | 0,1 |
| 26 | 0,247 | ? | 0,8 | 3,2 |
| 27 | 8,636 | 7,0 | ? | 0,4 |
| 28 | 22,8 | 5,5 | 0,42 | ? |

Задача 4. Газ совершает за цикл Карно работу, равную A . При этом он получает от нагревателя количество теплоты Q_1 при температуре T_1 и отдает холодильнику количество теплоты Q_2 при температуре T_2 . КПД такого цикла равен η . Найти неизвестные величины, выполнить дополнительные задания.

| № задания | $A, Дж$ | $Q_1, Дж$ | $Q_2, Дж$ | $T_1, К$ | $T_2, К$ | Построить график |
|-----------|---------|-----------|-----------|----------|----------|--|
| 1 | ? | 1800 | 1200 | ? | 300 | $\eta = f(T_1)$ при $T_2 = \text{const}$ |
| 2 | ? | 1600 | | ? | | |
| 3 | ? | 1400 | | ? | | |
| 4 | ? | 2000 | | ? | | |
| 5 | 1925 | 4400 | ? | 400 | ? | $\eta = f(T_2)$ при $T_1 = \text{const}$ |
| 6 | 1375 | | ? | | ? | |
| 7 | 1100 | | ? | | ? | |
| 8 | 1650 | | ? | | ? | |
| 9 | 900 | ? | 900 | ? | 250 | $\eta = f(Q_1)$ при $Q_2 = \text{const}$ |
| 10 | 540 | ? | | ? | | |
| 11 | 1260 | ? | | ? | | |
| 12 | 180 | ? | | ? | | |
| 13 | ? | 1400 | 1040 | 350 | ? | $\eta = f(Q_2)$ при $Q_1 = \text{const}$ |
| 14 | ? | | 1200 | | ? | |
| 15 | ? | | 1120 | | ? | |
| 16 | ? | | 960 | | ? | |
| 17 | 491 | 1800 | ? | ? | 200 | $\eta = f(T_1)$ при $T_2 = \text{const}$ |
| 18 | 692,3 | | ? | ? | | |
| 19 | 600 | | ? | ? | | |
| 20 | 771,4 | | ? | ? | | |
| 21 | 196 | ? | 850 | 320 | ? | $\eta = f(T_2)$ при $T_1 = \text{const}$ |
| 22 | 121,4 | ? | | | ? | |
| 23 | 157,4 | ? | | | ? | |
| 24 | 238 | ? | | | ? | |
| 25 | 1150 | ? | 1350 | ? | 270 | $\eta = f(Q_1)$ при $Q_2 = \text{const}$ |
| 26 | 400 | ? | | ? | | |
| 27 | 900 | ? | | ? | | |
| 28 | 650 | ? | | ? | | |

Задача 5. Два положительных точечных заряда q_1 и q_2 закреплены на расстоянии l друг от друга. В точке на прямой, проходящей через эти заряды, на расстоянии x от первого заряда помещен третий заряд q_3 так, что он находится в равновесии. Найти неизвестные величины согласно номеру задания. Указать, какой знак должен иметь заряд q_3 для того, чтобы равновесие было устойчивым, если перемещение зарядов возможно только вдоль прямой, проходящей через закрепленные заряды.

| № задания | q_1 , Кл | q_2 , Кл | l , м | x , м |
|-----------|----------------------|----------------------|---------|---------|
| 1 | ? | $4 \cdot 10^{-9}$ | 0,6 | 0,2 |
| 2 | $4,5 \cdot 10^{-9}$ | ? | 0,5 | 0,3 |
| 3 | q_1 | $4q_1$ | ? | 0,2 |
| 4 | $0,25 q_2$ | q_2 | 1,0 | ? |
| 5 | ? | $8 \cdot 10^{-9}$ | 1,2 | 0,4 |
| 6 | $9 \cdot 10^{-8}$ | ? | 0,6 | 0,3 |
| 7 | q_1 | $2q_1$ | ? | 0,5 |
| 8 | $0,4q_2$ | q_2 | 2,0 | ? |
| 9 | ? | $6 \cdot 10^{-9}$ | 0,3 | 0,2 |
| 10 | $1,2 \cdot 10^{-10}$ | ? | 0,9 | 0,4 |
| 11 | $0,5 q_2$ | q_2 | ? | 0,3 |
| 12 | q_1 | $2q_1$ | 1,0 | ? |
| 13 | ? | $7 \cdot 10^{-9}$ | 0,5 | 0,2 |
| 14 | $1,6 \cdot 10^{-9}$ | ? | 0,8 | 0,4 |
| 15 | q_1 | $8q_1$ | ? | 0,1 |
| 16 | $0,25 q_2$ | q_2 | 2,0 | ? |
| 17 | ? | $1,2 \cdot 10^{-10}$ | 0,8 | 0,4 |
| 18 | $8 \cdot 10^{-9}$ | ? | 0,7 | 0,2 |
| 19 | $0,2 q_2$ | q_2 | ? | 0,1 |
| 20 | q_1 | $4q_1$ | 1,0 | ? |
| 21 | ? | $9 \cdot 10^{-8}$ | 0,4 | 0,1 |
| 22 | $3,6 \cdot 10^{-9}$ | ? | 1,0 | 0,6 |
| 23 | $0,4 q_2$ | q_2 | ? | 0,2 |
| 24 | q_1 | $6q_1$ | 1,0 | ? |
| 25 | ? | $1,6 \cdot 10^{-10}$ | 0,7 | 0,3 |
| 26 | $6 \cdot 10^{-9}$ | ? | 0,8 | 0,2 |
| 27 | q_1 | $4q_1$ | ? | 0,4 |
| 28 | $0,2 q_2$ | q_2 | 2,0 | ? |

Задача 6. Определить силу тока, показываемую амперметром в схеме. Напряжение на зажимах элемента в замкнутой цепи равно U . Сопротивления R_1 , R_2 , R_3 известны. Сопротивлением амперметра пренебречь.

| № задан ия | Схема соединения | $U, В$ | $R_1, Ом$ | $R_2, Ом$ | $R_3, Ом$ |
|----------------------|------------------|----------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| 1 2 3 4 | | 2,1 3,0 4,2 2,8 | 5 7 6 3 | 6 2 4 4 | 3 3 6 9 |
| 5 6 7 8 | | 4,0 12,0 20,0 8,0 | 4 10 8 12 | 8 6 7 10 | 12 8 6 8 |
| 9 10 11 12 | | 5,0 10,0 2,5 2,0 | 7 14 8 6 | 3 5 5 4 | 8 6 12 10 |
| 13 14 15 16 | | 4,0 2,5 1,2 3,6 | 4 6 8 4 | 8 3 2 5 | 12 9 6 10 |
| 17 18 19 20 | | 12,0 20, 8,0 6,0 | 2 6 8 12 | 4 8 6 5 | 8 10 4 10 |
| 21 22 23 24 | | 2,2 3,6 4,8 6,0 | 4 6 10 14 | 2 10 8 6 | 6 4 12 8 |
| 25 26 27 28 | | 4,0 6,2 10,0 8,4 | 6 8 10 12 | 4 6 4 10 | 10 4 8 6 |

Задача 7. Заряженная частица, ускоренная разностью потенциалов U , влетает в однородное магнитное поле индукцией B , перпендикулярное к направлению ее движения. Радиус кривизны траектории частицы в магнитном поле равен R . Найти неизвестную величину, выполнить дополнительное задание.

| № задания | Частица | $U, В$ | $B, Тл$ | $R, см$ | Дополнительно определить |
|-----------|-------------------|--------|---------------------|---------|--------------------------|
| 1 | Протон | 1800 | $6 \cdot 10^{-2}$ | ? | Период обращения |
| 2 | | 450 | ? | 15 | Момент импульса |
| 3 | | ? | $3 \cdot 10^{-2}$ | 12 | Нормальное ускорение |
| 4 | | 200 | $4 \cdot 10^{-2}$ | ? | Тангенциальное ускорение |
| 5 | Электрон | 8000 | $6 \cdot 10^{-3}$ | ? | Момент импульса |
| 6 | | ? | $3 \cdot 10^{-3}$ | 5 | Нормальное ускорение |
| 7 | | 320 | ? | 6 | Тангенциальное ускорение |
| 8 | | 720 | $9 \cdot 10^{-4}$ | ? | Период обращения |
| 9 | Позитрон | 720 | ? | 3 | Нормальное ускорение |
| 10 | | 320 | $2 \cdot 10^{-3}$ | ? | Тангенциальное ускорение |
| 11 | | 8000 | ? | 15 | Период обращения |
| 12 | | ? | $3 \cdot 10^{-3}$ | 6 | Момент импульса |
| 13 | Протон | 800 | $2 \cdot 10^{-2}$ | ? | Период обращения |
| 14 | | ? | $4 \cdot 10^{-2}$ | 10 | Момент импульса |
| 15 | | 1250 | ? | 25 | Нормальное ускорение |
| 16 | | ? | $3 \cdot 10^{-2}$ | 20 | Тангенциальное ускорение |
| 17 | α -частица | ? | $4 \cdot 10^{-2}$ | 11 | Тангенциальное ускорение |
| 18 | | 900 | ? | 12 | Момент импульса |
| 19 | | 400 | $2 \cdot 10^{-2}$ | ? | Нормальное ускорение |
| 20 | | ? | $8 \cdot 10^{-2}$ | 15 | Период обращения |
| 21 | Позитрон | 8000 | ? | 6 | Тангенциальное ускорение |
| 22 | | ? | $4 \cdot 10^{-3}$ | 3 | Нормальное ускорение |
| 23 | | 320 | $3 \cdot 10^{-4}$ | ? | Момент импульса |
| 24 | | 720 | ? | 9 | Период обращения |
| 25 | Электрон | 720 | $3 \cdot 10^{-3}$ | ? | Период обращения |
| 26 | | 320 | ? | 2 | Тангенциальное ускорение |
| 27 | | 8000 | $1,5 \cdot 10^{-2}$ | ? | Нормальное ускорение |
| 28 | | ? | $5 \cdot 10^{-4}$ | 30 | Момент импульса |

Задача 8. В опыте Юнга на пути одного из интерферирующих лучей помещалась тонкая прозрачная пластинка толщиной d и коэффициентом преломления n , вследствие чего интерференционная картина смещалась на m полос. Длина волны падающего света λ , свет падает на пластинку нормально. Найти неизвестную величину согласно номеру задания, выполнить дополнительное задание.

| № задания | d , мкм | n | m | λ , мкм | Построить график |
|----------------------|------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|------------------|
| 1 2 3 4 | ? ? ? ? | 1,5 | 2 5 8 10 | 0,60 | $m = f(d)$ |
| 5 6 7 8 | 10 | ? ? ? ? | 6 10 4 8 | 0,50 | |
| 9 10 11 12 | 15 | 1,3 | ? ? ? ? | 0,55 0,45 0,65 0,35 | |
| 13 14 15 16 | ? ? ? ? | 1,4 | 5 | 0,55 0,40 0,65 0,35 | |
| 17 18 19 20 | ? ? ? ? | 1,3 1,4 1,5 1,6 | 10 | 0,45 | $d = f(n)$ |
| 21 22 23 24 | 7,5 | 1,36 1,75 1,62 1,48 | 8 | ? ? ? ? | |
| 25 26 27 28 | 11 | ? ? ? ? | 4 9,6 7 8,4 | 0,55 | |
| | | | | | |

Задача 9. Катушка имеет сопротивление R и индуктивность L . Сила тока в катушке равна i_0 . Через время t после выключения сила тока в катушке становится равной i . Найти неизвестную величину, выполнить дополнительно задание.

| № задания | R , Ом | L , Гн | i_0 , А | i , А | t , с | Проанализировать зависимость |
|-----------|----------|----------|-----------|------------|----------------------|-----------------------------------|
| 1 | ? | 0,133 | i_0 | $0,5i_0$ | $4 \cdot 10^{-3}$ | $i = f(t)$ $i_0, R, L - const$ |
| 2 | 30 | ? | i_0 | $0,2i_0$ | $1,6 \cdot 10^{-2}$ | |
| 3 | 12 | 0,036 | ? | 0,1 | $5,37 \cdot 10^{-3}$ | |
| 4 | 25 | 0,75 | 0,5 | ? | $2,08 \cdot 10^{-2}$ | |
| 5 | 11,1 | 0,032 | i_0 | $0,25i_0$ | ? | $i = f(R)$ $i_0, t, L - const$ |
| 6 | ? | 0,04 | i_0 | $0,1i_0$ | $4,6 \cdot 10^{-3}$ | |
| 7 | 120 | ? | i_0 | $0,4i_0$ | $9,16 \cdot 10^{-4}$ | |
| 8 | 230 | 0,115 | ? | 0,2 | $8,05 \cdot 10^{-4}$ | |
| 9 | 180 | 0,09 | 0,8 | ? | $6,93 \cdot 10^{-4}$ | $i = f(L)$ $i_0, R, t - const$ |
| 10 | 138,6 | 0,1 | i_0 | $0,5i_0$ | ? | |
| 11 | ? | 0,16 | i_0 | $0,25i_0$ | $2,77 \cdot 10^{-3}$ | |
| 12 | 35 | ? | i_0 | $0,4i_0$ | $1,83 \cdot 10^{-2}$ | |
| 13 | 90 | 0,27 | ? | 0,125 | $4,16 \cdot 10^{-3}$ | $\frac{i}{i_0} = f(t)$ |
| 14 | 146 | 0,073 | 0,6 | ? | $8,95 \cdot 10^{-4}$ | |
| 15 | 28 | 0,252 | i_0 | $0,2i_0$ | ? | |
| 16 | ? | 0,24 | i_0 | $0,1i_0$ | $6,9 \cdot 10^{-3}$ | |
| 17 | 180 | ? | i_0 | $0,25i_0$ | $9,7 \cdot 10^{-4}$ | $\frac{i}{i_0} = f(R)$ |
| 18 | 110,9 | 0,84 | ? | 0,05 | $1,05 \cdot 10^{-2}$ | |
| 19 | 72 | 0,144 | 0,1 | ? | $3,22 \cdot 10^{-3}$ | |
| 20 | 45,8 | 0,15 | i_0 | $0,4i_0$ | ? | |
| 21 | ? | 0,45 | i_0 | $0,5i_0$ | $2,08 \cdot 10^{-3}$ | $\frac{i}{i_0} = f(L)$ |
| 22 | 96,6 | ? | i_0 | $0,2i_0$ | $8 \cdot 10^{-4}$ | |
| 23 | 85 | 0,34 | ? | 0,14 | $6,44 \cdot 10^{-3}$ | |
| 24 | 35,8 | 0,26 | 0,12 | ? | $1,3 \cdot 10^{-2}$ | |
| 25 | 104 | 0,2 | i_0 | $0,125i_0$ | ? | $\frac{i}{i_0} = f(t)$ |
| 26 | ? | 0,024 | i_0 | $0,1i_0$ | $9,2 \cdot 10^{-4}$ | |
| 27 | 183,2 | ? | i_0 | $0,4i_0$ | $1,1 \cdot 10^{-3}$ | |
| 28 | 62 | 0,31 | ? | 0,15 | $1,04 \cdot 10^{-2}$ | |

Задача 10. Красная граница фотоэффекта равна λ_0 , максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона W_{max} , при этом доля энергии фотона, израсходованная на работу вырывания фотоэлектрона, составляет k . Найти неизвестную величину согласно номеру задания в таблице.


| № задания | λ_0 , мкм | W_{max} , эВ | k |
|-----------|-------------------|----------------|------|
| 1 | 0,66 | 0,5 | ? |
| 2 | 0,473 | | ? |
| 3 | 0,276 | | ? |
| 4 | 0,545 | | ? |
| 5 | 0,621 | ? | 0,9 |
| 6 | | ? | 0,8 |
| 7 | | ? | 0,7 |
| 8 | | ? | 0,6 |
| 9 | ? | 0,767 | 0,75 |
| 10 | ? | 0,465 | |
| 11 | ? | 1,48 | |
| 12 | ? | 0,637 | |
| 13 | 0,5176 | 0,074 | ? |
| 14 | | 0,209 | ? |
| 15 | | 0,327 | ? |
| 16 | | 0,457 | ? |
| 17 | 0,887 | ? | 0,8 |
| 18 | 0,776 | ? | |
| 19 | 0,276 | ? | |
| 20 | 0,234 | ? | |
| 21 | ? | 0,65 | 0,95 |
| 22 | ? | | 0,85 |
| 23 | ? | | 0,75 |
| 24 | ? | | 0,70 |
| 25 | 0,472 | 0,054 | ? |
| 26 | 0,621 | 0,105 | ? |
| 27 | 0,262 | 0,772 | ? |
| 28 | 0,776 | 0,478 | ? |

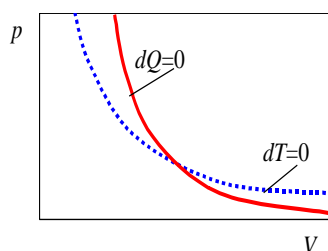
Материалы по организации итогового контроля

1. Что такое механическое движение?
2. Основная задача механики заключается...
3. Физическая величина, характеризующая быстроту изменения скорости по модулю и направлению, называется ...
4. Физическая величина, характеризующая быстроту движения, называется ...
5. Универсальной мерой различных форм движения и взаимодействия является ...
6. Выразите полное ускорение при криволинейном движении в векторной форме ...
7. Какое выражение представляет второй закон Ньютона в импульсном виде
8. Тело под действием силы 40 Н приобрело ускорение равное 2 м/с^2 . Чему равна масса тела?
9. Найти работу совершаемую телом при прямолинейном движении под действием постоянной силы. Где α - угол между направлениями силы и перемещения
10. Кинетическая энергия движущегося тела
11. Чему равен момент инерции тела массой $0,3 \text{ кг}$, который находится на расстоянии 20 см от оси.
12. Что называется силой?
13. Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия двух материальных точек массами m_1 и m_2 , находящихся на расстоянии r друг от друга?
14. Какая физическая величина называется мощностью?
15. Какая физическая величина называется механической энергией?
16. Основной закон релятивистской динамики
17. Укажите выражение полной энергии для релятивистской частицы
18. Укажите угловую скорость вращательного движения
19. Укажите угловое ускорение вращательного движения
20. Укажите центростремительное ускорение (нормальная составляющая ускорения)
21. Укажите тангенциальное ускорение (тангенциальная составляющая ускорения)
22. Укажите связь между линейной (v) и угловой (ω) скоростью
23. Основное уравнение динамики материальной точки
24. Укажите формулу, которая описывает условие состояния покоя материальной точки
25. Автомобиль движется с ускорением \vec{a} . С какой силой человек массой m давит на спинку сидения
26. Потенциальная энергия тела, поднятого над поверхностью Земли на высоту h
27. Как изменится момент инерции тела, если при прочих равных условиях его массу увеличить в 3 раза?
28. Момент импульса тела меняется по закону $L = 5 + 2t^2$. Чему равен момент силы, приложенной к телу в момент времени 2 с
29. Однородный цилиндр массой 6 кг катится без проскальзывания по горизонтальной поверхности со скоростью 2 м/с . Какова кинетическая энергия этого движения?
30. Первая космическая скорость ?
31. Какое из выражений является определением импульса релятивистской частицы?
32. Путь для равномерного движения?
33. Путь для равнопеременного движения?
34. Движение материальной точки задано уравнением $x = 4t + 6t^2$. Укажите начальную скорость точки.
35. За какое время тело, начавшее падать из состояния покоя, пройдет путь $4,9 \text{ м}$?
36. Тело с высоты $19,6 \text{ м}$ падает за 2 секунды . Вычислите ускорение в конце пути.

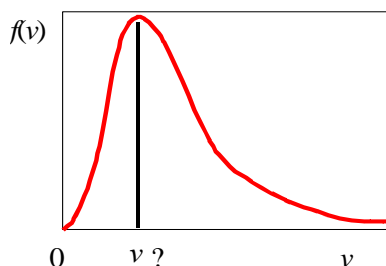
37. Движение материальной точки задано уравнением $x = 8t + 0.3t^2$. Определите зависимость скорости $v_x(t)$
38. Укажите формулу второго закона Ньютона
39. В каких единицах измеряется импульс (количество движения) в системе СИ?
40. Определите кинетическую энергию тела массой 3 кг, движущейся скоростью 4 м/с.
41. Какой формулой определяется работа, совершаемая постоянной силой....
42. Тело движется по окружности. Как изменится момент инерции тела, при уменьшении радиуса окружности в 2 раза?
43. При равноускоренном движении тело в течение 3 секунд увеличило скорость движения с 6 до 18 м/с. Чему равен модуль ускорения?
44. Укажите формулу второй космической скорости
45. Как будет двигаться тело массой 2 кг под действием силы 4 Н?
46. Под действием какой силы пружина жесткостью 100 Н/м удлинится на 0.02 м?
47. Сколько времени потребуется, чтобы автомобиль с постоянной скоростью 54 км/час преодолел путь 300 м ?
48. Диск совершает 20 оборотов в секунду. Определите угловую скорость колеса.
49. Что называется нормальным ускорением?
50. Движение материальной точки задано уравнением $S = 4t^2 + 6$. Определите ускорение точки.
51. Из окна вагона на горизонтальное полотно дороги свободно падает предмет. В каком случае предмет падает быстрее?
52. Какова правильная формула для длины движущегося со скоростью v стержня вдоль своей оси? Собственная длина стержня l_0 .
53. Чему равен момент инерции сплошного однородного шара массой m и радиуса R относительно оси, проходящей через центр масс?
54. Чему равен момент инерции сплошного однородного цилиндра массой m и радиуса R относительно его оси симметрии?
55. Чему равна частота вращения тела, если его угловая скорость 6,28 рад/с?
56. Тело массой 2 кг подняли на высоту 5 метров. Определите потенциальную энергию. Ускорение свободного падения $g = 10 \text{ м/с}^2$.
57. Какую работу должен совершить человек массой 60кг, чтобы подняться с грузом массой 10кг на высоту 10м.
58. Чему равен момент инерции тонкостенного цилиндра или обруча массы m и радиуса R относительно оси, перпендикулярной плоскости обруча и проходящей через его центр масс?
59. Какая физическая величина измеряется в единицах - «кг* м/с»?
60. Укажите момент инерции материальной точки.
61. Укажите формулу третьей космической скорости
62. Какое выражение соответствует определению потенциальной энергии сжатой пружины?
63. Какие физические величины измеряются в Джоулях?
64. Раздел механики, изучающий движение тел без учета причин, его вызывающих называется ...
65. Определите связь между тангенциальным и угловым ускорением
66. Тело движется равномерно по окружности. Как изменится центростремительное ускорение, если линейная скорость остается неизменной, а радиус вращения увеличится в 3 раза?
67. Укажите выражение закона сохранения импульса для замкнутой системы
68. Определить коэффициент трения, если путь торможения автомобиля 8 м, а скорость была равна 10 м/с.

69. Раздел механики, исследующий законы и причины, вызывающие движение тел называется ...
70. Укажите выражение для работы, при перемещении тела в гравитационном поле
71. Какое выражение соответствует теореме Штейнера?
72. Кинетическая энергия тела, вращающегося вокруг неподвижной оси z .
73. Укажите момент инерции шара радиусом r
74. Водолаз может погружаться на глубину 20 м. Определите гидростатическое давление воды в море на этой глубине ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $g = 10 \text{ Н/кг}$).
75. Какова правильная формула для длины движущегося со скоростью v стержня вдоль своей оси? Собственная длина стержня l_0 .
76. Границы применимости законов классической механики (законы Ньютона).
77. Колесо радиусом $R = 0.4 \text{ м}$ катится со скоростью 20 м/с без проскальзывания. Определите угловую скорость колеса.
78. Укажите формулу пути при равнозамедленном движении.
79. На парус яхты площадью 60 м^2 , ветер оказывает давление в 80 Па. Сила действующая на парус.
80. Задано уравнение движения материальной точки $x = 2 - 4t + t^2$. Определить импульс точки массой 2 кг в момент времени 1 с.
81. Определить силу действующую на пружину, при коэффициенте жесткости 100 Н/м и удлинении 0,2 м.
82. Тело движется прямолинейно по закону $S = 5t + 4t^3$. Чему равно ускорение тела в момент времени 2 с.
83. При увеличении скорости вращательного движения в 2 раза и уменьшении радиуса окружности в 4 раза центростремительное ускорение тела.
84. Систему отсчета образуют...
85. Чему равен момент силы, если длина плеча $l = 20 \text{ см}$ и сила равная $F = 5 \text{ Н}$ действует в перпендикулярном направлении.
86. Момент инерции сплошного цилиндра радиусом R .
87. Какова связь энергии и импульса релятивистской частицы?
88. В каких единицах измеряется мощность?
89. Любитель прогулки 5 км прошел к югу, затем 12 км к востоку. Определите величину модуля его перемещение.
90. В лодку массой 150 кг, скоростью 4 м/с плывающую под мостом сбросили груз весом 50 кг. Как изменится скорость лодки (сопротивлением воды можно пренебречь).
91. Момент импульса при вращении тела меняется по закону $L = 5 + 2t^2$. Чему равен момент силы, приложенной к телу в момент времени 2 с.
92. Какая физическая величина измеряется в единицах - "кг м/с"?
93. Момент инерции тела при вращательном движении 6 кг/м^2 , а угловое ускорение 4 рад/с^2 . Определить момент силы действующего на тело.
94. Задано закономерность угла поворота $\varphi = 3t^2$ от времени для вращательного движения. Определить угловую скорость ω и угловое ускорение ϵ в момент времени $t = 3 \text{ с}$.
95. Точка движется по кривой. Радиус кривизны 3 м, скорость точки $v = 2 \text{ м/с}$, а касательное ускорение $a_t = 0,5 \text{ м/с}^2$. Определить полное ускорение точки.
96. Какую работу совершает двигатель мощностью 6 кВт за 5 минут.
97. Какое выражение соответствует определению потенциальной энергии сжатой пружины?
98. Однородный цилиндр массой 6 кг катится без проскальзывания по

- горизонтальной поверхности со скоростью 2 м/с. Какова кинетическая энергия этого движения?
99. При отходе от остановки ускорение автобуса равно 1 м/с^2 . Какой путь проходит автобус за 10 с?
 100. Тело движется с постоянной по модулю скоростью по окружности. Как изменится центростремительное ускорение тела при увеличении его скорости в 2 раза?
 101. Как будет двигаться тело массой 2 кг под действием силы 4 Н?
 102. Под действием какой силы пружина жесткостью 100 Н/м удлинится на 0.02 м?
 103. Чему равен момент инерции тонкого кольца массы m и радиуса R относительно оси, перпендикулярной плоскости кольца и проходящей через его центр масс?
 104. Чему равен момент инерции шара массой m и радиуса R относительно оси, проходящей через центр масс?
 105. Какую силу тяги создает электровоз, движущийся со скоростью 20 м/с, развивая мощность 200 кВт?
 106. Какое из этих выражений определяет релятивистский импульс
 107. Укажите формулу пути при равнозамедленном движении
 108. Укажите момент инерции системы материальных точек
 109. Закон сохранения импульса для изолированной системы
 110. Задано движение материальной точки уравнением $x = 8t + 0.3t^2$. Определите зависимость скорости $v_x(t)$.
 111. Какова связь постоянной Больцмана с универсальной газовой постоянной?
 112. По какой формуле можно найти молярный объем  для идеального газа?
 113. При нагревании идеального газа его абсолютная температура увеличилась в 2 раза. Как изменилась при этом средняя кинетическая энергия теплового движения молекул газа:
 114. Барометрическая формула для газа, имеющего молярную массу M :
 115. Как запишется закон Дальтона для трехкомпонентной смеси идеальных газов ?
 116. Как записывается уравнение кинетической теории для давления идеальных газов ?
 117. Как записывается основное уравнение кинетической теории газов?
 118. Как выражается средняя энергия молекулы газа, имеющей i степеней свободы?
 119. Чему равно число степеней свободы i жестких трехатомных молекул?
 120. Какая запись первого начала термодинамики верная ?
 121. Чему равна молярная теплоемкость гелия (He) при постоянном объеме?
 122. Какой процесс называется адиабатным?
 123. Закон Дальтона определяет:
 124. Как можно сформулировать второе начало термодинамики?
 125. Найти концентрацию молекул, если в $0,01 \text{ м}^3$ содержится $8 \cdot 10^{10}$ молекул
 126. Как находится энтропия системы тел?
 127. Какова связь энтропии и термодинамической вероятности W ?
 128. Что является причиной отклонения поведения реальных газов от идеальных?
 129. Как записывается уравнение Ван-дер-Ваальса для одного моля реального газа?
 130. Какова связь между молярной C и удельной c теплоемкостями и молярной массой M ?
 131. Что такое средняя длина свободного пробега молекул газа ?
 132. Как выражается средняя длина свободного пробега молекул газа с эффективным диаметром молекул d ?
 133. Правильный график адиабаты и изотермы.



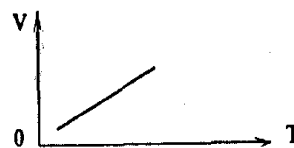
134.
 135. Какая формула для средней квадратичной скорости молекул газа, имеющего молярную массу M , верная?
 136. Какая из средних скоростей молекул газа изображена на рисунке?



137.
 138. Формула, определяющая изменение внутренней энергии идеального газа.
 139. Средняя кинетическая энергия молекулы идеального газа
 140. Основная формула кинетической теории газов
 141. Чему равно число степеней свободы i одноатомных молекул?
 142. Чему равно количество теплоты, полученное системой в адиабатном процессе?
 143. Уравнение адиабаты
 144. На что расходуется теплота, полученная системой в изохорическом процессе?
 145. На что расходуется теплота, полученная системой в изобарическом процессе?
 146. Работа газа при изменении его объема на dV :
 147. Как записывается формула Майера для молярных теплоемкостей?
 148. Чему равно изменение внутренней энергии в изотермическом процессе?
 149. Что называется процессом в термодинамике?
 150. Что называется термодинамическим циклом?
 151. Что такое вечный двигатель первого рода ?
 152. Что называется вечным двигателем второго рода ?
 153. Уравнение Менделеева-Клапейрона
 154. К чему приводит использование в качестве холодильника (теплоприемника) для тепловых машин окружающей среды?
 155. Как вводится коэффициент полезного действия тепловой машины Карно?
 156. В каких единицах СИ измеряется коэффициент полезного действия?
 157. Чему равен коэффициент полезного действия тепловой машины Карно при температуре нагревателя $T_1 = 400$ К и температуре холодильника $T_2 = 250$ К ?
 158. В каких единицах СИ измеряется энтропия?
 159. Какой формулой выражается изменение энтропии системы в обратимых процессах через приведенную теплоту ?
 160. Каким свойством обладает энтропия изолированной системы согласно второму началу термодинамики?
 161. Как изображается изохора Ван-дер-Ваальса по сравнению с изохорой идеального газа ?
 162. Как выражается критический объем газа Ван-дер-Ваальса через поправки ?
 163. Внутренняя энергия газа Ван-дер-Ваальса
 164. В каких единицах СИ измеряется универсальная газовая постоянная?

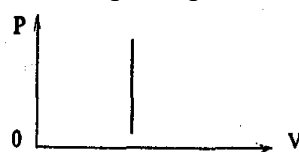
165. Какая температура соответствует средней квадратичной скорости молекул кислорода $\sqrt{\langle v^2 \rangle} = 400 \text{ м/с}$?
166. Укажите правильную формулу для изобарного процесса.
167. По какой формуле можно найти молярную массу идеального газа, если известна его плотность ρ при определенной температуре T и давлении p ?
168. Укажите правильное определение удельной теплоемкости вещества. Удельной теплоемкостью вещества называется ...
169. Сколько молекул содержится в газе объемом 2 м^3 при давлении 150 кПа и температуре 27°C : ($N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$)
170. Укажите правильное значение универсальной газовой постоянной R .
171. Укажите правильную формулу для показателя адиабаты γ (i -число степеней свободы молекулы газа)?
172. Что называется степенями свободы молекул?
173. Укажите правильные утверждения относительно работы:
174. Средняя энергия молекулы идеального газа $6,4 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$. Давление газа 4 МПа . Найти число молекул газа в единице объема:
175. Как изменится давление идеального газа при увеличении его объема в два раза и уменьшении абсолютной температуры в два раза:
176. Один моль идеального газа с начальными параметрами P, V, T расширяется при $p = \text{const}$ до объема $3V$. Какую работу совершает газ при этом:
177. Укажите правильные утверждения относительно внутренней энергии:
178. В ходе цикла Карно рабочее вещество получает от нагревателя тепло $Q_1 = 300 \text{ кДж}$. Температуры нагревателя и холодильника равны $T_1 = 450 \text{ К}$ и $T_2 = 270 \text{ К}$. Определить работу A за один цикл:
179. Как изменится средняя кинетическая энергия теплового движения молекул идеального газа при увеличении абсолютной температуры газа в 3 раза?
180. Найдите значение абсолютной температуры, соответствующей 0°C :
181. Идеальным называется газ, удовлетворяющий условию...
182. Работа при изохорическом процессе.
183. Газ расширяется при нагревании под поршнем при атмосферном давлении. Какой из указанных процессов имеет место:
184. Запишите первое начало термодинамики в а) дифференциальной и б) интегральной формах:
185. Чему равно число степеней свободы ν
186. а) одноатомной,
187. б) двухатомной,
188. в) трехатомной и многоатомной молекул, атомы которых жестко связаны:
189. Укажите правильные формулы для изохорного процесса (dU, dQ, A)
190. Каким ученым найдена функция распределения молекул идеального газа по скоростям
191. Неравенство Клаузиуса:
192. Какой температуре по шкале Цельсия соответствует температура $T = 152 \text{ К}$:
193. По какому циклу работает холодильная машина?
194. Зависимость атмосферного давления P от высоты h над поверхностью Земли?
195. Поглощается или выделяется тепловая энергия при конденсации пара?
196. Распределение частиц во внешнем силовом поле.
197. По какому циклу работают тепловые машины?
198. Работа при изотермическом процессе:
199. Больцмановское распределение – это распределение молекул...

200. Каким выражением определяется внутренняя энергия идеального трехатомного газа при температуре T , если масса газа m , молекулярная масса M :
201. Выразите плотность данного газа через концентрацию молекул n , его молярную массу M и известные константы:
202. Какой процесс происходит с изменением параметров газа в соответствии с



графиком, представленным на рисунке:

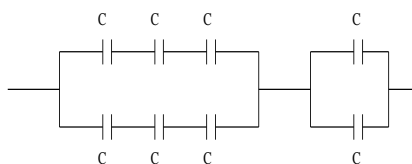
203. Распределение Пуассона – это распределение молекул...
204. Больцмановское распределение – это распределение, описывающее...
205. Формула, которая определяет силу сопротивления F , действующую со стороны потока жидкости на медленно движущийся в ней шарик.
206. Уравнение Пуассона.
207. Какой процесс происходит с изменением параметров газа в соответствии с



графиком, представленным на рисунке:

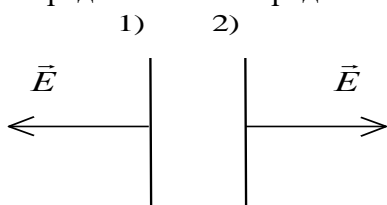
208. Какой прибор служит для измерения атмосферного давления.
209. Что является причиной отклонения поведения реальных газов от идеальных?
210. Энергия поступательного движения одной молекулы водорода.
211. Формула Больцмана (φ - потенциальная энергия молекул в поле внешних сил).
212. Температура, выше которой газ никаким сжатием не может быть переведен в жидкое состояние, называется...
213. Единицей количества вещества в СИ является?
214. Абсолютная температура измеряется в...
215. Концентрация частиц идеального газа измеряется в СИ..
216. Единица измерения равная Дж/(моль•К) соответствует...
217. В СИ единицей внутренней энергии является?
218. Что принимается за единицу давления в СИ?
219. Постоянная Больцмана в СИ имеет размерность?
220. Постоянная Авогадро имеет размерность в СИ?
221. Количество вещества ν определяется по формуле?
222. Массу m_0 одной молекулы вещества с молярной массой M можно вычислить по формуле?
223. Средняя квадратичная скорость хаотического движения молекулы равна?
224. Формула давления p идеального газа.
225. Уравнением изотермического процесса для данной массы идеального газа является..
226. Идеальный газ участвует в изотермическом процессе. Первый закон термодинамики для этого процесса имеет вид?
227. Для изохорного процесса в идеальном газе первый закон термодинамики имеет вид?
228. Молекулой вещества называют?
229. Какому закону соответствует, что объем данного количества газа при постоянной температуре обратно пропорционален его давлению ?
230. При постоянном давлении, для постоянной массы идеального газа справедлив закон?

231. Для смеси химически не взаимодействующих газов, для определения их общего объема применим закон...
232. Газ находится в цилиндре с подвижным поршнем и при температуре 300 К занимает объем 250 см³. Какой объем (в см³) займет газ, если температура понизится до 270 К? Давление постоянно.
233. На сколько процентов надо уменьшить абсолютную температуру газа при увеличении его объема в 7 раз, чтобы давление упало в 10 раз?
234. Два одинаковых сосуда, содержащие кислород при 300 К, соединены тонкой горизонтальной трубкой, посередине которой находится столбик ртути. Объемы сосудов 4×10^{-5} м³. Когда один сосуд нагрели, а другой охладили на 3 К, столбик ртути сместился на 1 см. Какова площадь сечения трубки (в мм²)?
235. Сколько молекул содержится в одном моле водорода?
236. Какие частицы описывает Максвелловское распределение?
237. Функция распределения молекул идеального газа по скоростям найдена ученым ...
238. В двух сосудах находятся идеальные газы. Масса молекул газа в первом сосуде в 2 раза больше массы молекул газа во втором сосуде. Чему равно отношение давления газа в первом сосуде к давлению газа во втором сосуде при одинаковых значениях концентрации молекул и температуры.
239. Количество молекул, содержащихся в 4 г водорода Н₂, (число Авогадро $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹) равно:
240. Как нужно изменить объем газа, чтобы при постоянной температуре его давление уменьшилось в 4 раза:
241. Какое давление создает кислород массой 32 кг при температуре 27⁰С, если он находится в сосуде объемом 8,31м³:
242. Зависимость атмосферного давления P от высоты h над поверхностью Земли:
243. <question>Сколько молекул содержится в газе объемом 3 м³ при давлении 100 кПа и температуре 27⁰С.
244. Температура идеального газа уменьшилась в 2 раза, объем газа увеличился в 2 раза. Как изменилось давление газа:
245. Как изменится сила кулоновского взаимодействия двух небольших заряженных шаров, при увеличении заряда каждого из шаров в 4 раза, если расстояние между ними остается неизменным?
246. Как изменится сила кулоновского взаимодействия двух точечных электрических зарядов при уменьшении расстояния между ними в 2 раза?
247. Определите знак заряда на проводнике, изображенном на рисунке:
-
- 248.
- 249.
250. Как изменится потенциал, создаваемый зарядом в точке, если заряд увеличили в 2 раза?
251. Укажите связь между напряженностью электрического поля и потенциалом.
252. Как распределяются свободные заряды в проводнике при помещении его в электростатическое поле?
253. Как ведут себя силовые линии электростатического поля вблизи поверхности заряженного проводника?
254. Электрическая индукция - это явление...
255. Определите емкость трех последовательно соединенных конденсаторов одинаковой емкости C .
256. Найдите емкость батареи конденсаторов



257.

258. Как изменится емкость конденсатора, если расстояние между пластинами увеличить в 2 раза?
259. Формула для энергии электрического поля плоского конденсатора.
260. Поляризация - это явление ...
261. Вектор электрического смещения можно определить по формуле
262. Электростатическая теорема Гаусса при наличии диэлектриков.
263. Определение неполярной молекулы.
264. Определение полярной молекулы.
265. Электрическим током называется...
266. Если через поперечное сечение проводника за любые равные промежутки времени проходит одинаковый заряд, то такой ток является...
267. Укажите выражение закона Ома для полного участка цепи.
268. Сопротивление проводника 100 Ом. Определите напряжение на концах проволоки, если через него протекает ток 10 мкА.
269. Как изменится сила тока на участке цепи, если напряжение увеличить в 2 раза, а сопротивление уменьшить в 2 раза?
270. Единица измерения электрической проводимости
271. Термоэлектронная эмиссия - это явление...
272. Как влияет увеличение работы выхода электронов из металлов на их эмиссию?
273. Носителями электрического тока в металлах являются...
274. Носителями электрического тока в электролитах являются...
275. Носителями электрического тока в вакууме являются...
276. Найдите формулу закона Джоуля-Ленца в дифференциальной форме.
277. Какая из формул не является законом Ома?
278. Укажите в СИ единицу измерения напряженности электрического поля.
279. Диамагнетиками называют...
280. Укажите в СИ единицу измерения потенциала электрического поля.
281. Вектор электрического смещения можно определить по формуле.
282. Укажите электростатическую теорему Гаусса при наличии диэлектриков
- 283.
284. Силовые линии какого поля являются замкнутыми?
285. Двум металлическим пластинам сообщены одинаковые по величине заряды. Напряженность результирующего электрического поля показана на рис. Определите знак зарядов на пластинах



286.

287. Укажите выражение для работы при перемещении заряда в электрическом поле.
288. Металлическому шару радиуса R сообщен положительный заряд q . Определить потенциал шара.
289. Энергия взаимодействия точечных зарядов имеет вид...

290. Плотность электрического тока имеет вид (e - заряд, n - концентрация, \vec{v} - скорость)
291. Укажите первое правило Кирхгофа
292. Укажите силу Лоренца..
293. Укажите закон электромагнитной индукции....
294. Чему равна энергия магнитного поля?
295. Укажите размерность модуля вектора магнитной индукции...
296. Какое явление наблюдалось в опыте Эрстеда?
297. Укажите формулу закона Био-Савара-Лапласа...
298. Укажите формулу закона Ампера...
299. По какой формуле определяется ток короткого замыкания?
300. К проводнику с током приблизили магнитную стрелку. Как поведет она себя?
301. Силовые линии какого поля являются замкнутыми?
302. По какой из формул можно вычислить напряженность магнитного поля \vec{H} ?
303. Найдите верную формулировку теоремы о циркуляции вектора \vec{H} .
304. Укажите закон полного тока.
305. Поле, действующее только на движущиеся в нем заряды?
306. Какое явление наблюдалось в опытах Фарадея?
307. Электромагнитная индукция - это явление...
308. Укажите формулу закона Фарадея.
309. Найдите магнитный поток сквозь торец длинного соленоида с площадью поперечного сечения S , если по нему течет ток силой I и число витков на единице длины n .
310. Укажите формулу для ЭДС самоиндукции...
311. Как изменится энергия магнитного поля катушки индуктивности L , если ток, протекающий через нее, увеличить в два раза.
312. Укажите формулу энергии магнитного поля...
313. Укажите формулу плотности энергии магнитного поля...
314. Какое из сопротивлений называется активным элементом цепи?
315. Что подтвердил экспериментально Фарадей?
316. Диамагнетики - это магнетики, у которых магнитная восприимчивость...
317. Парамагнетики - это магнетики, у которых магнитная восприимчивость...
318. Ферромагнетики - это магнетики, у которых магнитная восприимчивость...
319. Магнитная восприимчивость обозначается ...
320. Какова связь между векторами \vec{B} и \vec{H} ?
321. Единица измерения емкости в системе СИ (система интернациональная).
322. Поверхностная плотность зарядов определяется как...
323. Формула для плотности тока...
324. Силовой линией, или линией вектора напряженности поля, называют
325. Точечный заряд создает в окружающем его пространстве электрическое поле,
326. напряженность которого:
327. На каком расстоянии от заряда $1.0 \cdot 10^{-8}$ Кл напряженность поля равна 300 В/м ?
 $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
328. Определить энергию магнитного поля катушки, если индуктивность ее 0.20 Гн и сила тока в ней 12 А.
329. Удельное сопротивление проводника ρ зависит от...
330. Конденсатором называется...
331. Вектор D – это вектор ...
332. Чему равна энергия электрического поля в конденсаторе емкостью 10 мкФ, если напряжение между его обкладками 4 В?
333. Сколько теплоты выделится в электроплитке за 10 с, если ее сопротивление 0.2

- кОм, а сила тока 5 А?
334. Как изменится мощность выделяемая на резисторе, если увеличить ток в 4 раза?
335. Укажите емкость плоского конденсатора...
336. Укажите выражение плотности энергии электрического поля...
337. Что является первичным источником магнитных полей?
338. Единицей какой физической величины является тесла?
339. От чего зависит ЭДС индукции, возникающей в контуре?
340. Определите индуктивность катушки, в которой при изменении тока на 0,4 А за 0,2 с индуцируется ЭДС 40 В?
341. Плоский воздушный конденсатор емкости 5 мкФ заряжен до 10 В. Чему равна энергия конденсатора?
342. Каким образом можно увеличить емкость плоского конденсатора:
343. Сила взаимодействия F двух точечных зарядов пропорциональна
344. Электрические заряды двух туч соответственно равны 20 и -30 Кл. Среднее расстояние между тучами 30 км. С какой силой взаимодействуют тучи?
345. Имеются два конденсатора $C_1 = 2,0$ мкФ, $C_2 = 4,0$ мкФ. Какова общая емкость
346. при их параллельном соединении?
347. Имеются два конденсатора $C_1 = 2,0$ мкФ, $C_2 = 4,0$ мкФ. Какова общая емкость
348. при их последовательном соединении?
349. На какие заряды действует сила Лоренца ?
350. Как ведут себя силовые линии электростатического поля вблизи поверхности проводника?
351. Определить энергию магнитного поля катушки, если индуктивность ее 0.20
352. Гн и сила тока в ней 12 А.
353. Единицей какой физической величины является Ом?
354. Как изменится сопротивление провода, если его длину уменьшить в 4 раза?
355. Как изменится сопротивление провода, если его длину увеличить в 4 раза?
356. Как изменится мощность выделяемая на резисторе, если увеличить ток в 2 раза?
357. Как изменится мощность выделяемая на резисторе, если увеличить ток в 4 раза?
358. Что является первичным источником магнитных полей?
359. Единицей какой физической величины является тесла?
360. Какая физическая величина выражается в веберах?
361. От чего зависит э.д.с. индукции, возникающей в контуре?
362. Как зависит от расстояния r потенциал электростатического поля точечного заряда
363. Размерность модуля вектора магнитной индукции...
364. Плотность энергии магнитного поля...
365. Формула плотности энергии электромагнитного поля...
366. Как направлены в электромагнитной волне вектора E и H ?
367. Как направлена сила взаимодействия двух точечных зарядов?
368. Плотность тока определяется по формуле...
369. Температура Кюри это температура, при которой...
370. Определите индуктивность катушки, в которой при изменении тока на 0,4 А за 0,2 с индуцируется эдс 40 В?
371. Как направлена сила, действующая на движущийся положительный заряд, находящийся в магнитном поле?
372. Что необходимо, чтобы увеличить емкость плоского конденсатора?
373. У парамагнетиков магнитная восприимчивость...
374. У диамагнетиков магнитная восприимчивость...
375. Линейные размеры обкладок сферического конденсатора увеличили в 2 раза. Как изменилась его емкость?
376. Укажите единицу измерения удельной электрической проводимости вещества

377. Укажите единицу измерения величины D (электрическое смещение или электрическая индукция)...
378. Выразить в системе СИ 1 эВ.
379. Поверхность проводника это...
380. Какие из перечисленных веществ обладают свойством магнитного гистерезиса?
381. Первое правило Кирхгофа...
382. Найти сопротивление лампы, если напряжение 220 В, а сила тока 2 А.
383. Найти силу, действующую на заряд 10 Кл в поле с напряженностью 10 В/м.
384. Единица измерения силы тока...
385. Единица измерения напряжения тока
386. Единица измерения мощности тока
387. Единица измерения электрической проводимости
388. Единица измерения силы в механике
389. Систему отсчета образуют...
390. Раздел механики, исследующий законы и причины, вызывающие движение тел называется ...
391. Раздел механики, изучающий движение тел без учета причин, его вызывающих называется ...
392. Физическая величина, характеризующая быстроту изменения скорости по модулю и направлению, называется ...
393. Физическая величина, характеризующая быстроту движения, называется ...
394. Универсальной мерой различных форм движения и взаимодействия является ...
395. Гармонические колебания и их характеристики.
396. Гармонические осцилляторы.
397. Энергия гармонических колебаний. Затухающие и вынужденные колебания. Резонанс.
398. Основные характеристики волнового движения. Уравнение волны.
399. Фазовая скорость. Волновое уравнение. Плоская и сферическая волна.
400. Волновой пакет. Групповая скорость.
401. Сложение волн: интерференция.
402. Дисперсия волн. Дифференциальное уравнение электромагнитной волны.
403. Свет как электромагнитная волна. Свойства световых волн.
404. Временная и пространственная когерентность. Интерференция световых волн.
405. Дифракция света. Принцип Гюйгенса-Френеля.
406. Метод зон Френеля. Дифракция на одной щели и на многих щелях.
407. Дисперсия света. Поглощение света.
408. Поляризация света.
409. Квантовая природа электромагнитного излучения.
410. Тепловое излучение. Излучение абсолютно черного тела.
411. Квантовая гипотеза и формула Планка.
412. Фотоэффект. Фотоны.
413. Энергия и импульс световых квантов. Эффект Комптона.
414. Корпускулярно-волновой дуализм электромагнитного излучения.
415. Гипотеза де Бройля. Свойства волн де Бройля.
416. Волновые свойства микрочастиц и соотношение неопределенностей Гейзенберга.
417. Волновая функция и ее статистический смысл.
418. Временное и стационарное уравнения Шредингера.
419. Атом водорода. Квантовые числа.
420. Спин электрона. Рентгеновские спектры.
421. Атомное ядро. Ядерные силы. Модели ядра.
422. Радиоактивность и его виды. Ядерные реакции и их основные типы. Нейтроны.

423. Реакция деления ядра. Цепная реакция деления. Реакция синтеза атомных ядер.
 424. Космическое излучение. Мюоны, мезоны и их свойства.
 425. Частицы и античастицы. Гипероны.
 426. Классификация элементарных частиц. Кварки.

Глоссарий

| | |
|-------------------------------|---|
| Механика | раздел физики, изучающий закономерность механического движения и причины, вызывающие или изменяющие это движение |
| Классическая механика | механика, созданная Г.Галилеем и И.Ньютоном и изучающая законы движения макроскопических тел, движущихся со скоростями малыми по сравнению со скоростью света в вакууме |
| Релятивистская механика | механика, основанная на специальной теории относительности, сформулированной А.Эйнштейном и изучающая движение макроскопических тел со скоростями, сравнимыми со скоростью света в вакууме |
| Квантовая механика | раздел физики, изучающий движение микроскопических тел, таких как отдельные атомы и элементарные частицы |
| Кинематика | раздел механики, изучающий механическое движение тел, не рассматривая обуславливающие это движение причины |
| Материальная точка | физическая модель, тело, обладающее массой, размерами которого можно пренебречь, по сравнению с расстояниями до других тел |
| Механическое движение | изменение положения тел или их частей в пространстве относительно друг друга с течением времени |
| Мгновенная скорость | векторная величина, равная первой производной перемещения движущейся точки по времени и направленная по касательной к траектории в каждой ее точке |
| Тангенциальное ускорение | векторная величина, характеризующая изменение скорости по величине, направленная по касательной к траектории |
| Нормальное ускорение | векторная величина, характеризующая быстроту изменения скорости по направлению, направленная к центру кривизны траектории в данной точке |
| Угловая скорость | векторная величина, равная первой производной угла поворота по времени, и направленная вдоль оси вращения по правилу правого винта |
| Центростремительное ускорение | нормальное ускорение точки, равномерно движущейся по окружности |
| Динамика | раздел механики, изучающий причины, вызывающие или изменяющие движение тел |
| Первый закон Ньютона | существуют такие системы отсчета, относительно которых поступательно движущееся тело сохраняет свою скорость постоянной, если на нее не действуют другие тела или действия тел компенсируются |
| Второй закон Ньютона | ускорение, приобретаемое материальной точкой, пропорционально вызывающей его силе, совпадает с ней |

| | |
|---|---|
| | по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки |
| Третий закон Ньютона | силы, с которыми действуют друг на друга материальные точки, равны по модулю, противоположно направлены и действуют по прямой, соединяющей эти точки |
| Элементарная работа силы | Скалярное произведение силы и элементарного перемещения |
| Мощность | работа, совершенная силой за единицу времени |
| Кинетическая энергия | энергия механического движения тела, равная половине произведения массы тела на квадрат скорости |
| Потенциальная энергия | механическая энергия системы тел, определяемая их взаимным расположением и характером сил взаимодействия между ними |
| Закон сохранения механической энергии | полная механическая энергия системы, в которой действуют только консервативные силы, сохраняется постоянной, т.е. не меняется со временем |
| Абсолютно упругий удар | удар, в результате которого в обоих взаимодействующих телах не остается никаких деформаций и вся кинетическая энергия, которой обладали тела до удара, после удара снова превращается в кинетическую энергию |
| Абсолютно неупругий удар | удар, в результате которого тела объединяются, двигаясь дальше как единое целое |
| Закон сохранения момента импульса | момент импульса замкнутой системы тел остается постоянным, т.е. не меняется с течением времени |
| Вязкость | свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой |
| Молекулярная физика | раздел физики, изучающий строение и свойства вещества, содержащего огромное количество находящихся в непрерывном хаотическом движении атомов и молекул |
| Молекулярно-кинетическая теория | раздел молекулярной физики, основанной на статистическом методе исследования систем |
| Термодинамика | раздел физики, изучающий свойства микроскопических систем, не рассматривая протекающих в них микропроцессов, а используя феноменологический подход |
| Относительная молекулярная масса | отношение массы молекулы вещества к $1/12$ массы изотопа углерода C_{12} |
| Моль | количество вещества, содержащее такое количество молекул, что и $0,012$ кг изотопа углерода C_{12} |
| Идеальный газ | Идеализированная физическая модель, согласно которой собственный объем молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда, между молекулами отсутствуют силы взаимодействия и столкновения молекул газа между собой и стенкой сосуда абсолютно упругие |
| Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона) | уравнение вида $pV_m = RT$, где V_m - молекулярный объем, а R - молярная газовая постоянная |
| Статистическая физика | раздел теоретической физики, изучающий свойства систем, состоящих из очень большого числа частиц с |

| | |
|--|--|
| | помощью статистического метода |
| Распределение Максвелла | распределение молекул по скоростям, не зависящее от времени, имеющие вид: $f(V)=4\pi (M_0/2\pi kT)^{3/2} V^2 e^{-M_0 V^2/2kT}$, где M_0 - масса молекул газа, T – температура, k - постоянная Больцмана |
| Основное уравнение молекулярно-кинетической теории | уравнение, выражающее прямо пропорциональную зависимость давления газа от концентрации молекул, массы молекул и квадрата среднеквадратичной скорости молекул |
| Закон Больцмана | Закон о равнораспределении энергии по степеням свободы, согласно которому на каждую поступательную и вращательную степени свободы приходится в среднем кинетическая энергия, равная $\frac{1}{2} kT$, а на колебательную степень свободы kT |
| Равновесное состояние | Состояние системы, при котором все термодинамические параметры имеют определенные значения, в котором система может оставаться сколь угодно долго при неизменных внешних условиях |
| Неравновесное состояние | Состояние системы, при котором хотя бы один из термодинамических параметров не имеет определенного значения |
| Первое начало термодинамики | уравнение вида $\delta Q = \alpha E + \delta A$, количество теплоты, сообщенное системе, идет на изменение внутренней энергии и совершение системой работы над внешними телами |
| Теплоемкость | физическая величина, равная количеству теплоты, затрачиваемой на изменение температуры на один градус Кельвина |
| Изопроцессы | процессы идеальных газов, в которых хотя бы один из термодинамических параметров в состоянии системы не изменяется со временем, масса газа остается постоянной |
| Адиабатический процесс | процесс идеальных газов, протекающий без теплообмена с внешней средой |
| Обратимые процессы | процессы, которые могут быть проведены в обратном направлении таким образом, что система будет проходить через те же промежуточные состояния, что и при прямом ходе |
| Цикл Карно | цикл, состоящий из двух адиабатических процессов |
| Второе начало термодинамики | положение, устанавливающее направление течения и характер процессов, происходящих в природе |
| Энтропия | функция состояния системы, дифференциалом которой является отношение количества теплоты, сообщаемого телу на бесконечно малом участке процесса к температуре теплоотдающего тела |
| Теорема Клаузиуса | сумма приведенной теплоты при переходе идеального газа из одного состояния в другое не зависит от пути перехода |
| Уравнение Ван-дер-Ваальса | уравнение состояния реального газа, учитывающее с помощью поправок собственный объем молекул газа и силы межмолекулярного взаимодействия |
| Критическая температура | температура, зависящая от параметров реального газа, |

| | |
|---|--|
| | при которой уравнение Ван-дер-Ваальса имеет одно действительное решение, что свидетельствует о том, что реальный газ близок к идеальному газу. |
| Уравнение Клапейрона-Клаузиуса | уравнение, позволяющее рассчитать кривые равновесия двух фаз одного и того же вещества |
| Колебания | процессы, отличающиеся той или иной степенью повторяемости |
| Собственные или свободные колебания | колебания, которые совершает система после того, как ее выведут из состояния равновесия и предоставят самой себе |
| Гармонические колебания | периодический процесс, при котором смещение колеблющегося тела происходит по закону синуса или косинуса |
| Свойство гармонических колебаний | период колебаний не зависит от амплитуды |
| Гармонический осциллятор | система, в которой могут возбуждаться гармонические колебания |
| Амплитуда колебаний | наибольшее отклонение колеблющейся величины от положения равновесия |
| Биеения | гармонические колебания с пульсирующей амплитудой |
| Спектр колебания | представление сложного колебания в виде составляющих его гармонических колебаний |
| Собственная частота | частота, с которой совершаются свободные колебания в отсутствии сопротивления |
| Вынужденные колебания | колебания, происходящие под действием внешней силы |
| Резонанс | явление возрастания амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты вынуждающей силы к некоторой определенной для данной системы частоты |
| Резонансная кривая | график зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы |
| Волна | процесс распространения колебаний в пространстве |
| Волновая поверхность | геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе |
| Длина волны | расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний |
| Волновое число | величина, равная отношению 2π к длине волны |
| Плотность потока энергии (вектор Умова) | векторная величина, численно равная потоку энергии через единичную площадку, перпендикулярную к направлению, в котором переносится энергия |
| Интенсивность волны | среднее во времени значение плотности потока энергии, переносимой волной |
| Когерентные волны | волны, обладающие постоянной разностью фаз |
| Интерференция | явление усиления результирующих колебаний в одних точках пространства и ослабления в других, возникающее при сложении когерентных волн |
| Стоячая волна | волна, образующаяся в результате наложения двух встречных плоских волн, имеющих одинаковые амплитуды и частоты |

| | |
|--|---|
| Пучность стоячей волны | точка, где амплитуда стоячей волны достигает максимального значения |
| Звуковые волны (звук) | упругие волны, обладающие частотами в пределах 16-20000 Гц |
| Бел | единица уровня громкости |
| Эффект Доплера | явление изменения частот колебаний, воспринимаемых приемником, при движении источника этих колебаний и приемника друг относительно друга |
| Вектор Пойнтинга | вектор плотности потока электромагнитной энергии |
| Луч | линия, вдоль которой распространяется энергия световой волны |
| Световой поток | поток световой энергии, оцениваемый по зрительному ощущению |
| Освещенность | величина, равная отношению светового потока, падающая на поверхность, к площади этой поверхности |
| Светимость | величина, равная отношению светового потока, испускаемого поверхностью источника по всем направлениям, к площади этой поверхности |
| Яркость | величина, равная отношению силы света светящейся поверхности в данном направлении к площади проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную данному направлению |
| Закон прямолинейного распространения света | в однородной среде свет распространяется прямолинейно |
| Угол падения | угол между падающим лучом и нормалью к поверхности раздела двух сред в точке падения |
| Угол отражения | угол между отраженным лучом и нормалью к поверхности раздела двух сред в точке падения |
| Угол преломления | угол между преломленным лучом и нормалью к поверхности раздела двух сред в точке падения |
| Принцип Гюйгенса | все точки поверхности, через которую проходит фронт волны в момент времени t , можно рассматривать как источники вторичных волн, а положение второго фронта в момент времени $t + \Delta t$ совпадают с поверхностью, огибающей все вторичные волны |
| Когерентность | согласованное протекание нескольких колебательных или волновых процессов |
| Монохроматическая волна | волна одной определенной и постоянной частоты |
| Дифракция света | совокупность явлений, которые обусловлены волновой природой света и наблюдаются при распространении света в среде с резкими неоднородностями |
| Дифракция Фраунгофера | дифракция в параллельных лучах |
| Закон Френеля | зоны на волновой поверхности построены так, что расстояния от краев каждой зоны до точки, в которой определяется амплитуда колебаний, отличаются друг от друга на λ (λ – длина волны в той среде, в которой распространяется волна) |
| Дифракционная решетка | совокупность большого числа одинаковых, отстоящих друг от друга на одно и то же расстояние щелей |
| Критерий Рэлея | изображение двух одинаковых точечных источников или |

| | |
|---|--|
| | двух спектральных линий разрешимы (разделены для восприятия), если центральный максимум дифракционной картины от одного источника (линии) совпадает с первым минимумом дифракционной картины от другого |
| Голография | особый способ фиксирования и последующего восстановления структуры световой волны, отраженной предметом, основанный на регистрации интерференционной картины |
| Дисперсия света | явления, обусловленные зависимостью показателя преломления вещества от длины световой волны |
| Поляризованный свет | свет, в котором направление колебаний упорядоченно каким-либо образом |
| Поляризатор | прибор, который преобразует естественный свет в плоскополяризованный |
| Степень поляризации величина, равная: | $P = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$, где I_{\max} и I_{\min} – соответственно максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света, пропускаемого поляризатором. |
| Угол Брюстера | угол падения, при котором отраженный луч становится плоскополяризованным |
| Обыкновенный луч | один из преломленных лучей при двойном лучепреломлении, поведение которого подчиняется закону преломления |
| Необыкновенный луч | преломленный луч, образующийся при двойном лучепреломлении, поведение которого не подчиняется закону преломления |
| | |
| Электрический заряд | физическая величина, определяющая интенсивность электромагнитного взаимодействия частиц |
| Электрически изолированная система | система, через границу которой не могут проникать заряженные частицы |
| Закон сохранения электрического заряда | суммарный заряд электрически изолированной системы не может изменяться |
| Точечный заряд | заряженное тело, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстояниями от этого тела до других тел, несущих электрический заряд |
| Закон Кулона | сила взаимодействия F двух неподвижных точечных зарядов пропорциональна величине каждого из зарядов q_1 и q_2 и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними r : $F = k (q_1 q_2) / r^2$ |
| Напряженность электрического поля в данной точке | векторная величина, характеризующая электрическое поле, равная силе, действующей на единичный неподвижный точечный заряд, находящийся в данной точке поля. |
| Принцип суперпозиции (наложения) электрических полей | напряженность поля системы зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, которые создавал бы каждый из зарядов в отдельности |
| Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме | поток вектора E через произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, которые она охватывает, деленной на ϵ_0 : |

| | |
|---|--|
| Потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов | $W_p = k (q_1 \cdot q_2) / r$ |
| Потенциал в данной точке электрического поля | скалярная величина, равная потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещенного в этой точке: $\varphi = W_p / q$ |
| Электростатическая индукция | возникновение собственного электрического поля в веществе в результате смещения его положительных и отрицательных зарядов в разные стороны под действием внешнего электрического поля |
| Электрический момент диполя | векторная величина, численно равная произведению заряда на расстояние между зарядами, направленная по радиус-вектору, произведенному от отрицательного заряда диполя к положительному |
| Теорема Гаусса для вектора D | поток вектора электрической индукции сквозь замкнутую поверхность равен сумме свободных зарядов, охваченных этой поверхностью |
| Электрическая емкость | характеристика способности тела, будучи заряженным, создавать в пространстве электрическое поле |
| Энергия заряженного конденсатора | работа, которую необходимо совершить, чтобы зарядить конденсатор: $W = C \cdot \varphi^2 / 2 = q \cdot \varphi / 2 = q^2 / 2C$ |
| Электрический ток | упорядоченное движение электрических зарядов |
| Сила тока | количественная характеристика электрического тока, определяемая величиной заряда, переносимого через рассматриваемую поверхность в единицу времени: $I = dq/dt$ |
| Электродвижущая сила (э.д.с.) | величина, характеризующая сторонние силы, равная работе сторонних сил над перемещающимся единичным положительным зарядом: $E = A / q$ |
| Закон Ома | сила тока, текущего по однородному (в смысле отсутствия сторонних сил) проводнику, пропорциональна падению напряжения на проводнике: $I = U/R$ |
| Работа электрического тока на участке цепи с электрическим сопротивлением R за время dt | скалярная величина, равная $dA = I^2 R dt$ |
| Первое правило Кирхгофа | в каждой точке разветвления проводов алгебраическая сумма сил токов равна нулю; токи, идущие к точке разветвления, и точки, исходящие из нее, следует считать величинами разных знаков |
| Второе правило Кирхгофа | сумма электродвижущих сил, действующих в произвольном замкнутом контуре, состоящем из проводов, равна сумме произведений сил токов в отдельных участках этого контура на их сопротивления: $\sum \varepsilon_i = \sum I_i R_i$ |
| Закон Био-Савара-Лапласа | магнитная индукция поля dB, создаваемая элементом длины dl проводника с током I в некоторой точке, определяемой радиусом – вектором r, проведенным из элемента dl. |

| | |
|---|---|
| Магнетик | вещество, способное намагничиваться под действием магнитного поля |
| Намагниченность J | характеристика намагничения магнетика, равная магнитному моменту единицы объема |
| Магнитная проницаемость вещества μ | величина, показывающая во сколько раз увеличивается индукция магнитного поля макротоков при заполнении пространства магнетиком (т.е. за счет поля молекулярных токов среды) |
| Напряженность магнитного поля | характеристика магнитного поля макротоков, $H = B/\mu_0 - J = B/\mu \cdot \mu_0$ |
| Закон Ампера | сила, действующая на элемент длины dl проводника с током I , помещенный в магнитное поле с магнитной индукцией B , равна $dF = I [dlB]$ |
| Магнитная сила | сила, действующая на заряд q , движущийся со скоростью v в магнитном поле с индукцией B : $F = q[vB]$ |
| Сила Лоренца | резльтирующая сила, действующая на заряд q , движущийся со скоростью v , со стороны магнитного поля с индукцией B и электрического поля с напряженностью E : $F = qE + q[vB]$ |
| Электромагнитная индукция | явление, при котором в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток |
| Закон электромагнитной индукции Фарадея | э.д.с. электромагнитной индукции в контуре не зависит от способа изменения магнитного потока и численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром: $E_i = - d\Phi/dt$ |
| Индуктивность контура L | коэффициент пропорциональности между магнитным потоком и током $\Phi = L \cdot I$ |
| Э.д.с. самоиндукции | величина, пропорциональная и противоположная по знаку скорости изменения силы тока в контуре: $E_i = - L (dI/dt)$ |
| Энергия магнитного поля | величина, равная работе, которая затрачивается током на создание этого поля: $W = (L \cdot I^2)/2$ |
| Общая формулировка закона электромагнитной индукции | всякое изменение магнитного поля во времени возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле; циркуляция вектора напряженности E_B этого поля по любому неподвижному замкнутому контуру L численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром |
| Электромагнитная волна | взаимосвязанное распространение в пространстве изменяющихся электрического и магнитного полей |
| Колебательный контур | электрическая цепь, содержащая индуктивность и емкость, в которой могут возникать свободные электромагнитные колебания |
| Формула Томсона для периода колебаний | $T = 2\pi\sqrt{LC}$ |
| Переменный ток | электрический ток, сила или направление которого (или |

| | |
|--|--|
| | то и другое вместе) изменяется во времени |
| Полное электрическое сопротивление или импеданс | $Z = \sqrt{R^2 + [\omega \cdot L - 1/(\omega \cdot C)]^2}$ |
| Мгновенная мощность переменного тока | произведение мгновенных значений напряжения и силы тока $P(t) = U(t) \cdot I(t)$ |
| Тепловое излучение | электромагнитное излучение, возникающее за счет энергии теплового движения атомов и молекул |
| Люминесценция | электромагнитное излучение, возбуждаемое за счет любого вида энергии, кроме внутренней, тепловой |
| Испускательная способность тела (спектральная плотность энергетической светимости) | поток энергии, испускаемый единицей поверхности тела в единичном интервале частот |
| Поглощательная способность тела | безразмерная величина $a_{\nu,T}$, показывающая, какая часть потока лучистой энергии $d\Phi_{\nu}$, падающего на единичную площадку поверхности тела в единичном интервале частот, будет поглощена телом $a_{\nu,T} = d\Phi_{\nu}' / d\Phi_{\nu}$, где $d\Phi_{\nu}'$ – поглощенный поток, $d\Phi_{\nu}$ – падающий поток |
| Абсолютно черное тело | тело, полностью поглощающее падающее на него излучение всех частот, т.е. тело, имеющее поглощательную способность $a_{\nu,T} = 1$ |
| Серое тело | тело, поглощательная способность которого меньше единицы, но одинакова для всех частот, т.е. $a_{\nu,T} = a_T = \text{const} < 1$ |
| Закон Кирхгофа | отношение испускательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела; оно является для всех тел одной и той же (универсальной) функцией частоты (длины волны) и температуры |
| Закон Стефана - Больцмана | энергетическая светимость абсолютно черного тела R^* - пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры $R^* = \sigma T^4$, где σ – постоянная величина |
| Закон смещения Вина | длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре равновесного излучения, обратно пропорциональна абсолютной температуре излучающего тела. $\lambda_m = b/T$, где b - постоянная величина, называемая постоянной Вина |
| Формула Рэлея - Джинса | $f(\nu, T) = (2\pi\nu^2/c^2) kT$, где $f(\nu, T)$ – функция Кирхгофа, ν – частота, c – скорость света в вакууме, k – постоянная Больцмана, T – температура. Сопоставляется с экспериментальными данными лишь при больших длинах волн |
| Квант | конечная порция энергии, излучаемая или поглощаемая веществом, величина, пропорциональна частоте излучения ν : $E = h\nu$, где h – постоянная Планка, равная $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с |
| Формула Планка | формула, определяющая функцию Кирхгофа |

| | |
|---------------------------------------|---|
| | $f(\nu, T) = (2\pi\nu^2/c^2) (h\nu / e^{h\nu/kT} - 1)$ |
| Внешний фотоэлектрический эффект | испускание электронов веществом под действием света |
| Формула Эйнштейна | формула, выражающая закон сохранения энергии при фотоэффекте $h\nu = \frac{1}{2} m v_m^2 + A$, где m – масса электрона, v_m – максимальная скорость вылетевшего электрона, A – работа выхода, ν – частота излучения |
| Фотон | квант электромагнитного излучения, нейтральная элементарная частица с нулевой массой и спином 1; переносчик электромагнитного взаимодействия между заряженными частицами |
| Обобщенная формула Бальмера | формула, описывающая спектр атома водорода $\nu = R (1/m^2 - 1/n^2)$, где ν – частота спектральной линии, m и n – целые числа, принимающие значение $m = 1, 2, \dots, 6$ (определяет серию линий), $n = m + 1, m + 2, \dots$ (определяет отдельные линии серий), R – константа Ридберга, равная $R = 3,29 \cdot 10^{-15} \text{ c}^{-1}$ |
| Первый постулат Бора | существование ряда стационарных состояний атома, соответствующих определенным значениям его внутренней энергии E . |
| Второй постулат Бора (правило частот) | излучения при переходе атома из одного стационарного состояния (E_1) в др. (E_2): $h\nu = (E_1 - E_2)/h$, где h – Планка постоянная. |
| Квантовые числа | целые или дробные числа, определяющие возможные дискретные значения физических величин, характеризующих квантовые системы (атомное ядро, атом, молекулу и др.) и отдельные элементарные частицы. |
| Волна де Бройля | проявление универсальной корпускулярно-волнового дуализма материи: любой «частице» с энергией E и импульсом p соответствует волна, называемая волной де Бройля, с длиной h/p и частотой $\nu = E/h$, где h – постоянная Планка. Волны де Бройля интерпретируются как волны вероятности; их существование, на которое указал Л. де Бройль в 1924, подтверждается, напр., дифракцией частиц. |
| Волновой пакет | суперпозиция волн, мало отличающихся друг от друга по частоте |
| Групповая скорость | скорость перемещения точки, в которой амплитуда волнового пакета максимальна |
| Волновая функция (пси – функция) | (вектор состояния), в квантовой механике основная величина, описывающая состояние системы и позволяющая находить вероятности и средние значения характеризующих ее физических величин. Квадрат модуля волновой функции равен вероятности данного состояния, поэтому волновую функцию называют также амплитудой вероятности |
| Условие нормировки волновой функции | интеграл квадрата модуля волновой функции ψ , взятый по всему пространству равен $\int \psi^* \psi dV = 1$ |
| Принцип суперпозиция волновых функций | если ψ_1 и ψ_2 – волновые функции, описывающие какие – то два состояния частицы, то всякая линейная |

| | |
|---|--|
| | комбинация этих функций $C_1\psi_1 + C_2\psi_2$ представляет так же волновую функцию той же частицы, описывающую какое – то ее состояние (C_1 и C_2 произвольные комплексные числа) |
| Соотношение неопределенностей Гейзенберга | микрочастица не может иметь одновременно и определенную координату (x,y,z) и определенную соответствующую проекцию импульса (p_x, p_y, p_z), причем неопределенности этих величин удовлетворяют условиям $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar$, $\Delta y \Delta p_y \geq \hbar$, $\Delta z \Delta p_z \geq \hbar$ |
| Уравнение Шредингера | основное уравнение нерелятивистской квантовой механики, которое определяет волновую функцию ψ частицы в силовом поле, и описывается функцией $U(x,y,z,t)$ $-\hbar^2/2m \Delta \psi + U \psi = i\hbar (d \psi / dt)$, где m – масса частицы, i – мнимая единица, Δ – оператор Лапласа |
| Уравнение Шредингера для стационарных состояний | уравнение Шредингера в случае стационарного силового поля $U(x,y,z)$ $\Delta \psi + (2m/\hbar^2)(E-U) \psi = 0$ где E – полная энергия частицы |
| Орбитальное квантовое число l | целое число, которое при заданном главном квантовом числе n принимает значения $l=0,1,...(n-1)$ и определяет момент импульса в атоме |
| Магнитное квантовое число m_l | целое число, которое при заданном l может принимать значения $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$, и определяет проекцию момента импульса электрона на некоторое направление |
| Спин | собственный момент количества движения микрочастицы, имеющий квантовую природу и не связанный с движением частицы как целого; измеряется в единицах Планка постоянной \hbar и может быть целым (0, 1, 2,...) или полуцелым ($1/2, 3/2, \dots$) |
| Магнитное спиновое квантовое число | определяет проекцию спина на направление внешнего магнитного поля |
| Принцип Паули | фундаментальный закон природы, согласно которому в квантовой системе две (или более) тождественные частицы с полуцелым спином не могут одновременно находиться в одном и том же состоянии |
| Атомная единица массы (а.е.м.) | единица измерения массы, принятая в ядерной физике, $1 \text{ а.е.м.} \sim 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ |
| Дефект массы ядра | величина, характеризующая уменьшение суммарной массы при образовании ядра из составляющих его нуклонов |
| Радиоактивность | самопроизвольное превращение одних атомных ядер в другие, сопровождаемое испусканием элементарных частиц |
| Постоянная распада | характерная для данного радиоактивного вещества константа, равная вероятности распада ядра за единицу времени |
| Период полураспада | время, за которое распадается половина первоначального количества ядер |

| | |
|-------------------------------------|---|
| Активность радиоактивного препарата | число распадов, происходящих в препарате за единицу времени |
| Ядерная реакция | процесс сильного взаимодействия атомного ядра с элементарной частицей или с другим ядром, приводящий к преобразованию ядра (или ядер) |

Карта учебно-методической обеспеченности дисциплины

| Ф.И.О. автора | Наименование учебно-методической литературы | Издательство, год издания | Количество экземпляров | |
|---|---|---|------------------------|--------|
| | | | в библ. | на каф |
| Основная литература | | | | |
| Калашников Н.П. , Смондырев М.А. | Основы физики | М., Дрофа., т.1-2, 2021. | | |
| Бодунов Е.Н., Никитченко В.И., Петухов А.М. | Базовый курс физики | СПб: 2020. – 319 с. | | |
| Савельев И.В. | Курс общей физики, т.1-3. 15-е изд | СПб: Лань, 2019. – 500 с. | + | + |
| Абельдина Ж.К. | Физика (учебно-методический комплекс дисциплины). | Астана: КазАТУ, - 2019. – 177 с. | + | + |
| Абельдина Ж.К | Практикум по физике | Нур-Султан: КазАТУ им. С. Сейфуллина, 2021. – 115 с. | + | + |
| Дополнительная литература | | | | |
| Под редакцией К.В. Показеева, Ж.К. Абельдиной, Д.М. Калмановой. | Физика (Задачи и примеры по физике для вузов агротехнического профиля). Часть I. Физические основы механики, молекулярная физика и термодинамика. | Астана: Изд-во КазАТУ им. С. Сейфуллина, 2017. – 120 с. | + | + |
| Под редакцией К.В. Показеева, Ж.К. Абельдиной, А. Мейрамбай. | Физика (Задачи и примеры по физике для вузов агротехнического профиля). Часть II. Электромагнетизм, колебания и волны. | Астана: Изд-во КазАТУ им. С. Сейфуллина, 2017. – 117 с. | + | + |

| | | | | |
|--|--|---|---|---|
| Под редакцией К.В. Показеева, Ж.К. Абельдиной, Е.Т. Акимбекова | Физика (Задачи и примеры по физике для вузов агротехнического профиля). Часть III. Волновая оптика, квантовая природа излучения. | Астана: Изд-во КазАТУ им. С. Сейфуллина, 2017. – 87с. | + | + |
| Ветрова В.Т. | Сборник задач по физике индивидуальными заданиями Учебное пособие для вузов. | Мн.: Выш.шк., 1991.-386 с. | + | + |
| Мукашева А.К. | Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Физика». ч.1-2. | Астана. 2015 с. | + | + |
| Трофимова Т.И. | Курс физики. | М.: Академия, 2016.–590 с. | + | |
| Савельев И.В. | Курс общей физики, т.1,2,3. | М.:Высшая школа, 2019. – 500 с. | + | + |
| <i>Электронная ссылка или электронная литература</i> | | | | |
| Трофимова Т.И. | Курс физики | [DJVU] – М.: Академия | www.twirpx.com > file. | |
| Грабовский Р.И. | Курс физики. | [DJVU] –СПб: Лань, | www.studmed.ru | |
| Чертова А. Г., Воробьев А.А | Задачник по физике], | [PDF] – М.: Академия | www.twirpx.com > file. | |
| | Виртуальные лабораторные работы по физике | | http://www.all-fizika.com/article/index.php . | |