

Учреждение образования
«Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина»

ФИЗИКА

*Электронный учебно-методический комплекс для студентов
обучающихся по специальностям
1-31 01 01 Биология (по направлениям)
1-33 01 01 Биоэкология*

Брест
БрГУ имени А. С. Пушкина
2020



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

[Начало](#)

[Содержание](#)



[Страница 1 из 319](#)

[Назад](#)

[На весь экран](#)

[Закрыть](#)

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я73

Составитель
кандидат педагогических наук, доцент

О. А. Котловский

Рецензенты
кафедра физики БрГТУ

зав. кафедрой общей и теоретической физики БрГУ имени А. С. Пушкина
кандидат физико-математических наук, доцент

А. В. Демидчик

Котловский, О. А.

Физика: учебно-методический комплекс для специальностей 1-31 01 01 Биология (по направлениям), 1-33 01 01 Биоэкология / Сост. О. А. Котловский [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые, граф., дан. (6,0 Мб). – Брест: БрГУ имени А. С. Пушкина, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Учебно-методический комплекс составлен в соответствии с учебной программой по курсу «Физика» и предназначен для студентов, обучающихся по специальностям «Биология» и «Биоэкология».

Учебно-методический комплекс содержит курс лекций, лабораторный практикум, вопросы к экзамену, глоссарий, список литературы для самостоятельной работы.

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я73

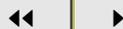
© УО «Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина», 2020



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 2 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
Содержание учебного материала	9
Курс лекций	14
Основы механики	14
Лекция 1. Предмет физики	14
Лекция 2. Основы кинематики	19
Лекция 3. Основы динамики	29
Лекция 4. Механика жидкостей и газов	47
Лекция 5. Механические колебания и волны	54
Основы молекулярной физики и термодинамики	65
Лекция 6. Основные положения молекулярно-кинетической теории	65
Лекция 7. Основы молекулярно-кинетической теории идеальных газов	72
Лекция 8. Основы термодинамики	80
Лекция 9. Реальные газы. Жидкости. Твердые тела	93
Электричество и магнетизм	104
Лекция 10. Основы электростатики	104
Лекция 11. Постоянный электрический ток	117
Лекция 12. Постоянное магнитное поле	126
Лекция 13. Электромагнетизм	137
Оптика	150
Лекция 14. Волновая оптика	150
Лекция 15. Геометрическая оптика	162
Основы специальной теории относительности	179
Лекция 16. Элементы специальной теории относительности и релятивистской динамики	179
Элементы квантовой оптики	188



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 3 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лекция 17. Квантовые свойства излучения	188
Основы атомной физики	197
Лекция 18. Строение атома	197
Основы ядерной физики	207
Лекция 19. Элементы физики атомного ядра	207
Лабораторный практикум	216
Лабораторная работа № 1. Изучение закономерностей равномерного и равноускоренного движения	225
Лабораторная работа № 2. Определение ускорения свободного падения	230
Лабораторная работа № 3. Определение скорости звука в воздухе	233
Лабораторная работа № 4. Определение вязкости жидкости методом Стокса	236
Лабораторная работа № 5. Изучение явления резонанса при вынужденных колебаниях	238
Лабораторная работа № 6. Изучение законов сухого трения с помощью наклонной плоскости	240
Лабораторная работа № 7. Определение числа Авогадро	245
Лабораторная работа № 8. Определение универсальной газовой постоянной	248
Лабораторная работа № 9. Определение эффективного диаметра молекул воздуха	250
Лабораторная работа № 10. Определение удельного заряда электрона	253
Лабораторная работа № 11. Определение неизвестного сопротивления проводников	257
Лабораторная работа № 12. Изучение электроизмерительных приборов	262
Лабораторная работа № 13. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли	266
Лабораторная работа № 14. Изучение контактных явлений в проводниках	270
Лабораторная работа № 15. Изучение тонких линз	273



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 4 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

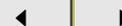
Лабораторная работа № 16. Измерение длины световой волны с помощью колец Ньютона	279
Лабораторная работа № 17. Определение показателя преломления стекла микроскопом	285
Лабораторная работа № 18. Проверка законов геометрической оптики с помощью диоптриметра	290
Лабораторная работа № 19. Измерение длины волны света методом дифракции на бесконечно узкой щели	293
Вопросы к экзамену	296
Основные математические понятия, используемые в данном курсе физики	299
Вопросы для самостоятельного контроля знаний	307
Глоссарий	311
Литература	319



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 5 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

ВВЕДЕНИЕ

Целью дисциплины является обеспечение фундаментальной и практической подготовки биологов в области физики.

Основными *задачами* являются: подготовка специалистов, владеющих знаниями о принципах и законах физики, об основных физических явлениях, методах их наблюдения и экспериментального исследования, формирование у студента определенных умений и навыков экспериментальной работы с использованием современной аппаратуры и информационных технологий.

В соответствии с образовательным стандартом к обучаемым предъявляются определенные требования к освоению учебной дисциплины. В результате изучения дисциплины обучаемый должен:

знать:

- основные принципы и закономерности физических явлений механики, термодинамики, электричества, магнетизма, колебаний и волн, оптики, атомной и ядерной физики, и их математическое выражение;
- основные современные физические модели и гипотезы, границы их применений;
- методы экспериментального исследования физических явлений, измерений физических величин, алгоритмы компьютерной обработки и анализа результатов эксперимента;

уметь:

- применять методы теоретического и экспериментального исследований физических закономерностей при изучении специальных биологических дисциплин «Биофизика», «Биохимия», «Молекулярная биология», «Высшая математика»;
- использовать методы и средства количественной оценки физических закономерностей в прикладных задачах по биологии;
- использовать фундаментальные законы физики и их проявления в биологических процессах и явлениях для решения конкретных задач в практической деятельности.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 6 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Изучение физики возможно только при наличии у студентов знаний по ряду разделов дисциплины «Высшая математика».

В результате изучения дисциплины студент должен приобрести знания для изучения последующих дисциплин – прикладная механика; аналитическая химия; физическая и коллоидная химия; защита населения и объектов от чрезвычайных ситуаций, радиационная безопасность.

Методы обучения – словесные (лекция, беседа, дискуссия), практические (решение задач) и наглядные (демонстрация поясняющих схем и графиков с использованием мультимедийных презентаций).

Формы обучения – лекции и лабораторные работы.

Лабораторные занятия предусматривают освоение техники выполнения физического эксперимента, методов получения из опыта физической информации и ее интерпретации, определения физических постоянных, получение навыков работы с измерительной аппаратурой, с основными принципами регистрации и автоматизированной обработки получаемой в процессе эксперимента информации и должны быть обеспечены общелабораторным и специальным оборудованием.

Дисциплина компонента учреждения высшего образования «Физика» для специальностей 1-31 01 01 Биология (научно-педагогическая деятельность), 1-33 01 01 Биоэкология изучается студентами *дневной* формы получения образования на 2-м курсе в 3-м семестре.

На изучение дисциплины отводится: общее количество часов – 188, из которых 84 часов аудиторных (32 – лекционных, 52 – лабораторных). Итоговый контроль знаний осуществляется на экзамене (третий семестр).

Дисциплина компонента учреждения высшего образования «Физика» для специальностей 1-31 01 01 Биология (по направлениям), 1-33 01 01 Биоэкология изучается студентами *заочной* формы получения образования на 2-м и 3-м курсах в 4-м и 5-м семестрах.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 7 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

На изучение дисциплины отводится: общее количество часов – 188, из которых 22 часа аудиторных (10 – лекционных, 12 – лабораторных):

- на 2-м курсе в 4-м семестре: 12 аудиторных (6 – лекционных, 6 – лабораторных);
- на 3-м курсе в 5-м семестре: 10 аудиторных (4 – лекционных, 6 – лабораторных).

Итоговый контроль знаний осуществляется на экзамене (пятый семестр).

Учебно-методический комплекс разработан в соответствии с образовательными стандартами ОСВО 1-31 01 01-2013, утв. Постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 30.08.2013 № 88; ОСВО 1-33 01 01-2013, утв. Постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 30.08.2013 № 88; учебными планами Б-50-19/уч., 1-31 01 01 Биология (по направлениям), специализация 1-31 01 01-02 01 Зоология, утв. 30.05.2019; Б-51-19/уч., 1-31 01 01 Биология (по направлениям), специализация 1-31 01 01-02 07 Генетика, утв. 30.05.2019; Б-52-19/уч., 1-33 01 01 Биоэкология, утв. 30.05.2019; учебной программой «Физика», регистр. № УД-28-008-17/уч. от 27.06.2017.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 8 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел 1. Введение.

Тема 1.1. Предмет физики

Предмет физики и методы физических исследований. Материя и движение. Пространство и время - основные формы существования материи. Связь физики с биологией и химией. Физические процессы в организме. Воздействие физических факторов на организм.

Раздел 2. Механика

Тема 2.1. Введение

Физические свойства и характеристики окружающей среды. Некоторые математические понятия и символы. Физические величины и их измерение. Единицы измерения физических величин. Система единиц СИ.

Тема 2.2. Кинематика

Материальная точка. Виды движений и их основные характеристики. Перемещение, траектория, путь, скорость, ускорение. Линейная и угловая скорость. Период.

Тема 2.3. Основные законы динамики

Масса. Законы Ньютона. Силы в механике: гравитационные, упругости, трения, инерции. Инерциальные и неинерциальные системы отсчета. Физические и биологические вопросы, связанные с неинерциальными системами отсчета. Силы, возникающие при криволинейном движении. Невесомость и перегрузки. Движение тела человека в условиях невесомости. Центрифугирование. Вестибулярный аппарат, как физическая инерциальная система отсчета. Искусственная гравитация. Работа силы. Консервативные и неконсервативные силы. Кинетическая и потенциальная энергия. Закон сохранения энергии. Работа и мощность человека.

Тема 2.4. Механика жидкостей и газов

Законы Паскаля и Архимеда. Движение жидкостей и газов. Стационарное течение. Условие непрерывности потока. Уравнение: Бернулли и его применение. Из-



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 9 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

мерение скорости потока. Водоструйный насос. Подъемная сила крыла. Движение крови в сосудах. Физические принципы определения давления и скорости движения крови.

Тема 2.5. Колебания

Основные характеристики колебательного движения. Гармонические колебания. Математический и физический маятники. Собственные и вынужденные колебания. Резонанс. Природа звука.

Тема 2.6. Волны

Физические основы речи и слуха человека. Характеристики слухового ощущения и их связь с физическими характеристиками звука. Инфразвук и ультразвук. Действие инфразвука и ультразвука на биологические объекты. Медико-биологическое использование ультразвука.

Раздел 3. Молекулярная физика и термодинамика

Тема 3.1. Введение

Предмет молекулярной физики. Размеры и масса атомов и молекул. Агрегатные состояния вещества.

Тема 3.2. Состояние вещества

Состояние вещества. Термодинамические параметры. Равновесные процессы для идеального газа. Уравнение состояния идеального газа.

Тема 3.3. Основы молекулярно-кинетической теории идеальных газов

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории. Температура. Статистический и термодинамический методы в физике. Распределение Больцмана. Барометрическая формула. Среднее число столкновений. Средняя длина свободного пробега. Явления переноса. Диффузия. Вязкость. Теплопроводность. Связь между коэффициентами диффузии, вязкости и теплопроводности. Диффузионные процессы в биологии.

Тема 3.4. Первое начало термодинамики



***Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин***

Начало

Содержание



Страница 10 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Внутренняя энергия. Распределение энергии по степеням свободы. Теплота и работа. Первое начало термодинамики. Теплоемкость газов. Работа и теплоемкость газов в различных изопроцессах. Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона.

Тема 3.5. Второе начало термодинамики

Обратимые и необратимые процессы. Циклические процессы. Понятие об энтропии. Второе начало термодинамики. Энтропия биологических систем.

Тема 3.6. Реальные газы. Жидкости. Твердые тела

Силы молекулярного взаимодействия. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Жидкости. Особенности жидкого состояния. Ближний и дальний порядок. Коэффициент поверхностного натяжения. Смачивание. Капиллярные явления и их роль в биологических системах. Растворы. Осмос и его проявления. Твердые тела. Кристаллическое строение твердых тел.

Раздел 4. Электричество и магнетизм

Тема 4.1 Введение

Электризация. Электрический заряд. Электрическое поле и его основные характеристики. Закон сохранения заряда.

Тема 4.2. Постоянное электрическое поле

Электростатическое поле в вакууме. Закон Кулона. Напряженность электростатического поля. Принцип суперпозиции электростатических полей. Линии вектора напряженности. Поток вектора напряженности. Теорема Гаусса. Потенциал. Разность потенциалов. Эквипотенциальные поверхности. Связь между потенциалом и напряженностью.

Тема 4.3 Электростатическое поле при наличии проводников и диэлектриков

Распределение зарядов на поверхности проводника. Электростатическая защита. Конденсаторы. Энергия электростатического поля. Электростатическое поле при наличии диэлектриков. Поляризация диэлектрика. Диэлектрическая проницаемость.



***Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин***

Начало

Содержание



Страница 11 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Сегнетоэлектрики. Электрические явления в природе. Биологическое действие электростатического поля. Электростатическая защита. Заземление.

Тема 4.4. Постоянный электрический ток

Постоянный электрический ток. Сила и плотность тока. Электродвижущая сила. Законы постоянного тока. Сопротивление проводников. Работа и мощность постоянного тока. Тепловое действие тока. Электрический ток в жидкостях и газах. Проводимость биологических тканей и жидкостей. Действие электрического тока на живой организм. Ионизация молекул. Плазма и ее использование в химии. Электрокинетические явления (электрофорез, электроосмос).

Тема 4.5. Постоянное магнитное поле. Магнитное поле в веществе

Постоянное магнитное поле. Индукция магнитного поля. Закон Био-Савара-Лапласа. Сила Ампера. Сила Лоренца. Магнитное поле в веществе. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Ферромагнетизм. Геомагнитное поле и его влияние на биосистемы. Электромагнитная индукция. Закон электромагнитной индукции Фарадея. Правило Ленца. Самоиндукция. Индуктивность.

Тема 4.6. Электромагнитные колебания и волны

Переменный ток. Получение синусоидального переменного тока. Действие переменного тока на организм. Электромагнитные волны. Шкала электромагнитных волн. Электромагнитная природа света. Защита от электромагнитного излучения. Микроволновая терапия. Физические основы электрокардиографии.

Раздел 5. Оптика

Тема 5.1 Волновая оптика

Развитие представлений о природе света. Интерференция и дифракция света. Дифракционная решетка. Поляризация света. Оптически-активные вещества. Поляриметрия. Исследование биологических систем в поляризованном свете. Дисперсия света. Поглощение и рассеяние света. Рассеяние света в атмосфере.

Тема 5.2 Геометрическая оптика



***Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин***

Начало

Содержание



Страница 12 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Отражение и преломление света. Световоды. Тонкие линзы. Оптическая сила линз. Недостатки линз. Оптическая система глаза. Недостатки оптической системы глаза и их исправление.

Раздел 6. Основы специальной теории относительности

Тема 6.1 Элементы специальной теории относительности и релятивистской механики

Представления о свойствах пространства и времени в классической механике. Принцип относительности. Опыты Майкельсона – Морли. Постулаты СТО. Преобразование Лоренца. Элементы релятивистской динамики.

Раздел 7. Элементы квантовой оптики

Тема 7.1 Квантовые свойства излучения

Тепловое излучение. Абсолютно черное тело. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела. Формула Планка. Фотон. Энергия, импульс, масса фотона. Фотоэлектрический эффект. Уравнение Эйнштейна. Фотобиологические явления. Люминесценция. Источники теплового излучения в медицине.

Раздел 8. Строение атома и атомного ядра

Тема 8.1. Основы теории атома

Строение атомов. Постулаты Бора. Спектры атомов. Излучение возбужденных атомов. Рентгеновское излучение и его природа. Биологическое действие рентгеновского излучения. Рентгенодиагностика. Гипотеза де Бройля. Опыты по дифракции электронов. Волновая функция и ее статистический смысл. Принцип работы электронного микроскопа. Лазеры и их использование в биологии.

Тема 8.2. Элементы физики атомного ядра

Строение атомного ядра. Нуклоны. Энергия связи нуклонов. Радиоактивность. Естественный радиоактивный фон. Техногенный фон. Виды радиоактивного излучения. Действие радиоактивного излучения на биологические системы. Ядерные и термоядерные реакции.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 13 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

КУРС ЛЕКЦИЙ

ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

Лекция 1. Предмет физики

Предмет физики и методы физических исследований. Материя и движение. Пространство и время – основные формы существования материи. Связь физики с биологией и химией. Физические процессы в организме. Воздействие физических факторов на организм. Физические свойства и характеристики окружающей среды. Физические величины и их измерение. Единицы измерения физических величин. Система единиц СИ.

Литература: [1, с. 5–8], [2, с. 4–5].

Греческое слово «физика» означает наука о природе. Физика – наука, изучающая простейшие и вместе с тем наиболее общие свойства материального мира и объясняющая на основе выявленных закономерностей конкретные явления, происходящие в природе.

Физика исследует свойства твердых тел, жидкостей, газов, плазмы, отдельных молекул, атомов, атомных ядер, элементарных частиц, а также изучает электромагнитные и гравитационные поля. Помимо этого, физика рассматривает различные виды движения материи: механическое движение, колебания и волны различного рода, тепловое движение, распространение полей. Таким образом, все объекты природы, изучаемые физикой, подразделяют на вещественные объекты и силовые поля.

Вещество – вид материи, имеющий дискретную структуру, обладающий массой (массой покоя) и образующий элементарные частицы (электроны, протоны, нейтроны и др.) и состоящие из них атомы, молекулы и физические тела.

Физическое (силовое) поле – вид материи, характеризующийся непрерывным распределением в пространстве, не обладающий массой покоя и являющийся перенос-



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 14 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

чиком того или иного вида взаимодействия между частицами вещества или состоящими из них физическими телами.

Физическое тело – это любое материальное тело, состоящее из огромного числа молекул или атомов, которое можно выделить в пространстве и идентифицировать как единое целое.

Все физические тела существуют в пространстве и времени. Строго определенное пространство и времени не существует. Под *физическим пространством* понимается вмещательность всех тел природы, которое позволяет им существовать в виде отдельных объектов, занимающих определенное положение и имеющие определенную протяженность и форму. Физическое пространство обладает следующими основными свойствами: трехмерностью, непрерывностью, однородностью и изотропностью.

Трехмерность пространства означает, что для однозначного задания любого положения точки в нем вполне достаточно трех чисел (координат).

Непрерывность пространства означает, что оно бесконечно делимо: не существует такого расстояния, меньше которого уже нет.

Однородность пространства означает, что его свойства одинаковы во всех его областях, и любые процессы, где бы в пространстве они ни происходили, будут протекать (в тех же условиях) одинаковым образом.

Изотропность пространства означает эквивалентность в нем всех направлений и, как следствие, независимость процессов, протекающих в физических телах и их системах (в одинаковых условиях), от их ориентации.

Время – это периодический (повторяющийся) процесс – ход часов, позволяющим установить последовательность смены различных состояний материи и происходящих в ней явлений, а также длительность их бытия. Без понятия времени нельзя было бы говорить о движении как изменении.

Время обладает следующими основными свойствами: одномерностью и односторонностью, непрерывностью, однородностью.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 15 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Одномерность и однонаправленность времени означают, что во времени нельзя двигаться, например, «вперед – назад» и «направо – налево», а только от прошлого к настоящему и через него – к будущему.

Непрерывность времени означает, что оно бесконечно делимо, т. е. не существует таких промежутков времени, меньше которых уже нет.

Однородность времени означает, что все моменты времени эквивалентны, и один и тот же процесс теперь протекает точно так же, как он протекал (в тех же условиях) миллионы лет назад.

Изучаемые физикой наиболее общие свойства материального мира содержатся во всех более сложных формах материи, изучаемых другими науками (в частности химией и биологией). Например, процессы жизнедеятельности организмов, изучаемые биологией, всегда сопровождаются механическими, электрическими, внутриатомными и другими физическими процессами. Теоретическую основу химии составляет один из разделов физики – квантовая механика, с помощью которой изучаются атомы и молекулы, раскрыта природа химической реакции. Биология и химия широко используют физические методы исследования (рентгеноструктурный и спектральный анализ, метод магнитного резонанса и т. д.) и физическую аппаратуру (например, электронный микроскоп). Эти науки имеют специальные физические разделы физическая химия и биофизика. Можно утверждать, что физика является фундаментом, на котором строятся химия и биология. Важная роль физики в понимании биосферы как целостной динамической системы определяется следующими обстоятельствами:

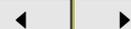
- земля, вода, воздух и т. д., входящие в биосферу Земли, являются объектами изучения физики и других естественных наук;
- многие процессы, протекающие в биосфере, и их устойчивость зависят от физических свойств этих объектов, а также физических свойств других компонентов биосферы;
- в биосфере в тесной связи с биологическими и другими процессами протекают и физические.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 16 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Физические факторы оказывают значительное воздействие на биосферу. Это связано с изменением физических, температурно-энергетических, волновых и радиационных параметров окружающей среды. В современной экологической науке даже выделяют виды физического загрязнения, к которым относятся: радиоактивное, тепловое, шумовое, электромагнитное.

Большинство физических законов представляется в виде формул, связывающих численные значения различных физических величин (характеристики процессов или особенностей тел и полей, которые могут быть определены количественно). Для получения этих значений необходимо измерять физические величины. *Измерение физической величины* сводится к сравнению ее с однородной физической величиной, принятой за единицу измерения. Для каждой физической величины единицу измерения можно выбирать совершенно произвольно, независимо от других величин. Однако на практике в целях удобства поступают иначе. Произвольно выбирают единицы измерения только для нескольких физических величин. Эти величины и их единицы измерения называют *основными*. Единицы измерения всех остальных физических величин устанавливают на основании законов (формул), связывающих эти величины с основными. Такие величины и их единицы измерения называют *производными*. Например, на основании известной формулы для скорости равномерного прямолинейного движения:

$$v = \frac{s}{t} \quad (1.1)$$

где s – путь (измеряется в метрах – м), t – время (измеряется в секундах – с), скорость будет измеряться в – м/с.

Совокупность всех основных и производных единиц измерения физических величин называют *системой единиц*. Наиболее распространенной, в настоящее время, является Международная система единиц – СИ (система интернациональная). Основными физическими величинами и единицами их измерения в СИ являются: длина – метр (м), масса – килограмм (кг), время – секунда (с), термодинамическая



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 17 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

температура – кельвин (К), сила тока – ампер (А), сила света – кандела (кд) и количество вещества – моль (моль). Наряду с СИ применялись и применяются другие системы единиц. Например: физическая система (СГС), основными единицами которой являются сантиметр (см), грамм (г) и секунда (с); система Гаусса, основными единицами которой являются миллиметр, миллиграмм, секунда; МКС – метр, килограмм, секунда и т. д.

Наряду с основными (и производными) единицами измерения физических величин применяются кратные единицы, образующиеся путем умножения первых на 10^n :

Таблица 1.1. Кратные единицы измерения

Кратные единицы					
Наименование приставки	Множитель	Обозначение	Наименование приставки	Множитель	Обозначение
Тера	10^{12}	Т	Деци	10^{-1}	д
Гига	10^9	Г	Санتي	10^{-2}	с
Мега	10^6	М	Милли	10^{-3}	м
Кило	10^3	к	Микро	10^{-6}	мк
Гекто	10^2	г	Нано	10^{-9}	н
Дека	10^1	да	Пико	10^{-12}	п

То есть к названию единицы измерения добавляют соответствующую приставку. Например: 1 микрометр = 10^{-6} м.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание

◀ ▶

◀◀ ▶▶

Страница 18 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лекция 2. Основы кинематики

Виды механических движений. Материальная точка. Перемещение, траектория, путь, скорость, ускорение. Линейная и угловая скорость. Период.

Литература: [1, с. 19–23], [2, с. 8–15].

Механика – наука, изучающая закономерности механического движения и причины, вызывающие такое движение. *Механическое движение* – это простейший вид движения материи, представляющее собой перемещение в пространстве тел или их частей относительно друг друга.

Различают три вида механического движения тел – поступательное, вращательное и колебательное. При *поступательном* движении твердого тела все его точки описывают совершенно одинаковые (при наложении совпадающие) линии и имеют одинаковую скорость и одинаковое ускорение (в данный момент времени). Определение вращательного и колебательного движения тела будет дано в следующих разделах.

Кинематика (от греческого «кинематос» – движение) – раздел механики, в котором используется лишь математическое описание механического движения физических тел, без выяснения причин, почему они так движутся.

Материальная точка – тело, формой и размерами которого можно пренебречь в данной задаче. Материальная точка это одна из абстрактных моделей, используемых в физике. Материальная точка имеет массу равную массе тела моделью которого она является. Положение материальной точки в пространстве определяется как положение геометрической точки. Одно и то же тело в одних случаях можно считать материальной точкой, в других нет. Например, изучая движение Земли вокруг Солнца, можно и Землю, и Солнце считать материальными точками. Изучая же движение Земли вокруг своей оси, нельзя принимать Землю за материальную



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 19 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

точку, так как на характер движения Земли существенно влияют ее форма и размеры. Движение тела можно рассматривать только относительно какого-либо другого тела. Такое тело относительно, которого рассматривается положение, и движение других тел называется *телом отсчета*. С телом отсчета связывают систему координат. Такой системой отсчета может служить, например, прямоугольная система координат XYZ, связанная с какой-нибудь точкой O тела отсчета, которую называют точкой отсчета (рисунок 2.1).

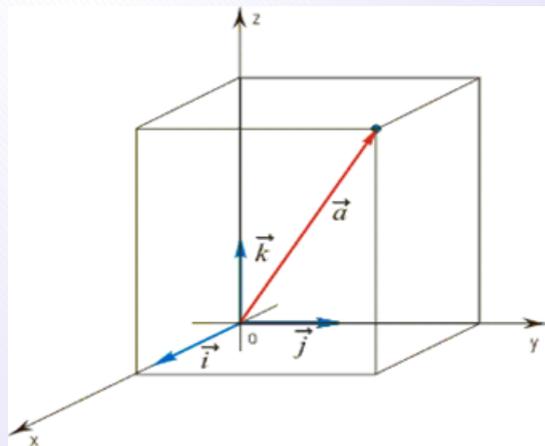


Рисунок 2.1

Тогда положение материальной точки в любой момент времени определяется расстояниями ее от трех координатных плоскостей (x , y , z) или радиус-вектором (вектор, начало которого совмещено с точкой отсчета, а конец с данной точкой, на рисунке вектор \vec{a}). Совокупность тела отсчета, жестко связанной с ним системой координат и часов для отсчета времени составляют *систему отсчета*. Систем отсчета существует бесчисленное множество.

Линия, описываемая движущейся материальной точкой, называется *траекторией*.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 20 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Пусть некая материальная точка, двигаясь по криволинейной траектории за некоторый промежуток времени Δt переместилась из точки А в точку В (рисунок 2.2).

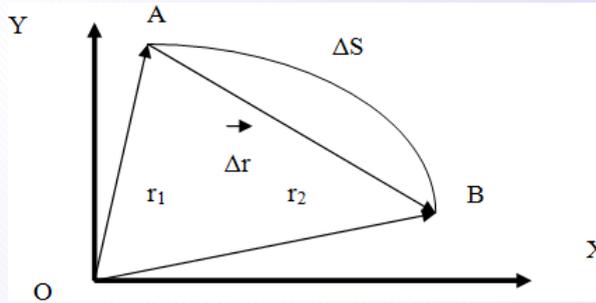


Рисунок 2.2

Длина Δs участка траектории между точками А и В представляет из себя *путь* пройденный телом за промежуток времени Δt . А направленный отрезок прямой (вектор $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$, равный изменению радиус вектора \vec{r}) соединяющий между собой точки А и В (начальное и конечное положение материальной точки) это *перемещение*, совершенное материальной точкой за промежуток времени Δt .

Единица измерения времени системе СИ – с (секунда). Единица времени *секунда* – время, равное 9192631770 периодам излучения, соответствующего энергетическому переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия Cs_{55}^{133} .

Таблица 2.1. Приближенные значения некоторых временных интервалов

Временной интервал	Числовое значение, с
Возраст Вселенной	$4,4 \cdot 10^{17}$
Возраст Земли	$1,3 \cdot 10^{17}$
Продолжительность человеческой жизни (70 лет)	$2,2 \cdot 10^9$



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 21 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Один год	$3,2 \cdot 10^7$
Один день	$8,6 \cdot 10^4$

Единица измерения пути и перемещения в системе СИ – м (метр). Один метр – длина, равная 1650763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86.

Таблица 2.2. Приближенные значения размеров некоторых объектов

Размер объекта	Числовое значение, м
Радиус видимой Вселенной	$1 \cdot 10^{26}$
Радиус Солнечной системы	$1 \cdot 10^{13}$
Расстояние между Землей и Солнцем	$1,5 \cdot 10^{11}$
Средний радиус Земли	$6,4 \cdot 10^6$
Небоскреб «Бурдж-Халифа»	$8,3 \cdot 10^2$
Рекордная высота секвойи	$9,5 \cdot 10^1$
Частичка пыли	$1 \cdot 10^{-4}$
Биологическая клетка	$1 \cdot 10^{-5}$
Вирус гриппа	$1 \cdot 10^{-7}$
Молекула воды	$3 \cdot 10^{-10}$
Атом водорода	$1 \cdot 10^{-10}$

Отношение пути, пройденного материальной точкой, к промежутку времени, за который этот путь пройден, называется *средней скоростью пути*:

$$v_{\text{ср}} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Средняя скорость пути – скалярная физическая величина. Единица измерения в системе СИ – $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ (метр в секунду).



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 22 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Средняя скорость перемещения – это физическая величина, равная отношению вектора перемещения $\Delta\vec{r}$ материальной точки, к величине промежутка времени Δt за которое это перемещение произошло:

$$\vec{v}_{\text{cp}} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Средняя скорость перемещения – векторная физическая величина. Единица измерения в системе СИ – $\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Будем бесконечно уменьшать промежуток времени Δt (в математике говорят, устремим Δt к 0 и обозначают $\Delta t \rightarrow 0$). Тогда точка В (**рисунок 2.2**) будет стремиться к точке А и хорда АВ в пределе совпадет с бесконечно малым участком траектории вблизи точки А, а средняя скорость на малом перемещении $\Delta\vec{r}$ перейдет в так называемую *мгновенную*, или *истинную*, скорость в точке А. Аналитически это записывают следующим образом:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \vec{v}_{\text{cp}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} \quad (2.3)$$

(латинское слово *limes* означает границу, предел).

Пользуясь понятиями высшей математики можно заменить предел вышестоящего отношения производной и написать:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (2.4)$$

Следовательно, *мгновенная скорость* представляет собой производную радиус-вектора по времени. Мгновенная скорость направлена по касательной к траектории в данной точке (**рисунок 2.3**).

Если скорость материальной точки не изменяется с течением времени, то такое движение называют *равномерным*; в противном случае *неравномерным*.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 23 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

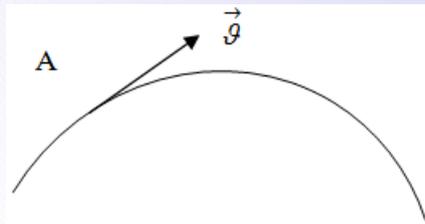


Рисунок 2.3

Быстроту изменения скорости тела характеризуют специальной физической величиной называемой *ускорением*. Пусть материальная точка переместилась за малый промежуток времени Δt из A, где у нее была скорость \vec{v}_1 в B, где у нее скорость стала равной \vec{v}_2 .

Изменение (приращение) скорости материальной точки есть вектор $\Delta\vec{v}$, равный разности векторов конечной и начальной скоростей:

$$\Delta\vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1 \quad (2.5)$$

Отношение изменения скорости к промежутку времени, за который это изменение произошло, называется *средним ускорением*:

$$a_{\text{cp}}^{\vec{v}} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \quad (2.6)$$

Среднее ускорение – это вектор направленный, так же как и вектор приращения скорости.

Будем уменьшать промежуток времени. В пределе при $\Delta t \rightarrow 0$ точка B будет стремиться к точке A и среднее ускорение превратится в мгновенное или истинное, ускорение в точке A:

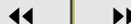
$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} a_{\text{cp}}^{\vec{v}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (2.7)$$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 24 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Следовательно, мгновенное ускорение представляет собой производную скорости по времени. Единица измерения ускорения в системе СИ – $\frac{м}{с^2}$. Вектор ускорения принято раскладывать на две взаимно перпендикулярные составляющие: \vec{a}_n – нормальное ускорение и \vec{a}_τ – тангенциальное ускорение (рисунок 2.4).

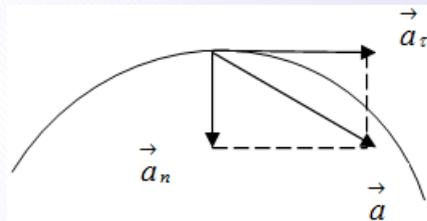


Рисунок 2.4

Тангенциальное (от лат. *tangens* – *касающийся*) ускорение характеризует быстроту изменения скорости по величине, а *нормальное* (*нормаль* – прямая перпендикулярная касательному пространству (касательной прямой к кривой, касательной плоскости к поверхности и т. д.)) ускорение изменение скорости по направлению.

При прямолинейном движении материальной точки нормальное ускорение отсутствует и полное ускорение совпадает с тангенциальным. Для равномерного прямолинейного движения $a = 0$ и вектор перемещения зависит от времени следующим образом:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}t, \quad (2.8)$$

где \vec{r}_0 – перемещение в начальный момент времени $t_0 = 0$.

Движение, происходящее с постоянным ускорением, называют *равноускоренным*. В этом случае мгновенное ускорение равно среднему ускорению за любой промежуток времени. Тогда из формулы (2.6) получим:

$$\vec{a}_{\text{ср}} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}, \quad (2.9)$$



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 25 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

где \vec{v}_0 – начальная скорость (скорость в начальный момент времени $t_0 = 0$), \vec{v} – скорость в момент времени t . Из (2.9) следует, что вектор мгновенной скорости при равноускоренном движении линейно зависит от времени:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t \quad (2.10)$$

Вектор перемещения при прямолинейном равноускоренном движении зависит от времени следующим образом:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2} \quad (2.11)$$

Формулы (2.10) и (2.11) справедливы в том числе для тела брошенного вертикально вверх или вниз. В этих случаях $a = g \approx 9,81 \frac{m}{c^2}$ (ускорение свободного падения). Рассмотрим движение материальной точки по окружности с постоянной по величине скоростью (рисунок 2.5).

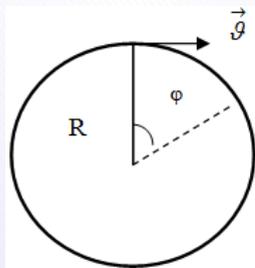


Рисунок 2.5

Даная скорость получила название – *линейная скорость* и в системе СИ измеряется в m/c . Наряду с линейной скоростью движение материальной точки по окружности характеризуют так называемой *угловой скоростью* (ω):

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad (2.12)$$



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 26 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

величину, которой определяют отношением угла $\Delta\varphi$ поворота радиуса R к промежутку времени Δt , за который этот поворот произошел. Единицей измерения угловой скорости является – *рад/с* (радиан в секунду). Линейная скорость связана с угловой скоростью следующим соотношением:

$$v = \omega R \quad (2.13)$$

Широко используются еще две характеристики движения материальной точки по окружности: *период* (T) – время одного оборота и *частота* (ν) – число оборотов в единицу времени.

Период и частота величины взаимно обратные:

$$T = \frac{1}{\nu} \quad (2.14)$$

Единицей измерения периода вращения является секунда (s), а частоты вращения – s^{-1} . Так как за период T радиус окружности связанный с материальной точкой, повернется на угол 2π , то согласно (2.12):

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.15)$$

При движении материальной точки по окружности с постоянной по величине скоростью тангенциальная составляющая ускорения отсутствует и ускорение совпадает со своей нормальной составляющей ($a = a_n$), которое в данном случае принято называть *центростремительным*.

При неравномерном движении материальной точки по окружности вместе с линейной скоростью изменяется и угловая. Данное изменение угловой скорости характеризуют при помощи углового ускорения ε .

Среднее угловое ускорение (ε_{cp}) это физическая величина равная отношению изменения угловой скорости к промежутку времени за который это изменение произошло:

$$\varepsilon_{cp} = \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} \quad (2.16)$$



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 27 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Мгновенным угловым ускорением называется физическая величина определяемая следующим соотношением:

$$\vec{\varepsilon} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \vec{\varepsilon}_{\text{ср}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{\omega}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}, \quad (2.17)$$

то есть является производной угловой скорости по времени. Единицей измерения углового ускорения в системе СИ является *рад/с²*.

Угловое ускорение связано с линейным ускорением, следующим соотношением:

$$a = \varepsilon R \quad (2.18)$$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 28 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лекция 3. Основы динамики

Законы Ньютона. Инерциальные и неинерциальные системы отсчета. Масса. Импульс. Закон сохранения импульса. Реактивное движение. Силы в механике – упругости, трения, гравитационные. Невесомость и перегрузки. Физические и биологические вопросы, связанные с неинерциальными системами отсчета. Силы, возникающие при криволинейном движении. Центрифугирование. Вестибулярный аппарат, как физическая инерциальная система отсчета. Работа силы. Консервативные и неконсервативные силы. Кинетическая и потенциальная энергия. Закон сохранения энергии. Работа и мощность человека.

Литература: [1, с. 28–64], [2, с. 15–29].

Основные законы динамики были сформулированы в 80-х годах XVII столетия Ньютоном. Они представляют собой обобщение результатов многовекового человеческого опыта. Приведем современные формулировки трех законов Ньютона.

Первый закон Ньютона (закон инерции): всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, пока воздействие других тел не выведет его из этого состояния.

Свойство тел сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения называется *инерцией* (от латинского *inertia* – *бездеятельность*). Опыт показывает, что при одинаковом воздействии различные тела по-разному изменяют свою скорость. Иными словами, одинаковые воздействия вызывают у различных тел различные ускорения. Следовательно, величина ускорения, приобретаемого телом, зависит не только от величины воздействия, но и от некоторого собственного свойства тела. Это свойство тела характеризуют физической величиной, называемой *массой*. В этом смысле можно сказать, что масса есть мера инертных свойств тела. Обозначают массу – m . Единица измерения массы в системе СИ – кг (*ки-*



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 29 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

лограмм). Единица массы *килограмм*, который равен массе платиново-иридиевого сплава (90 % Pt, 10 % Ir) в виде цилиндрического цилиндра диаметром и высотой 39 мм, хранимого в Международном бюро мер и весов в Севре (Франция).

Таблица 3.1. Значения масс некоторых объектов

Объект	Значение массы, кг
Галактика «Млечный путь»	$1 \cdot 10^{41}$
Солнце	$2 \cdot 10^{30}$
Земля	$6 \cdot 10^{24}$
Голубой кит	$2 \cdot 10^5$
Слон	$7 \cdot 10^3$
Человек	$7 \cdot 10^1$
Колибри	$2 \cdot 10^{-3}$
Комар	$1 \cdot 10^{-5}$
Бактерия	$1 \cdot 10^{-15}$
Вирус гриппа	$1 \cdot 10^{-18}$
Молекула воды	$3 \cdot 10^{-26}$
Атом водорода	$1,67 \cdot 10^{-27}$
Электрон	$9,1 \cdot 10^{-31}$

Системы отсчета, в которых выполняется первый закон Ньютона, называются *инерциальными*. В этих системах отсчета движение тела выглядит особенно простым. Тела, не подверженные воздействию других тел, движутся относительно таких систем без ускорения, т. е. прямолинейно и равномерно. *Неинерциальной системой отсчета* называется система отсчета, относительно которой тело, не подверженное воздействию других тел, движется с ускорением. В физике действие тел друг на друга описывают при помощи силы (\vec{F}).

Второй закон Ньютона: ускорение \vec{a} , приобретаемое телом под действием силы \vec{F} , направлено так же, как сила, а по величине пропорционально силе и обратно



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание

Страница 30 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

пропорционально массе тела:

$$\vec{a} = k \frac{\vec{F}}{m}, \quad (3.1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц измерения. Единицы измерения силы можно, выбрать так, чтобы $k = 1$. Тогда:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (3.2)$$

В таком математическом виде принято выражать второй закон Ньютона (основной закон динамики поступательного движения). Подчеркнем, что под \vec{F} , подразумевается векторная сумма (равнодействующая) всех сил, действующих на тело.

Если одно тело действует на второе, то в свою очередь второе тело действует на первое. Например, груз, давящий на опору, испытывает давление со стороны этой опоры. Соотношение между силами, приложенными к взаимодействующим телам, описывается *третьим законом Ньютона* (закон действия и противодействия): два взаимодействующих тела действуют друг на друга с силами, равными по величине и противоположными по направлению:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}, \quad (3.3)$$

где \vec{F}_{12} – сила действия первого тела на второе, \vec{F}_{21} – сила действия второго тела на первое.

На основании законов Ньютона можно уточнить формулировку понятия силы: *сила* – физическая величина, характеризующая взаимодействие тел, в результате которого они приобретают ускорение. На основе второго закона Ньютона можно установить единицу измерения силы. Она получила название *ньютон* (H):

$$1H = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$$



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 31 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Второй закон Ньютона можно записать в другой форме. На основании формулы (2.7) и (3.2):

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \text{ и } \vec{F} = m\vec{a}$$

тогда

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (3.4)$$

Физическая величина:

$$\vec{p} = m\vec{v}, \quad (3.5)$$

равная произведению массы тела на его скорость называется *импульсом тела*. Совокупность тел, выделенных для рассмотрения, называется *механической системой*. Тела системы могут взаимодействовать как между собой, так и с телами, не входящими в систему. В соответствии с этим силы, действующие на тела системы, подразделяются на *внутренние* и *внешние*. *Внутренними* называют силы, с которыми тела системы действуют друг на друга, *внешними* – силы, обусловленные воздействием тел, не принадлежащих системе. Система, в которой внешние силы отсутствуют, называется *замкнутой* (или *изолированной*). Представим себе некую механическую изолированную систему, состоящую из n тел. Пусть, взаимодействуя друг с другом, тела данной системы изменяют свой импульс. Используя для каждого из тел системы второй закон Ньютона изменение его импульса за время dt можно



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 32 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

представить следующим образом:

$$d\vec{p}_1 = (\vec{f}_1 + \vec{F}_1) dt,$$

$$d\vec{p}_2 = (\vec{f}_2 + \vec{F}_2) dt,$$

.....

$$d\vec{p}_i = (\vec{f}_i + \vec{F}_i) dt,$$

.....

$$d\vec{p}_n = (\vec{f}_n + \vec{F}_n) dt.$$

где $\vec{f}_1, \vec{f}_2, \dots, \vec{f}_n$ – равнодействующие внутренних, а $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$ – равнодействующие внешних сил действующих на каждое из тел. Сложим вышеприведенные равенств почленно. Так как согласно третьему закону Ньютона, каждой силе соответствует равная по величине противодействующая сила, то при сложении все внутренние силы взаимно уничтожаются, поэтому $\sum_{i=1}^n \vec{f}_i = 0$. Тогда:

$$d\vec{p}_1 + d\vec{p}_2 + \dots + d\vec{p}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i dt.$$

Для изолированной системы: $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$. Поэтому:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n = const \quad (3.6)$$

Формула (3.6) выражает закон сохранения импульса: в изолированной системе векторная сумма импульсов всех тел остается величиной постоянной при любых



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 33 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

взаимодействиях тел этой системы. Закон сохранения импульса находит широкое отражение в технике и природе. Именно выполнением закона сохранения импульса объясняется *реактивное движение* – движение тела, возникающее при отделении от него с некоторой относительной скоростью какой то части тела (движение ракет, явление отдачи при выстреле и т. д.). Тело (ракета, ружье) приобретает импульс, равный по величине импульсу отделившегося тела (газ, пуля). Данный вид движения используется некоторыми живыми организмами, которые передвигаются посредством отдачи воды, выбрасываемой ими из особых полостей тела. Например, медуза заполняет зонтичную часть водой, которую выталкивает, вследствие чего движется в противоположную сторону. Более сложными системами являются кальмары, которые обладают мышечной накидкой, которая заполняется водой. За счет мышечного сокращения вода выталкивается через сифон, а кальмар движется в противоположном направлении. Причем он способен регулировать направление движения благодаря повороту сифона. Некоторые кальмары за счет реактивного движения достигают палубы кораблей. Часто кальмар сочетает выкидывание воды с темной чернильной жидкостью для отпугивания хищников. Некоторые моллюски, такие как морской гребешок, сжимают периодически свои раковины, благодаря чему они могут избежать встречи с хищниками – морскими звездами. Среди растений реактивное движение демонстрирует бешеный огурец *Ecballium elateium*. При созревании семян окружающая их ткань превращается в слизистую массу, которая создает большое давление, вызывающее отделение плода от плодоножки и выброс семян через образовавшееся отверстие на расстояние более шести метров.

До сих пор мы рассматривали силы вообще, не интересуясь их происхождением. Рассмотрим некоторые разновидности сил, широко представленных в механических процессах, происходящих в живых организмах.

Сила может деформировать тело – сместить составляющие его частицы относительно друг друга. В соответствии с третьим законом Ньютона внутри тела возникает противодействующая сила равная по величине деформирующей силе и противоположная ей по направлению. Данную силу называют *силой упругости*. Силы



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 34 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

упругости обусловлены взаимодействием между молекулами и атомами тела и имеют электромагнитную природу. Величина силы упругости возникающей при малых деформациях определяется законом Гука:

$$F_{\text{упр}} = -k\Delta x, \quad (3.7)$$

где k – коэффициент пропорциональности, называемый жесткостью или коэффициентом жесткости; Δx – величина деформации (смещение). Знак минус указывает на противоположность направления силы упругости и смещения. Для характеристики упругих свойств во время небольших деформаций используют специальную физическую величину – *модуль Юнга* (E). Это скалярная величина численно равная механическому напряжению, возникающему в теле при увеличении длины этого тела в два раза. *Механическое напряжение* – это скалярная физическая величина, равная отношению модуля силы упругости возникающей при деформации тела, к площади поперечного сечения этого тела, перпендикулярного направлению силы. Модуль Юнга измеряют в ньютонах на квадратный метр ($\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$).

Таблица 3.2. Модуль Юнга для различных материалов

Материал	Модуль Юнга, Н/м ²
Сталь	$2 \cdot 10^{11}$
Кость (вдоль оси)	$2 \cdot 10^{10}$
Древесина	$10^9 - 10^{10}$
Коллаген	$10^7 - 10^8$
Сухожилие	$2 \cdot 10^7$
Кровеносный сосуд	$2 \cdot 10^5$
Клетки гладких мышц	$10^4 - 10^5$

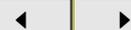
Очень распространенным взаимодействием тел является трение. Трение подразделяется на внешнее и внутреннее. Внешнее трение возникает при соприкосновении



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 35 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

поверхностей разных тел движущихся относительно друг друга. Внутреннее возникает между слоями одного и того же тела (жидкость, газ). Различают также сухое и жидкое (вязкое) трение. Сухое возникает между поверхностями твердых тел в отсутствии жидкой или газообразной прослойки. Жидкое трение это трение между твердым телом и жидкостью (газом) или слоями жидкости (газа). Помимо этого выделяют трение покоя, трение скольжения и трение качения (возникает между цилиндрическим или шарообразным телом и поверхностью). Опыт показывает, что возникающая при этом сила трения покоя, скольжения и качения не зависит от площади соприкасающихся тел и приблизительно прямо пропорциональна силе нормального давления \vec{F}_n , прижимающей трущиеся поверхности друг к другу:

$$F_{\text{тр}} = kF_n, \quad (3.8)$$

где k – коэффициент трения. Он зависит от рода вещества и качества обработки трущихся поверхностей. Силы трения обусловлены взаимодействием частиц соприкасающихся тел и имеют электромагнитную природу. Трение играет большую роль в природе. Действие органов передвижения и хватательных органов живых существ основано на трении скольжения, трение удерживает корни растений в почве, шарообразность семян некоторых растений (трение качения) способствует их откатыванию на большие расстояния и т. д.

Сила тяготения (гравитационная сила (от латинского слова *gravitas* – *тяжесть*)) – сила с которыми притягиваются друг к другу все материальные тела во Вселенной. Данное взаимодействие тел осуществляется посредством гравитационного поля (поля тяготения). Гравитационная сила описывается *законом всемирного тяготения*, открытым Ньютоном в 1667 году. Согласно этому закону любые две материальные точки притягиваются друг к другу с силой $F_{\text{гр}}$, пропорциональной произведению их масс (m_1 и m_2) и обратно пропорциональной квадрату расстояния r между ними:

$$F_{\text{гр}} = \gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}. \quad (3.9)$$



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 36 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Коэффициент пропорциональности γ называется гравитационной постоянной. На данный момент времени опытным путем установлено, что численное значение $\gamma \approx 6,67428 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$. Если тела нельзя считать материальными точками, их представляют как совокупность материальных точек и, геометрически суммируя силы взаимодействия отдельных точек, находят результирующую силу тяготения между ними.

Из закона всемирного тяготения следует, что масса характеризует не только инертные свойства тел, но и *гравитационные свойства*.

Вблизи поверхности Земли все тела падают с одинаковым ускорением, которое называют *ускорение свободного падения* и обозначают \vec{g} . Среднее значение ускорения свободного падения определяется выражением:

$$g = \gamma \frac{M_3}{R_3^2} \approx 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, \quad (3.10)$$

где M_3 – масса Земли, R_3 – радиус Земли. Так, как Земля не является идеальным шаром («сплюснута» у полюсов) значение \vec{g} зависит от широты.

Таким образом, в системе отсчета связанной с Землей, на всякое тело действует сила:

$$\vec{F} = m\vec{g}. \quad (3.11)$$

Эта сила называется *силой тяжести*. По величине она приблизительно равна (отличие не превышает 0,36 %) силе гравитационного притяжения тела к Земле. Данное различие обусловлено тем, что строго говоря, система отсчета связанная с Землей не является инерциальной (вращается с нормальным ускорением \vec{a}_n). В результате сила гравитации, действующая на тело и направленная к центру Земли, раскладывается на две составляющие силы. Одна составляющая направлена также как \vec{a}_n , вторая по отвесу – ее и называют силой тяжести. Силу тяжести не следует путать с весом тела. *Вес тела* \vec{P} – это сила, с которой тело действует на подвес или опору вследствие гравитационного притяжения к Земле. Сила тяжести \vec{F} – это



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 37 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

сила, действующая на тело вблизи поверхности Земли вследствие гравитационного притяжения к Земле.

Сила тяжести имеет гравитационную природу, вес тела электромагнитную. У данных сил разные точки приложения: вес приложен к опоре или подвесу, сила тяжести к самому телу ([рисунок 3.1](#)).

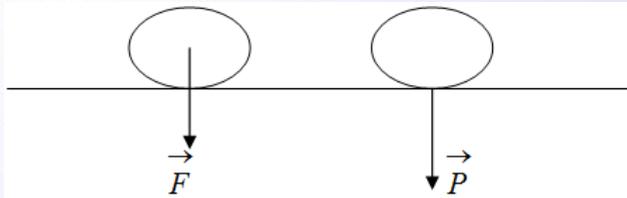


Рисунок 3.1

Если опора или подвес покоятся относительно Земли или движутся без ускорения, то сила тяжести равна весу тела:

$$\vec{F} = \vec{P} = m\vec{g} \quad (3.12)$$

Если опора или подвес движется с ускорением \vec{a} , вес тела перестает быть равным силе тяжести. Используя второй и третий законы Ньютона можно получить, что в данном случае:

$$\vec{P} = \vec{F} - m\vec{a} = m(\vec{g} - \vec{a}) \quad (3.13)$$

При движении опоры или подвеса с ускорением \vec{a} равным \vec{g} вес тела становится равным нулю. Тело не будет оказывать давление на опору и наступает так называемое состояние *невесомости*. В состоянии невесомости нарушается течение многих биологических процессов, так как внутренние органы перестают давить на внутренние органы расположенные ниже, а все тело в целом перестает давить на кости скелета в целом. Формула (3.13) объясняет возникновение *перегрузки* – увеличение



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 38 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

веса тела, вызванное его ускоренным движением относительно инерциальной системы отсчета. Например, при старте космического корабля ускорение \vec{a} направленно вверх и вес космонавта определяется выражением: $P = m(g+a)$. Численно перегрузка n (коэффициент перегрузки) равна:

$$n = \frac{P}{mg} \quad (3.14)$$

Рассмотренный нами второй закон Ньютона в виде $\vec{F} = m\vec{a}$ справедлив только для инерциальных систем отсчета. В неинерциальных системах отсчета он не соблюдается. Невыполнение данного закона в неинерциальных системах можно обнаружить на примере тела, покоящегося в некоторой инерциальной системе. В этом случае векторная сумма всех сил действующих на тело равна нулю ($\vec{F} = 0$). Однако для наблюдателя, находящегося в неинерциальной системе отсчета, движущейся относительно инерциальной с ускорением a , тело будет иметь ускорение $-a$, приобретаемое без воздействия каких либо тел. Применяя второй закон Ньютона наблюдатель получит: $0 = -ma$, что невозможно.

Для того, чтобы законы Ньютона были применимы к неинерциальным системам отсчета искусственно вводят в рассмотрение фиктивные, несуществующие силы особого рода – *силы инерции*. В нашем примере наблюдатель, связанный с неинерциальной системой отсчета может считать, что тело пришло в движение под действием силы инерции $\vec{F}_{ин} = -m\vec{a}$. Сила инерции обусловлена неинерциальностью той системы отсчета, в которой рассматриваются механические явления. Не существует тел, воздействием которых была бы обусловлена эта сила. Тогда в общем случае второй закон Ньютона в неинерциальных системах отсчета принимает следующий вид:

$$\vec{F} + \vec{F}_{ин} = m\vec{a} \quad (3.15)$$

Это позволяет легче решать всевозможные задачи по механике. Введение сил инерции позволяет описывать движение тел и во вращающихся системах отсчета. К



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 39 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

ним относятся, например встречающиеся в литературе центробежные силы и сила Кориолиса. Это также фиктивные силы, но более сложные.

Центрифугирование – разделение неоднородных систем (напр., жидкость – твердые частицы) на фракции по плотности за счет вращения. Приборы, применяемые для этой цели, называют центрифугами. Основной частью центрифуги является ротор с смонтированными в нем гнездами для центрифужных пробирок. Ротор вращается с большой скоростью, вследствие инерции происходит разделение механических смесей, например осаждение взвешенных в жидкости частиц. Центрифугирование применяется для отделения осадка от раствора, для отделения загрязненных жидкостей, производится также центрифугирование эмульсий (напр., сепарирование молока). Центрифугирование бетона применяется для увеличения его прочности. В клинических и санитарно-гигиенических лабораториях центрифугирование используют для отделения эритроцитов от плазмы крови, сгустков крови от сыворотки, плотных частиц от жидкой части мочи и т. д.

У человека имеется орган, который по существу является инерциальной системой ориентации – это *вестибулярный аппарат*. Он расположен во внутреннем ухе и состоит из трех взаимно перпендикулярных полукружных каналов и полости – преддверия. На внутренней поверхности стенок преддверия и в части полукружных каналов находятся группы чувствительных нервных клеток, имеющих свободные окончания в форме волосков. Внутри преддверия и полукружных каналов имеется студенистая масса (*эндолимфа*), содержащая мелкие кристаллы фосфорнокислого и углекислого кальция (отолиты). При движении головы в пространстве (с ускорением или замедлением) эндолимфа вследствие инерции отстает от движения костных стенок лабиринта и, следовательно, перемещается относительно них в обратном направлении. Перемещение эндолимфы вызывает сгибание волосков нервных клеток, в которых при этом возникают импульсы, сигнализирующие в центральную нервную систему о направлении и величине ускорения перемещения эндолимфы. При вращательном движении головой эти явления наиболее выражены в том по-



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 40 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

лукружном канале, который лежит преимущественно в плоскости вращения. При прямолинейном движении аналогичные явления наиболее выражены в преддверии, причем в этом случае действие перемещения жидкости усиливается перемещением вместе с ней отолитовой массы. Вестибулярный аппарат, как и любая другая биофизическая система, не различает силы тяжести и силы инерции, а реагирует на равнодействующую этих сил. Если силы инерции будут периодически воздействовать на вестибулярный аппарат, например, при качке корабля, то это может привести к морской болезни. От состояния вестибулярного аппарата зависит способность к ориентированию в пространстве, а также способность сохранения равновесия тела. При нарушении функции вестибулярного аппарата наблюдается промахивание при пальцево-носовой пробе.

При прямолинейном движении под действием постоянной силы \vec{F} , которая составляет некоторый угол α с направлением перемещения \vec{r} , работа этой силы равна:

$$A = (\vec{F}, \vec{r}) = F|\vec{r}| \cos \alpha = F s \cos \alpha \quad (3.16)$$

Единицей измерения работы является *джоуль (Дж)*: $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Таким образом, 1 Дж – это работа, совершаемая силой в 1 Н при перемещении тела на 1 м в направлении действия силы.

При $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ работа положительна; при $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ работа силы отрицательна – сила препятствует движению (обычно отрицательная работа у сил трения, сопротивления воздуха); если угол между направлением силы и перемещением равен 90° – работа силы равна 0.

В общем случае сила может изменяться как по величине, так и по направлению. Поэтому формулой (3.16) пользоваться нельзя.

В этом случае вводится понятие элементарной работы. На криволинейном участке траектории выделяется элементарный (бесконечно малый) участок перемещения



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 41 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

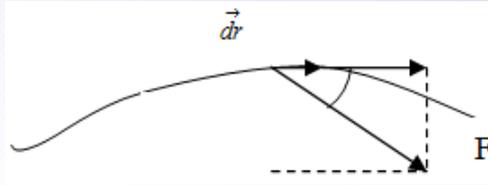


Рисунок 3.2

$d\vec{r}$, на котором силу можно считать постоянной, а направление перемещения прямолинейным (см. рис. 3.2). Элементарная работа будет равна

$$dA = (\vec{F}, d\vec{r}) = F ds \cos \alpha, \quad (3.17)$$

а полная работа на пути из точки 1 в точку 2 находится интегрированием:

$$A = \int_1^2 dA = \int_1^2 F ds \cos \alpha \quad (3.18)$$

Чтобы охарактеризовать скорость совершения работы вводится понятие мощности (P), т. е. работы совершаемой в единицу времени. Мгновенная мощность определяется выражением

$$P = \frac{dA}{dt} \quad (3.19)$$

Единицей измерения мощности в СИ служит *ватт (Вт)*: $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$. Единица в 10^3 большая называется *киловаттом (кВт)*. Из формулы (3.19) вытекает внесистемная единица измерения работы, используемая в быту – киловатт-час: $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$. В технике часто применяется единица мощности, именуемая лошадиной силой (л. с.): $1 \text{ л. с.} = 736 \text{ Вт}$.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 42 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Мощность человека – это количество механической работы, выполняемой человеком в единицу времени. По данным исследований, средняя мощность человека колеблется в пределах от 75 до 110 Вт. Однако это мощность вместе с потерями на тепло. В некоторые периоды профессиональной работы мощность человека становится значительно выше средней величины. Например, штангист при рывке штанги развивает максимальную мощность до 1,5 кВт. Работа большой мощности, называемая часто интенсивной работой, требует от сердца очень большой производительности (объём крови в 1 минуту) и, производимая в течение большого или малого значительного промежутка времени, ведёт к изменениям в сердце. Отсюда происходят физиологические изменения в организме при работе максимальной мощности. Т. к. работа максимальной мощности – это работа с предельной для данного организма интенсивностью. В виду своей чрезвычайной интенсивности такая работа может продолжаться не более 20 секунд (в некоторых литературных источниках приводится цифра 30 секунд, но, на самом деле, биохимические процессы при работе, продолжающейся более 15-20 секунд, уже не соответствуют признакам работы максимальной мощности.

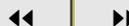
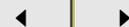
Энергия (E) – важнейшая физическая величина, являющаяся количественной мерой движения и взаимодействия всех видов материи. Понятие энергии связывает воедино все явления природы. В соответствии с различными видами движения рассматривают различные виды энергии: механическую, электромагнитную, ядерную и др. В данном разделе речь будет идти о механической энергии, которая характеризует способность системы совершать механическую работу. Например, если катящийся шар, сталкиваясь с другим шаром, перемещает его, он совершает работу, – следовательно, обладает энергией. Система, состоящая из Земли и того же шара, поднятого на некоторую высоту h над ее поверхностью в случае устранения опоры или подвеса тоже может совершить работу. Энергией обладает и деформированное тело (например, растянутая пружина). Если устранить причину деформации, пружина, сокращаясь, совершит работу по перемещению своих частей или другого тела. Из



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 43 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

приведенных примеров видно, что механическая энергия связана либо с движением тел – в этом случае ее называют *кинетической* (от греческого *кинетикос* – относящийся к движению), либо с взаимным расположением тел системы или их частей – в этом случае она называется *потенциальной* (от латинского *potentia* – возможность).

Кинетическая энергия поступательно движущегося тела (E_k) – скалярная физическая величина, равная половине произведения массы тела на квадрат его скорости:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} \quad (3.20)$$

Потенциальная энергия $E_{\text{п}}$ системы состоящей из Земли и тела массы m поднятого на высоту h определяется по следующей формуле:

$$E_{\text{п}} = mgh \quad (3.21)$$

Потенциальная энергия $E_{\text{п}}$ упруго деформированного тела определяется выражением:

$$E_{\text{п}} = \frac{k\Delta l^2}{2}, \quad (3.22)$$

где k – коэффициент жесткости, Δl – величина деформации (смещение).

Тело (система) может одновременно обладать как кинетической, так и потенциальной энергией (например, шар, падающий с некоторой высоты). Сумма кинетической и потенциальной энергии тела составляет его полную механическую энергию E :

$$E = E_k + E_{\text{п}} \quad (3.23)$$

В общем случае изменение энергии системы измеряется работой, которую может совершить система (или работой, которая совершается над системой), переходя из одного состояния в другое. Иными словами, работа A равна разности энергий при переходе системы из одного состояния в другое:

$$A = E_2 - E_1 \quad (3.24)$$



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 44 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

где E_1 и E_2 – энергии системы в начальном и конечном состоянии. Из формулы (3.24) следует, что единицей измерения энергии является *джоуль* (*Дж*). Внесистемная единица измерения энергии – *калория* (*кал*): $1 \text{ кал} = 4,18 \text{ Дж}$.

Если работа, совершаемая силами во время перемещения тела из одного положения в другое, не зависит от того, по какой траектории произошло это перемещение, а зависит только от начального и конечного положений тела, то такие силы называются *консервативными* (от англ. *conserve* – *сохранять*). Полная работа, совершаемая консервативными силами по перемещению тела по замкнутому пути, равна нулю. Примерами консервативных сил являются сила тяжести и сила упругости. Примером неконсервативных сил являются силы трения или сопротивления, которые всегда существуют в реальных физических системах.

Для поля консервативных сил справедлив *закон сохранения механической энергии*: полная механическая энергия системы материальных точек, находящихся под действием только консервативных сил остается величиной постоянной. Математически это записывается следующим образом:

$$E = \text{const} \quad (3.25)$$

При наличии неконсервативных сил полная механическая энергия системы не сохраняется. Работа этих сил, как правило, отрицательна. Потому при наличии неконсервативных сил полная механическая энергия системы уменьшается, переходя во внутреннюю энергию тел, что приводит к их нагреванию. Такой процесс называется *диссипацией* энергии (от лат. *диссипация* – рассеяние). Но это не значит, что энергия исчезает. Механическая энергия является лишь одним из многих видов энергии. Закон сохранения механической энергии является частным случаем более универсального, всеобщего *закона сохранения энергии*. Данный закон гласит: *полное количество энергии в изолированной системе тел и полей всегда остается постоянным; энергия лишь может переходить из одной формы в другую.*



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 45 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Обмен веществ (метаболизм) – это совокупность процессов преобразования веществ и энергии в живых организмах, которые составляют основу их жизнедеятельности. Обмен веществ предусматривает разрушение сложных органических веществ, которое сопровождается высвобождением энергии, необходимой для иных процессов, и образованием сложных субстанций, формирующих вещество для тканей и органов. Живой организм получает энергию от продуктов питания; эта энергия затрачивается на нагрев и совершение работы. Типичные значения обмена веществ как скорости преобразования химической энергии в тепловую и механическую для человека массой 70 кг в состоянии покоя составляет 120 Вт. Человеку необходимо каждые сутки получать через продукты питания около 2500 ккал с тем, чтобы поддерживать свою массу. Изменение массы тела на 1 кг эквивалентно энергии около 7700 ккал.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 46 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лекция 4. Механика жидкостей и газов

Движение жидкостей и газов. Законы Паскаля и Архимеда. Стационарное течение. Условие непрерывности потока. Уравнение Бернулли и его применение. Подъемная сила крыла. Движение крови в сосудах. Физические принципы определения давления и скорости движения крови.

Литература: [1, с. 80–84], [2, с. 51–58].

Свойства жидкостей и газов во многом отличаются. Молекулы газа, совершая хаотическое движение, заполняют равномерно весь предоставленный им объем. В жидкостях, в отличие от газов, среднее расстояние между молекулами значительно меньше и остается практически постоянным. Однако в ряде случаев, когда жидкости и газы можно рассматривать как сплошную среду, их поведение описывается одинаковыми законами, законами *гидроаэромеханики* (механики жидкостей и газов) и пользуются единым термином «жидкость». На каждый элемент поверхности тела со стороны молекул жидкости действует сила направленная перпендикулярно поверхности.

Давление (P) – скалярная физическая величина, равная модулю нормальной силы, действующей на единицу площади поверхности:

$$P = \frac{F}{S} \quad (4.1)$$

Единица измерения давления в СИ – *паскаль* ($Па$): $1 Па = 1 Н/м^2$.

Внесистемные единицы измерения давления:

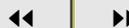
- физическая атмосфера (*атм*): $1 атм = 1,01 \cdot 10^5 Па$ (давление в $1 атм$ принято считать нормальным);
- техническая атмосфера (*ат*): $1 ат = 9,8 \cdot 10^4 Па$;



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 47 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

- миллиметр ртутного столба (*мм рт. ст.*): $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}$;
- бар: $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$.

В отличие от твердых тел в жидкости возможны значительные смещения составляющих ее частиц относительно друг друга. Сжимаемость жидкости очень мала. Так, например, при повышении давления от 10^5 до 10^7 Па плотность воды увеличивается всего на 0,5 %. Поэтому сжимаемостью движущейся жидкости можно пренебречь. Жидкости и газы передают оказываемое на них внешнее давление равномерно по всем направлениям (закон Паскаля). Давление столба жидкости на глубине h (*гидростатическое давление*) определяется следующим выражением:

$$p = \rho gh, \quad (4.2)$$

где ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения.

Сила давления на нижние слои жидкости больше, чем на верхние слои, поэтому на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, определяемая законом Архимеда: *на тело, погруженное в жидкость (газ), действует со стороны этой жидкости (газа) направленная вверх выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости (газа):*

$$F_a = \rho gV, \quad (4.3)$$

где ρ – плотность жидкости, V – объем погруженной в жидкость части тела.

При изучении движения жидкостей их рассматривают как сплошную непрерывную среду, не вдаваясь в молекулярное строение жидкостей. При описании движения жидкости следят не за частицами жидкости, а за отдельными точками пространства, и отмечают скорость, с которой проходят через каждую точку отдельные частицы жидкости.

Рассмотрим некоторый объем внутри движущейся идеальной (пренебрегается трением между слоями жидкости) жидкости. Мысленно отметим в ней ряд точек и изобразим векторами скорость течения частиц жидкости в данных токах.



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 48 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Проведем линии, в каждой точке которых касательная совпадает с вектором скорости движения частиц жидкости. Такие линии называют линиями тока. Если скорость в каждой точке пространства остается постоянной, то течение жидкости называется *стационарным (установившимся)*.

Выделим в движущейся жидкости объем, ограниченный линиями тока. Будем считать, что жидкость не может проходить через боковую поверхность этого объема. Рассматриваемый объем подобен трубке с непроницаемыми для жидкости стенками и называется *трубкой тока*. Выберем в трубке два поперечных сечения S_1 (где скорость течения жидкости равна v_1) и S_2 (где скорость течения жидкости равна v_2).

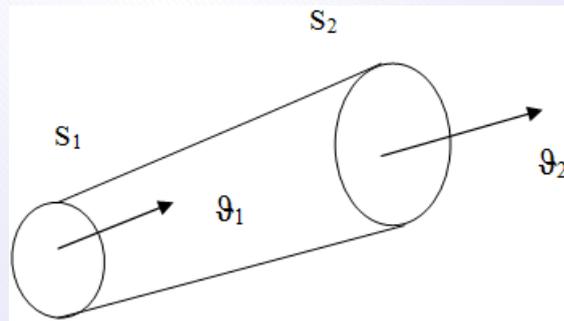


Рисунок 4.1

При стационарном течении за промежуток времени Δt через площадь поперечного сечения трубки проходит объем жидкости $V = S v \Delta t$. Так как жидкость не сжимается, не разрывается и не переходит через боковую поверхность трубки количество ее между сечениями остается неизменным. Отсюда следует, что за время Δt через сечения S_1 и S_2 пройдут одинаковые объемы жидкости:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad (4.4)$$



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 49 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Так как сечения были выбраны произвольно, то

$$Sv = const \quad (4.5)$$

Следовательно, для несжимаемой жидкости при стационарном течении произведение Sv в любом сечении данной трубки тока имеет одинаковое значение.

Соотношение (4.5) называется уравнением неразрывности струи. Данное соотношение справедливо и для реальных труб, русла реки, кровеносных сосудов и т. д. На узких участках скорость течения жидкости больше.

Пусть по наклонной трубке тока ограниченной сечениями S_1 и S_2 движется жидкость. Скорость жидкости через данные сечения v_1 и v_2 соответственно. Сечение S_1 находится на высоте h_1 , а сечение S_2 на высоте h_2 , над неким горизонтальным уровнем.

Внешняя сила давления, приложенная к сечению S_1 сила $F_1 = p_1 S_1$ к сечению S_2 сила $F_2 = p_2 S_2$, где p_1 и p_2 – давления на данных сечениях (рисунок 4.2).

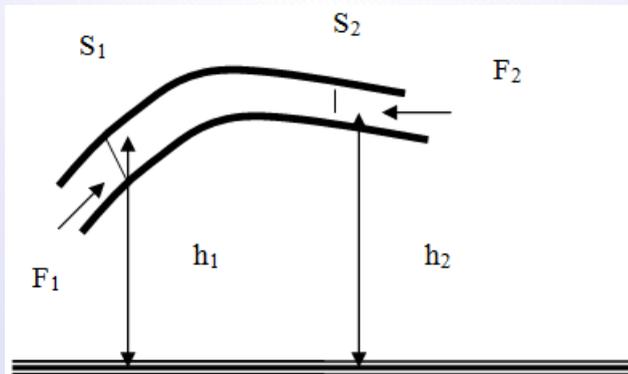


Рисунок 4.2

Внешняя сила давления F_1 за промежуток времени Δt совершает работу $A_1 = F_1 v_1 \Delta t$ по перемещению массы жидкости на пути $v_1 \Delta t$, сила F_2 работу $A_2 = -F_2 v_2 \Delta t$.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 50 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Тогда работа сил давления по перемещению массы жидкости равна:

$$A = A_1 + A_2 = F_1 v_1 \Delta t - F_2 v_2 \Delta t = p_1 S_1 v_1 \Delta t - p_2 S_2 v_2 \Delta t.$$

Как известно работа равна разности энергий системы в начальном и конечном состоянии: $A = E_2 - E_1$. В нашем случае: $E_1 = \frac{m v_1^2}{2} + mgh_1$ (сумма кинетической и потенциальной энергии), а $E_2 = \frac{m v_2^2}{2} + mgh_2$.

Тогда:

$$p_1 S_1 v_1 \Delta t - p_2 S_2 v_2 \Delta t = \frac{m v_2^2}{2} + mgh_2 - \frac{m v_1^2}{2} - mgh_1 \quad (4.6)$$

учитывая, что согласно (4.4) $S_1 v_1 \Delta t = S_2 v_2 \Delta t = V$, разделив правую и левую часть выражения (4.6) на V и воспользовавшись формулой для плотности $\rho = m/V$, получим:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho gh_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho gh_2 + p_2$$

Поскольку сечения S_1 и S_2 выбраны произвольно, можно окончательно написать:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = const \quad (4.7)$$

Данное соотношение было получено Д. Бернулли (швейцарский физик и математик, 1700–1782) и называется уравнением Бернулли. Величину p называют *статическим давлением*, величину $\frac{\rho v^2}{2}$ – *динамическим давлением*, величину ρgh – *гидравлическим давлением*.

Из уравнений Бернулли и неразрывности следует, что в местах сужения трубопровода скорость течения жидкости возрастает, а давление понижается. Хотя уравнение Бернулли было получено для идеальной жидкости, оно хорошо выполняется и для реальных жидкостей, у которых внутреннее трение невелико и при небольших



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 51 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

скоростях течения газа. На основе уравнения Бернулли сконструирован ряд приборов, таких, как водомер, водоструйный насос, карбюраторы поршневых двигателей и др.

Рассмотренные в данной теме понятия лежат в основе теории подъемной силы крыла и движения крови в сосудах. Набегающий воздух обтекает крыло и отрывается от его задней острой кромки.

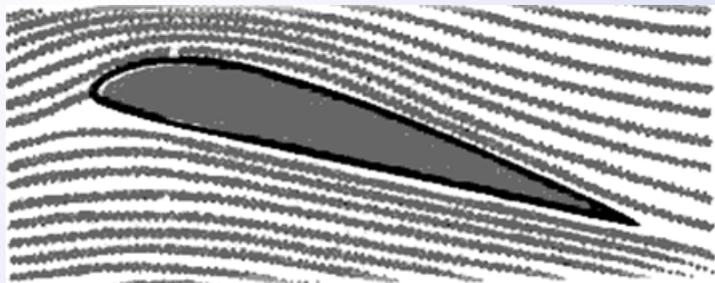


Рисунок 4.3

У крыла верхняя часть более выпуклая, чем нижняя, следовательно, верхним струйкам придется пройти больший путь, чем нижним. Однако количество воздуха, набегающего на крыло и стекающего с него, одинаково. Значит, верхние струйки, чтобы не отстать от нижних, должны двигаться быстрее. В соответствии с уравнением Бернулли, если скорость воздушного потока под крылом меньше, чем над крылом, то давление под крылом, наоборот, будет больше, чем над ним. Эта разность давлений и создает аэродинамическую (подъемную силу).

Начальное давление, необходимое для продвижения крови по всей сосудистой системе, создается работой сердца. В этом отношении сердце представляет ритмически действующий насос, у которого рабочая фаза (сокращение мышцы – систола) чередуется с холостой фазой (расслабление мышцы – диастола). Кровь, проходя по сосудам, испытывает сопротивление движению как со стороны сосудов, так и из-за вязкости самой крови. Чем выше сопротивление току крови, тем большая си-



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 52 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

ла затрачивается на ее продвижение по сосуду. Величина сопротивления зависит от диаметра сосуда, его длины, скорости кровотока. Поэтому сердце выбрасывает кровь в сосудистую систему под большим давлением. В разных отделах сосудистой системы давление крови будет разным. В аорте среднее давление в 100 мм рт. ст. колеблется в диапазоне от 120 мм рт. ст. при систоле (систолическое давление) до 80 мм рт. ст. при диастоле (диастолическое давление). Разница между ними называется пульсовым давлением. По мере движения крови давление в сосудистом русле падает. Таким образом, непрерывные, ритмические сокращения сердца, преодолевая сопротивление, создают и поддерживают разность кровяного давления между артериальным и венозным участком сосудистой системы. Эта разность давлений и является главной причиной движения крови по сосудам из области высокого давления в область более низкого. Артериальное давление – систолическое (в период изгнания крови из правого желудочка) у взрослых людей в норме составляет 100–140 мм. рт. ст.; диастолическое (в конце диастолы) – 70–80 мм. рт. ст.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 53 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лекция 5. Механические колебания и волны

Основные характеристики колебательного движения. Гармонические колебания. Математический и физический маятники. Собственные и вынужденные колебания. Резонанс. Природа звука. Физические основы речи и слуха человека. Характеристики слухового ощущения и их связь с физическими характеристиками звука. Инфразвук и ультразвук. Действие инфразвука и ультразвука на биологические объекты. Медико-биологическое использование ультразвука.

Литература: [1, с. 88–110], [2, с. 293–326].

Колебательным движением (колебанием) называется процесс, при котором система, многократно отклоняясь от своего состояния равновесия, каждый раз вновь возвращается к нему. Если этот возврат совершается через равные промежутки времени, то колебание называется периодическим.

Колебательные движения исключительно широко распространены в природе и технике. Вибрация натянутой струны, движение поршня двигателя, суточные и годовичные изменения температуры воздуха, морские приливы и отливы, волнение водной поверхности, биение сердца, дыхание, тепловое движение ионов кристаллической решетки твердого тела, переменный ток, движение электронов в атоме и т. д. – все это, в конечном счете, колебательные процессы.

Несмотря на большое разнообразие колебательных процессов, как по физической природе, так и по степени сложности, все они совершаются по некоторым общим закономерностям и могут быть сведены к совокупности простейших периодических колебаний, называемых *гармоническими* (от греческого слова *гармоникос* – *стройный*).

С основными закономерностями характеристиками гармонического колебания проще всего познакомиться на примере равномерного движения материальной точки по окружности.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 54 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Пусть материальная точка M движется против часовой стрелки по окружности радиусом A с постоянной угловой скоростью ω (рисунок 5.1). Тогда ее проекция N на вертикальный диаметр будет совершать периодические колебания около положения равновесия O (см. рисунок).

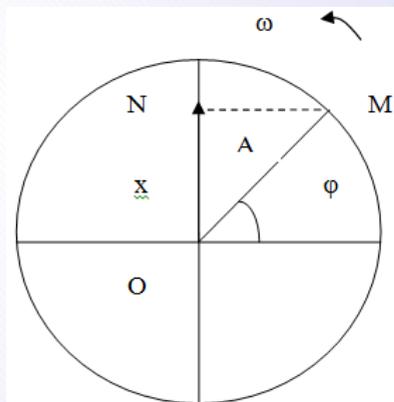


Рисунок 5.1

Величина смещения этой проекции ($x = ON$) изменяться в пределах от $+A$ до $-A$. Из прямоугольного треугольника ONM следует, что величина смещения x в любой момент времени t определяется соотношением:

$$x = A \sin \varphi \quad (5.1)$$

Из кинематики движения материальной точки по окружности известно, что $\varphi = \omega t$. Тогда:

$$x = A \sin \omega t \quad (5.2)$$

Соотношения (5.1) и (5.2) являются разновидностями уравнения гармонических колебаний. Таким образом, гармоническим называется колебание, при котором изме-



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 55 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

нение колеблющейся величины со временем происходит по закону синуса или косинуса. Величина A , равная максимальному смещению (отклонению) колеблющегося тела от положения равновесия, называется амплитудой колебания.

При описании колебательных процессов физические величины T, ν, ω, φ принято называть иначе, чем при описании движения материальной точки по окружности: T – период колебания (время одного полного колебания); ν – частота колебаний (число колебаний в единицу времени); ω – циклическая или круговая частота. Фазой колебания $\varphi = \omega t$ называется аргумент тригонометрической функции в уравнении гармонических колебаний. Она определяет смещение колеблющегося тела в любой момент времени. Уравнения гармонических колебаний получены в предположении, что в начальный момент времени фаза колебаний равна нулю (точка N находится в положении равновесия в момент движения в положительном направлении). Если же в начальный момент времени фаза уже имела некоторое значение φ_0 , то уравнение гармонических колебаний принято писать в виде:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (5.3)$$

где φ_0 – называется начальной фазой.

Скорость колебания тела определяется как производная смещения по времени:

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega A \cos \omega t \quad (5.4)$$

Ускорение точки это производная скорости по времени:

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 A \sin \omega t = -\omega^2 x \quad (5.5)$$

При колебательном движении ускорение переменное. Следовательно, это движение обусловлено действием переменной силы. Величина этой силы (согласно второму закону Ньютона, формул (5.2) и (5.5)) равна:

$$F = ma = -m\omega^2 x = -kx, \quad (5.6)$$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 56 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

где $k = m\omega^2$. Эта сила стремится возвратить колеблющуюся точку в положение равновесия, поэтому ее часто называют возвращающей силой (например, сила упругости). Таким образом, если известна масса материальной точки и коэффициент k , то можно определить круговую частоту и период колебаний:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5.7)$$

и

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (5.8)$$

Математическим маятником называют материальную точку, подвешенную на невесомой и нерастяжимой нити, колеблющейся под действием силы тяжести. Практическим приближением математического маятника может быть система, состоящая из небольшого тяжелого шарика и подвеса – тонкой длинной нити, причем диаметр шарика значительно меньше длины нити. Математический маятник представляет собой механическую систему, участвующую в периодическом колебательном движении. Период колебаний математического маятника определяется выражением:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (5.9)$$

где l – длина нити, g – ускорение свободного падения.

Колебательное движение реальной механической системы всегда сопровождается трением, на преодоление которого расходуется часть энергии колеблющейся системы. Энергия колебаний уменьшается, переходя в теплоту. Когда вся энергия колебаний перейдет в теплоту, колебания прекратятся (затухнут). Такого рода колебания называют затухающими. Для того чтобы система совершала незатухающие колебания, необходимо пополнять потери энергии извне. Для этого достаточно воздействовать на систему внешней периодически изменяющейся силой. Такую силу



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 57 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

называют вынуждающей силой, а возникающие колебания – вынужденными. Колебания системы, которые происходят только в результате внутренних сил системы (например, сила тяжести для маятника) называют свободными или собственными. Если частота действия внешней вынуждающей силы совпадает с частотой собственных колебаний системы, то амплитуда колебаний резко возрастает. Такое явление называется *резонансом* (от латинского *resonans* – *дающий отзвук*).

Если источник колебаний поместить в среду частицы, которой жестко связаны между собой, то процесс колебаний начнет передаваться от одной точки среды к другой. Такой процесс называется механической волной. Направление распространения волны называется лучом. Если частицы среды колеблются перпендикулярно лучу, то такая волна называется поперечной, если вдоль луча то продольной. Рассмотрим основные характеристики волнового процесса на примере поперечной волны (**рисунок 5.2**). За время Δt волна переместилась вдоль оси Ox на расстояние $v\Delta t$. Такие волны принято называть бегущими.

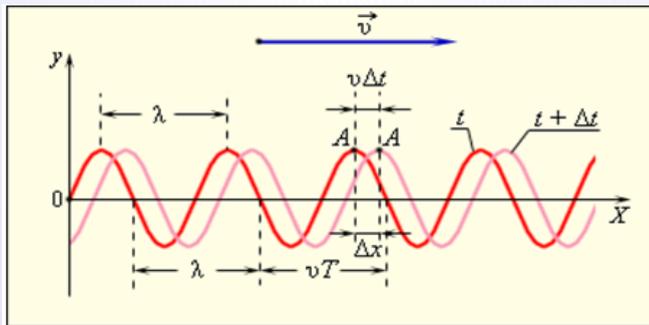


Рисунок 5.2

Длиной волны λ (см. **рисунок 5.2**) называется расстояние между ближайшими точками волны, совершающими колебания в одной фазе (одинаковыми являются все фазы, различающиеся между собой на $2\pi n$, где n – любое целое число).



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 58 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Периодом волны T называется время одного полного колебания ее точек. Очевидно, что длина волны равна расстоянию, на которое распространяется колебание за период T со скоростью v :

$$\lambda = vT \quad (5.10)$$

Так как частота $\nu = 1/T$, то

$$v = \lambda\nu \quad (5.11)$$

Волны, распространяющиеся в любой упругой среде и имеющие частоту в пределах от 20 до $20\ 000$ Гц, называют *звуковыми волнами*, которые воспринимает человеческое ухо.

Упругие волны с частотами, большими 20000 Гц, называются *ультразвуками*, а волны с частотами, меньшими 20 Гц, называются *инфразвуками*.

Основными характеристиками звука являются высота, сила (или интенсивность) и тембр звука.

Физиологическое понятие – *высота звука* определяется частотой звуковых колебаний (физическая характеристика).

С изменением частоты звуковых колебаний высота звука изменяется. Органы слуха воспринимают увеличение частоты как повышение высоты тона (звука) и, наоборот, уменьшение частоты как понижение высоты тона.

Сила (или интенсивность) I звука оценивается той энергией E , которую звуковая волна переносит за время t через поверхность S волны, перпендикулярную направлению распространения звука:

$$I = \frac{E}{St} \quad (5.12)$$

Из этой формулы определяется единица силы звука в СИ: $Вт/м^2$. Так как полная энергия тела, совершающего гармоническое колебательное движение, равна

$$E = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2,$$

то, очевидно, что сила звука пропорциональна квадрату амплитуды.



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 59 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Сила звука является энергетической характеристикой звуковой волны, не зависящей от особенностей слухового аппарата человека. Силу звука мы оцениваем субъективно как громкость звука. Это понятие вводится для того, чтобы учесть различную чувствительность человеческого уха к звуковым волнам различной частоты, даже если они обладают одинаковой мощностью.

Слуховой аппарат человека наиболее чувствителен к звукам средней высоты, т. е. к частотам порядка 10^3 Гц. Минимальная сила звука, воспринимаемая как звуковое ощущение, соответствует *порогу слышимости*. Для различных частот порог слышимости неодинаков. Порог слышимости при частоте 10^3 Гц соответствует силе звука 10^{-12} Вт/м².

При возрастании силы звука выше 10 Вт/м² звуковые ощущения начинают переходить в болевые. Эти значения силы звука соответствуют *порогу болевого ощущения*. В отличие от порога слышимости порог болевого ощущения мало зависит от частоты колебаний. Громкость звука возрастает с увеличением силы звука, но зависимость эта не выражается прямой пропорциональностью. В качестве характеристики интенсивности звука часто выбирают величину, равную

$$\beta = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (5.13)$$

и называемую уровнем силы звука. Здесь I_0 – условно выбранный нулевой уровень, соответствующий 10^{-12} Вт/м². Величина измеряется в децибелах (*дБ*). Порог слышимости – 0 дБ, болевой порог – 130 дБ.

Тембр звука – это оттенок или окраска его. В том случае, когда имеется сложное периодическое движение, то его можно разложить на простые синусоидальные колебания. При этом частоты простых колебаний, например ν_1, ν_2, ν_3 и т. д., будут кратны частоте ν основного колебания. Получающаяся при разложении синусоида с самой низкой частотой соответствует в акустике основному тону, остальные синусоиды соответствуют обертонам (дополнительным тонам). Набор частот колебаний,



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 60 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

присутствующих в данном звуке, называется его *акустическим спектром*. Тембр звука зависит от того, какие обертоны и какой интенсивности входят в состав сложного звука. Так, например, в звучащей струне скрипки, гитары возникают стоячие волны. При этом узлы будут соответствовать концам струны, а пучность – середине ее. Такие волны соответствуют наиболее низкой частоте – основному тону. В этой же струне одновременно возникают волны с тремя, четырьмя и т. д. узлами. Разделенные узлами части струны будут издавать звуки больших частот, но меньшей силы. Следовательно, наряду с основным тоном струна издает обертоны. Для оценки тембра звука имеет значение количество и расположение составляющих частот в акустическом спектре. Если в звуке мало обертонов, то звук оценивается как глухой, пустой, неокрашенный; если сильно выражены первые обертоны – сочный, полный; если сильно выражены высшие составляющие в области $3000-6000 \text{ Гц}$ – пронзительный, металлический, резкий.

Эксперименты, проводившиеся медиками и физиками еще в 40-х гг. XX в., показали, что пребывание человека около 6–10 ч в звуконепроницаемой камере отрицательно сказывается на его двигательной реакции, памяти и самочувствии. Увеличение времени пребывания в камере приводило к серьезным изменениям, требовавшим лечения. Медиками также установлено, что каждый лишний децибел сверх нормы снижает производительность труда, увеличивает риск потери слуха и способствует возникновению сердечно-сосудистых заболеваний. Работая в течение длительного времени при шуме, превышающем 90–100 дБ, человек начинает терять слух, а дети, живущие в шумных районах и занимающиеся в классах с окнами на шумные улицы, менее дисциплинированы. Вредным может оказаться даже неслышимый человеком звук.

Ультразвук обладает главным образом локальным действием на организм, поскольку передается при непосредственном контакте с ультразвуковым инструментом, обрабатываемыми деталями или средами, где возбуждаются ультразвуковые колебания. Ультразвуковые колебания, генерируемые ультразвуком низкочастот-



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 61 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

ным промышленным оборудованием, оказывают неблагоприятное влияние на организм человека. Длительное систематическое воздействие ультразвука, распространяющегося воздушным путем, вызывает изменения нервной, сердечно-сосудистой и эндокринной систем, слухового и вестибулярного анализаторов. Степень выраженности изменений зависит от интенсивности и длительности воздействия ультразвука и усиливается при наличии в спектре высокочастотного шума, при этом присоединяется выраженное снижение слуха. В случае продолжения контакта с ультразвуком указанные расстройства приобретают более стойкий характер. Характер изменений, возникающих в организме под воздействием ультразвука, зависит от дозы воздействия. Малые дозы - уровень звука 80-90 дБ - дают стимулирующий эффект - микромассаж, ускорение обменных процессов. Большие дозы - уровень звука 120 и более дБ - дают поражающий эффект. Исследования биологического действия инфразвука на организм показали, что при уровне от 110 до 150 дБ и более он может вызывать у людей неприятные субъективные ощущения и многочисленные реактивные изменения, к числу которых следует отнести изменения в центральной нервной, сердечно-сосудистой и дыхательной системах, вестибулярном анализаторе. Имеются данные о том, что инфразвук вызывает снижение слуха преимущественно на низких и средних частотах. Выраженность этих изменений зависит от уровня интенсивности инфразвука и длительности действия фактора.

Высокая энергия ультразвука и его способность распространяться прямолинейно обуславливают разнообразные его применения в медицине. *Ультразвуковая диагностика* дает возможность распознавать заболевания мозга (*эхоэнцефалография*), сердца (*эхокардиография*), визуализировать плод во время беременности, исследовать мышцы, суставы и другие внутренние органы, определять их размеры, структуру, наличие патологий (*ультразвуковое исследование*). При необходимости создать изображение какого-либо участка тела пациента используют ультразвуковое сканирование. Для этого используют набор ультразвуковых преобразователей (количество их может достигать 100), на которые последовательно подают электриче-



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 62 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

ские сигналы. Таким образом создается ультразвуковой луч, распространяющийся вдоль того или другого направления. Последовательное зондирование тела на основе сканирующего ультразвукового луча, перемещающегося под разными углами, дает возможность получать информацию относительно разных срезов исследуемого органа. Этот метод получили название *ультразвуковой томографии*. Ультразвуковая диагностика позволяет исследовать динамические процессы в кровеносных сосудах, определять скорость оседания эритроцитов, оценивать сердечную деятельность, следить за течением беременности. *Ультразвуковая терапия* основывается на использовании ультразвука с целью механического, термического и физико-химического действий на клетки и ткани, активизации обменных, иммунных и других процессов. К перспективным использованиям ультразвуковой терапии можно отнести распыление лекарственных препаратов, воздействие на биологически активные точки, ультразвуковую аутогемотерапию, гемолиз эритроцитов, разрушающее действие на микроорганизмы. *Ультразвуковая хирургия* дает возможность разрушать камни в почках, удалять опухоли в мозгу, рассекать ткани, сваривать кости, лечить катаракту. Необходимо отметить возможность объединения хирургических и стоматологических инструментов с ультразвуковыми преобразователями с целью ослабления усилий при рассечении, уменьшении болезненных ощущений. К основным направлениям использования ультразвука в животноводстве следует отнести обработку спермы ультразвуком с целью повышения ее активности во время криоконсервации; стимуляцию молочной железы; определение толщины жировой и мышечной тканей; уничтожение микрофлоры на поверхности яиц перед инкубацией; обработку кормов и повышение питательной ценности кормового сырья; определение содержания жира и белка в молоке; гомогенизацию молока.



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 63 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Вопросы и задания для самоконтроля по разделу «Механика»

1. Что такое вещество?
2. Что такое физическое поле?
3. В чем заключается измерение физической величины?
4. Что такое система единиц?
5. Какое движение называют механическим?
6. Что такое система отсчета?
7. Что такое путь и что такое перемещение?
8. Дайте определение средней и мгновенной скорости.
9. Дайте определение среднего и мгновенного ускорения.
10. Что такое угловая скорость? Угловое ускорение?
11. Сформулируйте три закона Ньютона.
12. Сформулируйте закон сохранения импульса.
13. Запишите закон всемирного тяготения.
14. Что такое вес тела и что такое сила тяжести?
15. Дайте определение механической работы и мощности?
16. Сформулируйте закон сохранения энергии.
17. Что такое давление жидкости?
18. Запишите уравнение Бернулли.
19. Что такое амплитуда колебаний?
20. В чем заключается явление резонанса?
21. Дайте определение длины волны.
22. Что такое звук?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 64 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

Лекция 6. Основные положения молекулярно-кинетической теории

Предмет молекулярной физики. Статистический и термодинамический методы в физике. Размеры и масса атомов и молекул. Агрегатные состояния вещества. Термодинамические параметры. Равновесные процессы для идеального газа. Уравнение состояния идеального газа.

Литература: [1, с. 115–123], [2, с. 80–92].

Молекулярная физика изучает физические свойства макроскопических тел (представляющих собой совокупность большого числа частиц), а также совершающиеся в них физические процессы, обусловленные тепловым движением и взаимодействием микрочастиц (атомов, молекул), составляющих эти тела. При этом используется два метода исследования: *термодинамический* и *статистический*. В первом случае все процессы в макротелах рассматриваются с энергетической точки зрения. Статистический метод оперирует статистическими закономерностями и средними значениями физических величин, характеризующих всю совокупность частиц, например, средние значения скоростей теплового движения молекул и их энергий. Каждый из этих методов нельзя рассматривать изолированно друг от друга.

Представление о том, что все тела построены из мельчайших частиц – атомов, было высказано еще в V в. до н. э. греческим философом Демокритом. Однако атомистические воззрения не получили признания и были возрождены лишь во второй половине XVII в. Бойлем. Затем в XVIII–XIX вв. на основе разработок Ломоносова, Дальтона, Больцмана, Максвелла и других была создана классическая молекулярно-кинетическая теория. Эта теория основана на следующих *основных положениях*:

1. *Все вещества состоят из очень маленьких отдельных частиц – молекул.*

Молекулы в свою очередь состоят из еще более мелких частиц – атомов. Различные комбинации из атомов и создают все множество видов молекул. Атомы также



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 65 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

не являются пределом делимости вещества, а представляют собой весьма сложные образования, состоящие из электрически положительно заряженного ядра, окруженного отрицательно заряженной электронной оболочкой. Однако классическая молекулярно-кинетическая теория не касается вопроса о строении атомов и молекул, рассматривая их упрощенно как твердые частички сферической формы диаметром в среднем порядка $10^{-9} - 10^{-10}$ м. Это означает, что десять миллионов молекул, уложенные вплотную друг к другу вдоль прямой линии, составят молекулярную цепочку длиной всего лишь в $1-10$ мм.

2. Между молекулами тела одновременно действуют силы взаимного притяжения и силы взаимного отталкивания.

Силы межмолекулярного взаимодействия имеют электрическую природу, обусловленную тем, что молекулы состоят из электрически заряженных частиц (положительных – атомных ядер и отрицательных – электронов), которым, как известно, свойственно притяжение – для разноименно заряженных и отталкивание – для одноименно заряженных частиц. Наличие сил притяжения и отталкивания между молекулами отчетливо обнаруживается в свойстве твердых сохранять свою форму при деформации.

3. Молекулы, образующие тело, находятся в состоянии непрерывного беспорядочного движения.

При этом они сталкиваются друг с другом и изменяют свою скорость, как по направлению, так и по величине. Правда, столкновения в обычном смысле этого слова не происходит, так как соприкосновению молекул препятствуют резко возрастающие при их сближении силы отталкивания.

Скорость движения молекул в теле связана с его температурой: чем больше эта скорость, тем выше температура тела, поэтому хаотическое движение молекул также называют *тепловым движением*. Именно хаотичным движением молекул объясняется явление *диффузии* (от латинского *diffusio* – распространение) – перемешивание молекул различных веществ (например, распространение запаха духов в комнате).



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 66 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Одним из первых подтверждений теплового движения молекул является так называемое *броуновское движение*. В 1827 году английский ботаник Броун, исследуя под микроскопом жидкие препараты, обнаружил, что частицы цветочной пыльцы, взвешенные в воде, совершали быстрые беспорядочные движения. Это движение объясняется тем, что в силу хаотичности движения молекул воды с разных сторон в броуновскую частицу ударяет разное количество молекул, поэтому частица (размеры броуновской частицы лишь в сотни раз больше размеров молекул воды) буквально мечется в разные стороны в поле зрения микроскопа. По мере увеличения интенсивности теплового движения среднее расстояние между молекулами возрастает, а силы сцепления уменьшаются. Этому процессу соответствует переход тела из твердого состояния в жидкое. При достаточно интенсивном тепловом движении среднее расстояние между молекулами может стать настолько большим, что силы сцепления между ними практически перестанут действовать. При этом тело перейдет в газообразное состояние. Таким образом, от интенсивности теплового движения молекул и от внешних условий зависит, в каком из трех возможных агрегатных состояний находится вещество: твердом, жидком или газообразном. Макроскопическая система может находиться в различных состояниях, отличающихся температурой, давлением, плотностью, объемом и т. д. Подобные величины, характеризующие состояние тела и которые можно измерять опытным путем называют параметрами состояния. Понятия давления и плотности были рассмотрены в разделе «Основы механики». Остановимся кратко на понятии температуры. В первом приближении температуру можно определить как величину характеризующую степень нагретости тел (конкретный физический смысл температуры будет рассмотрен несколько позже). В быту используется температура, отсчитанная по *шкале Цельсия*. Нулевой точкой на шкале Цельсия служит температура таяния льда при нормальном давлении ($0^{\circ}C$), а температура $100^{\circ}C$ соответствует температуре кипения воды при тех же условиях. В физике пользуются *термодинамической температурой*. Единица



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 67 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

термодинамической температуры – кельвин (K). *Термодинамическая (абсолютная) температура T* связана с температурой t по шкале Цельсия соотношением

$$T = t + 273,15 \quad (6.1)$$

Температура, равная $0 K$, называется абсолютным нулем температуры.

При нормальных условиях, а именно при температуре $273,15 K$ и давлении в 1 атм. , в 1 см^3 газа находится около 10^{19} молекул и среднее расстояние между ними составляет приблизительно 10 нм. Взаимодействие молекул становится существенным лишь при расстояниях менее 1 нм. Это позволяет при решении многих задач использовать модель газа, получившего название идеального. Газ называется *идеальным*, если взаимодействием между его молекулами можно пренебречь (размеры молекул не учитываются; между молекулами не действуют силы взаимного притяжения; столкновения молекул происходят как столкновения упругих шаров). Очень близки по своим свойствам к идеальному газу гелий и водород, а также разреженные газы при не очень низких температурах. Для таких газов справедливы законы открытые опытным путем еще до появления молекулярно – кинетической теории. При переходе газа из одного состояния в другое его параметры (P, V, T) изменяются. В том случае, когда в ходе такого процесса один из параметров состояния (при неизменной массе) остается постоянным, такой процесс называют *изопроцессом*.

Изотермический процесс протекает при постоянной температуре ($T = \text{const}$) и описывается законом Бойля – Мариотта: для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления газа на его объем есть величина постоянная

$$PV = \text{const} \quad (6.2)$$



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 68 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

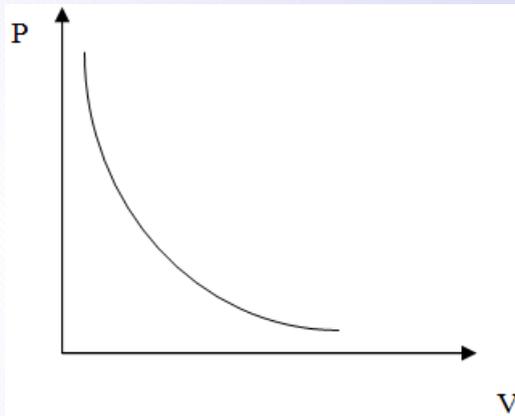


Рисунок 6.1

Эта кривая носит название *изотермы*.

Изобарический процесс протекает при постоянном давлении ($p = const$) и подчиняется закону Гей-Люссака: объем данной массы при постоянном давлении возрастает линейно с ростом температуры

$$V = V_0(1 + \alpha t), \quad (6.3)$$

где V_0 – объем при $0^\circ C$, V – объем при температуре t , α – термический коэффициент объемного расширения

$$\alpha = \frac{1}{273,15} \text{град}^{-1}$$



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 69 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Графически закон Гей-Люссака имеет следующий вид

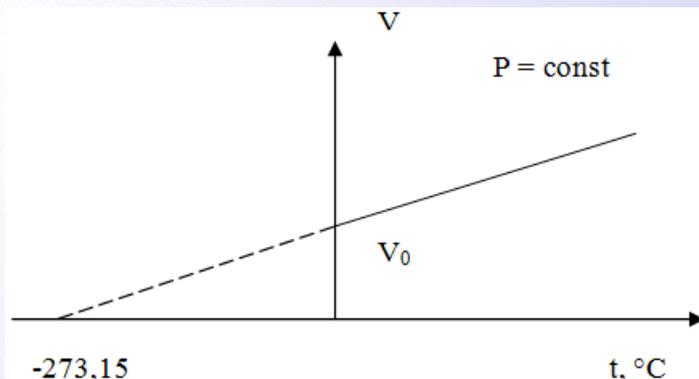


Рисунок 6.2

Пунктирная линия на графике означает, что экспериментальные газовые законы неприменимы в области низких температур.

При низких температурах вещество переходит в жидкое или твердое состояние. Введя абсолютную температуру T можно представить формулу (6.3) в другом виде

$$\frac{V}{T} = const \quad (6.4)$$

Изохорический процесс протекает при постоянном объеме ($V = const$) и описывается законом Шарля: давление данной массы газа при постоянном объеме возрастает линейно с ростом температуры

$$p = p_0(1 + \gamma t), \quad (6.5)$$

где p_0 – давление при 0°C , p – давление при температуре t , γ – термический коэффициент давления. Для идеального газа $\gamma = \alpha$. График изохорического процесса,



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 70 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

только в координатах V и t , аналогичен графику изобарического процесса. Введя абсолютную температуру T можно представить формулу (6.5) в виде

$$\frac{P}{T} = const \quad (6.6)$$

Рассмотрим самый общий случай газового процесса, когда одновременно изменяются и объем, и давление, и температура. Закон, описывающий такого рода процесс, был установлен в 1834 г. французским физиком Клайпероном путем объединения экспериментальных газовых законов и имеет следующий вид

$$\frac{PV}{T} = C = const, \quad (6.7)$$

где C – постоянная величина, называемая *газовой постоянной*. Это значит, что для данной массы газа величина PV/T остается неизменной. Недостатком уравнения Клайперона является тот факт, что постоянная C различна для разных газов. Менделеев усовершенствовал закон Клайперона, используя закон Авогадро (установлен в 1811 г. итальянским ученым Авогадро), который гласит, что *при одинаковых температуре и давлении моли любых газов занимают одинаковые объемы*. Полученное Менделеевым выражение получило название *уравнение Клайперона – Менделеева* или *уравнение состояния идеального газа* и имеет вид

$$PV = \frac{m}{M}RT, \quad (6.8)$$

где M – молярная масса газа, $R = 8,32$ Дж/(К·моль) – *универсальная газовая постоянная*. R одинакова для всех газов. *Универсальная газовая постоянная численно равна работе при изобарическом расширении 1 моля газа вследствие нагревания его на один градус (физический смысл).*



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 71 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Лекция 7. Основы молекулярно-кинетической теории идеальных газов

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории. Температура. Барометрическая формула. Распределение Больцмана. Среднее число столкновений. Средняя длина свободного пробега. Явления переноса. Диффузия. Вязкость. Теплопроводность. Связь между коэффициентами диффузии, вязкости и теплопроводности. Диффузионные процессы в биологии.

Литература: [1, с. 143–161], [2, с. 94–105].

С точки зрения молекулярно-кинетической теории газ представляет множество хаотически движущихся молекул. В процессе движения молекулы газа ударяются об стенки сосуда (действуют на стенки с некоторой силой). Рассчитанная на единицу площади стенки эта сила представляет собой давление газа. Сила удара зависит от скорости молекул, а, следовательно, давление газа является функцией кинетической энергии его молекул. Данная зависимость была выведена в 50-х годах XIX века немецким физиком Клаузиусом и получила название *основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа*:

$$p = \frac{2}{3}n\bar{E}_k, \quad (7.1)$$

где p – давление газа, n – концентрация молекул газа, \bar{E}_k – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа. Воспользовавшись уравнением Клайперона-Менделеева можно получить следующее выражение

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2}kT, \quad (7.2)$$

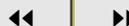
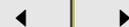
где $k = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана. Из формулы (7.2) следует, что термодинамическая температура есть величина, пропорциональная средней



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 72 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа. Таким образом, абсолютная температура является мерой средней кинетической энергии поступательного движения молекул газа (*физический смысл температуры*). Подставив (7.2) в (7.1) получим, что

$$p = nkT \quad (7.3)$$

Из этого выражения находим, что

$$n = \frac{p}{kT} \quad (7.4)$$

Из формулы (7.4) видно, что при одинаковых температуре и давлении все газы содержат в единице объема одинаковое число молекул. Так, например, при нормальных условиях в 1 м^3 газа содержится число молекул $n = 2,69 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ (*число Лошмидта*).

Самый важный для человека газ – это воздух. Земля окружена атмосферой – слоем воздуха состоящего из смеси различных газов. Атмосфера удерживается около Земли силами тяготения и оказывает давление на все тела, которые она окружает. Высота атмосферы около 100 км (выше невозможны полеты самолета). Масса атмосферы составляет около $5 \cdot 10^{15}$ тонн. Давление воздуха на уровне моря во всех пунктах земной поверхности равно приблизительно 10^5 Па и меняется в зависимости от различных процессов, происходящих в атмосфере. Давление атмосферы убывает с высотой по нелинейному (экспоненциальному) закону. Это объясняется тем, что с ростом высоты уменьшается не только вес столба воздуха, но и его плотность. Данная зависимость описывается барометрической формулой

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}, \quad (7.5)$$

где p_0 – давление атмосферы на уровне моря ($h = 0$), p – давление на высоте h , M – молярная масса воздуха, g – ускорение свободного падения, T – температура,



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 73 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

R – универсальная газовая постоянная. Атмосферное давление измеряют при помощи барометров.

Во всех органах и клетках постоянно происходит разрушение углеводов, белков и жиров, причем распад этих веществ почти всегда связан с окислением. При окислении поглощается кислород и образуется углекислый газ. Обмен этими газами между организмом и окружающей средой происходит в легких при дыхании.

При вдохе, когда грудная клетка расширяется, воздух «засасывается» в легкие. Сначала вдыхаемый воздух поступает в носовую полость, где согревается, увлажняется и очищается от пыли; поэтому очень важно дышать носом, а не ртом. Затем воздух переходит в носоглотку и гортань. Продолжением гортани служит дыхательное горло-трахея, которая представляет собой трубку длиной примерно 12 см. От трахеи отходят еще две трубки-главные бронхи, идущие к обоим легким. В этих дыхательных путях выделяется слизь, которая задерживает поступающую с воздухом пыль. Кроме того, в гортани, трахее и бронхах имеются мерцательные реснички, своими постоянными движениями способствующие удалению пыли и других постоянных частиц.

Бронхи разветвляются в легких на более мелкие трубочки, заканчивающиеся тонкостенными легочными пузырьками, или альвеолами. Количество их достигает нескольких миллионов. В них-то и попадает, в конце концов, воздух. Во время каждого вдоха при спокойном дыхании до легочных альвеол доходит 300-400 мл воздуха. При усиленном дыхании в легкие поступает воздуха в несколько раз больше.

Легочные пузырьки оплетены многочисленными капиллярами - мельчайшими кровеносными сосудами, которые можно видеть только с помощью микроскопа. Толщина стенки легочных пузырьков и легочных капилляров измеряется ничтожными долями миллиметра. Молекулы кислорода легко проникают из воздуха, содержащегося в легочных пузырьках, в кровь. Вот почему выдыхаемый воздух содержит около 17 % кислорода, т. е. на 4 % меньше, чем вдыхаемый воздух.

Следовательно, в легких кровь обогащается кислородом. Одновременно из крови в воздух легочных альвеол поступает углекислый газ. Если во вдыхаемом воздухе



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 74 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

имеются лишь следы углекислого газа (0,03 %), то в выдыхаемом воздухе его содержится около 3,5 %. Кроме того, за сутки через легкие выделяется из организма около 0,3-0,4 л воды. В выдыхаемом воздухе всегда много водяных паров. Поэтому в холодный день во время выдоха видны клубы водяных паров около ноздрей и рта. Эти водяные пары, попав из теплых легких в холодную атмосферу, превращаются в мелкие капельки воды. То же происходит, если дышать на холодное стекло: на нем появляется налет влаги, оно «запотевает».

Используя соотношения: $p = nkt$, $M = m_0N_A$, $R = kN_A$, формулу (7.5) можно записать в виде:

$$n = n_0 e^{-\frac{m_0gh}{kT}}, \quad (7.6)$$

т. к. $m_0gh = E_{\text{п}}$, потенциальная энергия молекулы в поле тяготения, следовательно

$$n = n_0 e^{-\frac{E_{\text{п}}}{kT}}, \quad (7.7)$$

Такое распределение называют распределением Больцмана (распределение частиц по значениям потенциальной энергии). Из него следует, что при постоянной температуре плотность газа больше там, где меньше потенциальная энергия его молекул.

Ввиду хаотичности теплового движения траектория движения молекул представляет собой ломаную линию. Длинной свободного пробега называется путь проходимый ею между двумя последовательными столкновениями. Длина свободного пробега все время меняется. Поэтому следует говорить о *средней длине свободного пробега* (λ) как о среднем пути, проходимом молекулой между двумя последовательными столкновениями. Минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул, называется *эффективным диаметром молекулы* (d). Так как за одну секунду молекула проходит путь равный по величине средней арифметической скорости ($v_{\text{ср}}$) и если z – среднее число столкновений испытываемых одной молекулой за 1 с, то средняя длина свободного пробега:

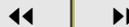
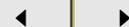
$$\lambda = \frac{v_{\text{ср}}}{z}; \quad (7.8)$$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 75 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

можно показать, что

$$z = \sqrt{2\pi d^2 n} \vartheta_{\text{ср}}, \quad (7.9)$$

где n – концентрация молекул, откуда

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2\pi d^2 n}} \quad (7.10)$$

В реальных биологических системах совершаются процессы, сопровождаемые *диссипацией* энергии, переходом части энергии упорядоченного процесса в энергию неупорядоченного процесса, например, в теплоту. *Явлениями переноса* называются процессы, в которых происходит пространственный перенос массы (*диффузия*), импульса (*внутреннее трение*) и энергии (*теплопроводность*).

Явление диффузии заключается в том, что происходит самопроизвольное проникновение и перемешивание частиц двух соприкасающихся газов, жидкостей или твердых тел. Диффузия ведет к обмену частицами (перенос масс), между этими телами. Возникает и продолжается пока существует *градиент* плотности. Диффузия для однородного газа описывается законом Фика:

$$J_m = -D \frac{d\rho}{dx}, \quad (7.11)$$

где J_m – плотность потока массы (масса вещества, диффундирующего в единицу времени, через единичную площадку, перпендикулярную оси x , указывающей направление переноса; $D = \frac{1}{3} \vartheta_{\text{ср}} \lambda$ – коэффициент диффузии; $\frac{d\rho}{dx}$ – градиент плотности, равный скорости изменения плотности на единицу длины x в направлении нормали к этой площадке. Диффузия играет важную роль в процессах жизнедеятельности животных, растений, в том числе микроорганизмов. Диффузия способствует впитыванию корнями растений питательных веществ; у человека и животных с помощью диффузии кислород из легких поступает в кровь, из крови – в ткани; из кишечника всасываются продукты пищеварения и т. д. Благодаря явлению диффузии нижний



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 76 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

слой атмосферы – тропосфера – состоит из смеси газов: азота, кислорода, углекислого газа и паров воды. При отсутствии диффузии произошло бы расслоение под действием силы тяжести: внизу оказался бы слой тяжёлого углекислого газа, над ним – кислород, выше – азот и инертные газы. Коэффициент диффузии D зависит от природы и молекулярной массы вещества и растворителя. В случае диффузии через клеточную мембрану коэффициент диффузии характеризует скорость поступления молекул вещества в цитоплазму (жидкое вещество клетки). Направление потока частиц и градиента концентрации (направленного в сторону возрастания концентрации) противоположны; именно поэтому в последней формуле присутствует знак «минус».

Идеальная жидкость, т. е. жидкость без внутреннего трения, является абстракцией. Всем реальным жидкостям и газам присуще *внутреннее трение*, называемое *вязкостью*. Именно наличие вязкости объясняет тот факт, что при течении по трубе слои жидкости скользят один по другому, перемещаясь с разными скоростями.

Причем наибольшая скорость наблюдается вдоль оси трубы, а наименьшая у слоев, прилегающих к стенкам трубы (рисунок 7.1).

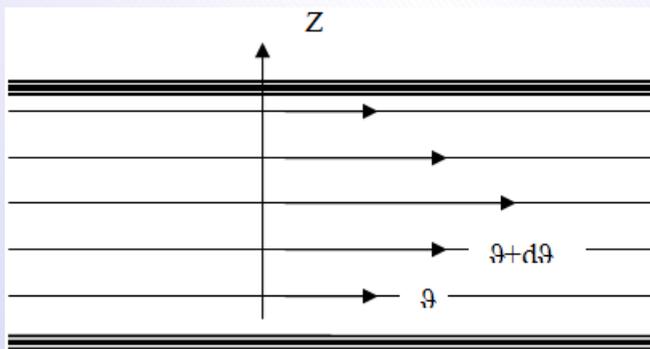


Рисунок 7.1



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 77 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Ньютон установил, что сила трения между слоями жидкости, движущимися с различными скоростями, зависит от площади соприкосновения слоев S и от быстроты, с которой меняется скорость при переходе от одного слоя к другому в направлении z перпендикулярном оси трубы

$$F = \eta \frac{d\vartheta}{dz} S, \quad (7.12)$$

где $\eta = \frac{1}{3}\rho\vartheta_{\text{ср}}\lambda$ – *динамический коэффициент вязкости*, зависящий от рода жидкости (газа) и температуры. Единицей измерения коэффициента вязкости в СИ является

$$1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}} \quad (7.13)$$

Поток вязкой жидкости (газа) может быть ламинарным или турбулентным. В случае *ламинарного* (слоистого) течения каждый слой потока перемещается, не перемешиваясь с другими слоями. При *турбулентном* (вихревом) течении происходит образование вихрей и перемешивание различных слоев жидкости или газа. С увеличением скорости потока ламинарное течение может перейти в турбулентное, и скорость, при которой происходит этот переход, называется *критической*.

Экспериментально установлено, что важнейшей характеристикой течения является безразмерная величина, равная

$$Re = \frac{\rho\vartheta l}{\eta}, \quad (7.14)$$

где ρ – плотность жидкости (газа), ϑ – средняя (по сечению трубы) скорость потока, l – линейный размер, характерный для поперечного сечения трубы (например диаметр при круглом сечении трубы), η – коэффициент вязкости жидкости (динамическая вязкость).

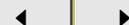
Величина Re называется *числом Рейнольдса*. При малых значениях числа Рейнольдса наблюдается ламинарное течение; при $Re > Re_{\text{кр}}$ (критическое значение)



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 78 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

ламинарное течение переходит в турбулентное. Для гладких круглых труб (если в качестве l взять диаметр трубы) $Re_{кр} = 2000$.

Если в одной области газа средняя кинетическая энергия молекул больше, чем в другой, то с течением времени, в результате постоянных столкновений молекул происходит выравнивание их кинетических энергий – выравнивание температур. Такой процесс переноса энергии называется *теплопроводностью* и описывается законом Фурье:

$$J_E = -\gamma \frac{dT}{dx}, \quad (7.15)$$

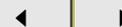
где J_E – плотность теплового потока (тепловая энергия переносимая в единицу времени, через единичную площадку, перпендикулярную оси x , указывающей направление переноса; $\gamma = \frac{1}{3}c\rho\vartheta_{ср}\lambda$ – коэффициент теплопроводности; ρ – плотность газа; c – удельная теплоемкость при постоянном объеме; $\frac{dT}{dx}$ – градиент температуры, равный скорости изменения температуры на единицу длины x в направлении нормали к этой площадке.



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 79 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лекция 8. Основы термодинамики

Внутренняя энергия. Распределение энергии по степеням свободы. Теплота и работа. Теплоемкость газов. Первое начало термодинамики. Работа и теплоемкость газов в различных изопроцессах. Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона. Обратимые и необратимые процессы. Циклические процессы. Понятие об энтропии. Второе начало термодинамики. Энтропия биологических систем.

Литература: [2, с. 223–240], [2, с. 114–131].

Законы термодинамики применяются к так называемой *термодинамической системе*, под которой понимается макроскопическое тело (тело, состоящее из большого числа частиц) или группа макроскопических тел, которой свойственны процессы, сопровождающиеся переходом теплоты в другие виды энергии и наоборот. Примером термодинамической системы может служить, например газ под поршнем, организм человека, животных и т. д. Термодинамическая система обладает кинетической энергией системы как целого E_k , потенциальной энергией обусловленной наличием поля внешних сил $E_{\text{п}}$ (например, гравитационного поля Земли) и *внутренней энергией* U . Таким образом, полная энергия термодинамической системы:

$$E = E_k + E_{\text{п}} + U \quad (8.1)$$

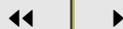
Внутренняя энергия складывается из кинетической энергии хаотического движения молекул, потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия, энергии колебательного движения атомов, энергии электронных оболочек атомов. Внутренняя энергия системы является функцией ее параметров состояния P, V, T . Внутренняя энергия – однозначная функция термодинамического состояния системы – в каждом состоянии система обладает вполне определенной внутренней энергией. При переходе системы из одного состояния в другое *изменение внутренней энер-*



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 80 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

гипс ΔU определяется только разностью значений внутренней энергии этих состояний и не зависит от пути перехода. При совершении системой произвольного процесса, в результате которого она вновь возвращается в исходное состояние, полное изменение внутренней энергии равно нулю.

Для описания макроскопических систем необходимо учитывать, сколько и каких степеней свободы вовлечено в процессы обмена энергией. Число степеней свободы (i) – это число независимых переменных полностью определяющих положение системы в пространстве. Так, например одноатомная молекула обладает тремя поступательными степенями свободы (может двигаться вдоль оси x , y или z). Двухатомная молекула обладает шестью степенями свободы: три степени свободы поступательного движения, две степени свободы вращательного движения вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, которые также перпендикулярны линии, соединяющей атомы в молекуле, а также одна степень колебательного движения атомов вдоль этой линии.

Справедлив закон *Больцмана*: для системы находящейся в состоянии термодинамического равновесия на каждую поступательную и вращательную степень свободы приходится в среднем кинетическая энергия равная $\frac{kT}{2}$, а на каждую колебательную степень свободы энергия в два раза больше. Таким образом, средняя энергия молекулы $\varepsilon_{cp} = \frac{i}{2}kT$, где $i = i_{пост} + i_{вращ} + 2i_{кол}$.

В классической теории рассматривают молекулы с жесткой связью между атомами и колебательные степени не учитывают и $i = i_{пост} + i_{вращ}$.

Внутренняя энергия произвольной массы газа определяется выражением:

$$U = \nu \varepsilon_{cp} N_A = \frac{m}{M} \frac{i}{2} RT, \quad (8.2)$$

где $\nu = \frac{m}{M}$ – число молей.

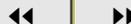
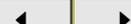
Изменение состояния системы тел обусловлено передачей энергии от одного тела системы к другому. Передача энергии может происходить либо в форме механической работы A , либо в форме теплоты Q . Работа есть мера механической энергии,



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 81 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

переданной от одного тела к другому. Совершение работы всегда сопровождается перемещением тела или его частей. Сообщение теплоты не связано с перемещением тел, а обусловлено тем, что отдельные молекулы более нагретого тела передают свою кинетическую энергию молекулам менее нагретого тела в процессе *теплообмена*. К теплообмену относятся: теплопроводность, конвекция, тепловое излучение.

Теплопроводность – передача теплоты от более нагретого тела к менее нагретому телу при соприкосновении этих тел.

Конвекция – перенос теплоты потоком движущейся жидкости или газа из одних областей занимаемого ими объема в другие.

Теплота и работа как две формы передачи энергии тесно связаны друг с другом. Теплота может переходить в работу и, наоборот, работа в теплоту. В СИ работа и теплота измеряются в одинаковых единицах – *джоулях (Дж)*. Внесистемная единица измерения количества теплоты *калория (кал)*. $1 \text{ кал} = 4,18 \text{ Дж}$. Количество теплоты (Q), переданное телу или отданное телом, определяется по формуле

$$Q = C\Delta T = C\Delta t, \quad (8.3)$$

где C – физическая величина, получившая название *теплоемкость*. *Теплоемкость* – количество теплоты, которое необходимо сообщить телу (забрать у тела) для изменения его температуры на один градус. Единица измерения теплоемкости – *Дж/град*. Теплоемкость тела:

$$C = ct, \quad (8.4)$$

где t – масса тела, c – удельная теплоемкость. *Удельная теплоемкость* – количество теплоты необходимое для изменения температуры единицы массы данного вещества на один градус. Единица измерения удельной теплоемкости – *Дж/кг·град*. Помимо этого выделяют еще *молярную теплоемкость* (C_M) – теплоемкость одного моля вещества.

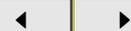
Одним из основных законов термодинамики является *первое начало (закон) термодинамики*, который гласит: *количество теплоты, сообщенное системе, расходу-*



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 82 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

ется на изменение ее внутренней энергии и на совершение работы системой против внешних сил:

$$Q = \Delta U + A \quad (8.5)$$

Данный закон выражает закон сохранения энергии, согласно которому энергия любой изолированной системы остается постоянной. В дифференциальной форме он имеет следующий вид:

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (8.6)$$

где dU – бесконечно малое приращение внутренней энергии системы, δQ – элементарное количество теплоты, δA – элементарная работа. Знак δ означает, что работа и теплота, в отличие от внутренней энергии, не являются функциями состояния термодинамической системы (не являются полными дифференциалами).

Первый закон термодинамики запрещает существование вечного двигателя первого рода, воображаемого механизма, который совершал бы работу, превышающую получаемую им энергию. Действительно, двигатель это система, периодически возвращающаяся в исходное состояние. Для такой системы изменение ее внутренней энергии $\Delta U = 0$. Тогда, согласно первому закону термодинамики (8.5) $A = Q$.

Если находящийся под поршнем в цилиндрическом сосуде, газ, расширяясь перемещает поршень на расстояние dl , то производит над ним работу $\delta A = Fdl = PSdl = PdV$, где S – площадь поршня, P – давление газа (рис. 8.1)

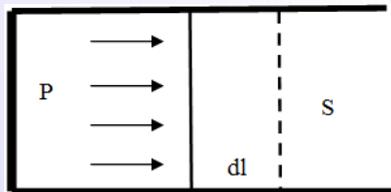


Рисунок 8.1



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 83 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Полная работа A , совершаемая газом при изменении его объема от V_1 до V_2 :

$$A = \int_{V_1}^{V_2} PdV \quad (8.7)$$

Количество теплоты, получаемое телом, зависит от способа передачи этого количества теплоты. Поэтому различают теплоемкости (удельную и молярную) при постоянном давлении (c_p и C_p) и при постоянном объеме (c_v и C_v).

Используя первый закон термодинамики можно получить, что молярная теплоемкость при постоянном объеме:

$$C_v = \frac{i}{2}R \quad (8.8)$$

В изобарическом процессе подведенное тепло идет на изменение внутренней энергии газа и совершении газом работы при его расширении. Поэтому молярная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении больше молярной теплоемкости при постоянном объеме на величину работы совершаемой при увеличении температуры на один градус, т. е. на R (*уравнение Майера*):

$$C_p = C_v + R, \quad (8.9)$$

тогда

$$C_p = \frac{i}{2}R + R = \frac{i+2}{2}R \quad (8.10)$$

При рассмотрении термодинамических процессов важную роль играет величина

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}, \quad (8.11)$$

которая называется *коэффициентом Пуассона*.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 84 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Одной из моделей реального физического процесса является *адиабатический процесс* (от греческого слова *адиабатос* – *непереходимый*). Адиабатическими называются процессы, происходящие при отсутствии теплообмена между системой и окружающей средой. В этом случае в выражении для первого закона термодинамики $\delta Q = 0$. Для осуществления адиабатических процессов необходима абсолютная теплоизоляция системы от окружающей среды. В природе нет абсолютных теплоизоляторов. Поэтому реальные процессы могут только быть близкими к адиабатическим. К таким процессам можно отнести, например, взрыв, распространение звука, цикл двигателя внутреннего сгорания.

Адиабатический процесс описывается уравнением Пуассона:

$$PV^\gamma = const \quad (8.12)$$

Равновесным состоянием системы называют такое состояние, при котором параметры системы имеют определенные значения, остающиеся без изменения сколь угодно долго. Пусть некая система переходит из состояния 1 с параметрами P_1, V_1, T_1 в состояние 2 с параметрами P_2, V_2, T_2 (рисунок 8.2).

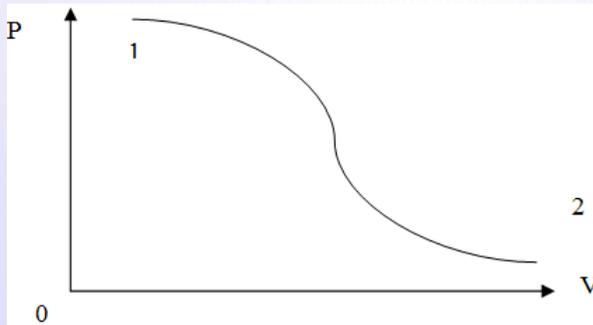


Рисунок 8.2



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 85 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 86 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Процесс перехода системы из состояния 1 в состояние 2 называется *обратимым*, если возможен процесс перехода системы из 2 в 1, при котором система, пройдя последовательно, но в обратном порядке, через все состояния первого процесса вернется в исходное состояние 1. При этом ни в системе, ни в окружающей среде не останется никаких изменений. В противном случае процесс называется *необратимым*. В природе нет обратимых процессов. Все реальные процессы необратимы, так как они сопровождаются теплопроводностью, трением и т. д. Обратимые процессы – понятие идеализированное. Однако их изучение представляет определенный интерес, поскольку в целом ряде конкретных задач реальные процессы с большой степенью точности можно рассматривать как обратимые.

Положение о необратимости процессов в природе представляет собой общее выражение второго закона термодинамики. Более конкретную формулировку второго закона термодинамики можно получить из рассмотрения, так называемого *цикла Карно*.

Предварительно необходимо рассмотреть понятие кругового процесса (цикла). *Круговым процессом*, или *циклом*, называется процесс, в результате которого система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное состояние. На графике круговой процесс изобразится замкнутой кривой линией (**рисунок 8.3**).

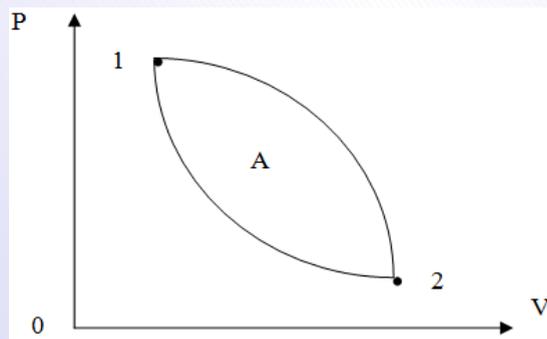


Рисунок 8.3

При этом работа A , совершаемая в ходе цикла, численно равна площади ограниченной данной замкнутой линией.

В 1824 году французский инженер Сади Карно теоретически рассмотрел работу идеальной тепловой машины, состоящей из одного моля идеального газа (рабочее тело), заключенного в цилиндр под поршнем, нагревателя и холодильника. Во время цикла Карно процесс протекает без трения, лучеиспускания и т. д., т. е. без необратимых потерь. Цикл Карно ограничен двумя изотермами и двумя адиабатами (рисунок 8.4).

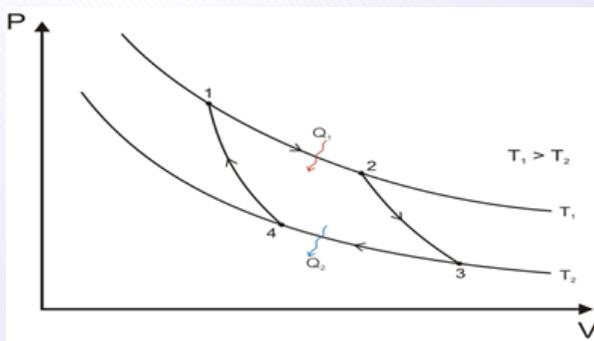


Рисунок 8.4

В точке 1 рабочее тело приводится в контакт с нагревателем при температуре нагревателя T_1 и изотермически расширяется (процесс $1 \rightarrow 2$). В точке 2 нагреватель убирают, и газ адиабатно расширяется (процесс $2 \rightarrow 3$). В точке 3 газ приводят в контакт с холодильником, который имеет температуру T_2 ($T_2 < T_1$) после чего рабочее тело изотермически (процесс $3 \rightarrow 4$) и потом адиабатно (процесс $4 \rightarrow 1$) сжимается. В результате цикла газ, получив количество теплоты Q_1 от нагревателя и передав часть этого количества теплоты Q_2 холодильнику, совершает работу, равную

$$A = Q_1 - Q_2 \quad (8.13)$$



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 87 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Зададимся вопросом: может ли тепловая машина превращать всю получаемую теплоту в работу, не отдавая части теплоты холодильнику? В этом случае, рассматриваемый процесс принимает вид: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$. Площадь, ограничиваемая такой кривой, а, следовательно, и совершаемая работа будут равны 0. Таким образом, отдача части теплоты холодильнику является необходимым условием совершения работы. Но тогда

$$A < Q_1 \quad (8.14)$$

Следовательно, невозможен механизм, который бы всю теплоту, получаемую от нагревателя, превращал в работу. Так называемый вечный двигатель второго рода невозможен. Это утверждение является еще одной формулировкой второго закона термодинамики. Более обобщенная, современная формулировка *второго начала термодинамики* имеет следующий вид: *в природе невозможен такой циклический процесс, единственным результатом которого было бы превращение теплоты, получаемой системой от нагревателя или окружающей среды в работу.*

Коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины η рассчитывается по формуле

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (8.15)$$

Очевидно, что даже для идеальной тепловой машины $\eta < 1$, а реальные системы имеют к.п.д. еще меньше.

Наряду с энергией в термодинамике важной характеристикой состояния системы является *энтропия* (в переводе с греческого обращенная внутрь, недоступная для дальнейших превращений). Понятие энтропии было введено в 1865 г. Клаузиусом. *Энтропия* S – скалярная физическая величина, характеризующая направленность процессов, происходящих в макросистемах. Она зависит только от состояния систе-



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 88 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

мы и не зависит от пути, каким система пришла в это состояние. Причем полный дифференциал функции S

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (8.16)$$

где δQ – количество теплоты, переданное системе, T – температура тела.

Клаузиусом были получены следующие важные положения. Если в изолированной системе происходят обратимые процессы, то ее энтропия остается неизменной. Если в изолированной системе происходят необратимые процессы, то ее энтропия возрастает. Математически это записывается в виде:

$$\Delta S \geq 0 \quad (8.17)$$

Так как все реальные процессы необратимы, то *возможны лишь такие процессы, которые ведут к увеличению энтропии изолированной системы* (еще одна формулировка второго закона термодинамики). Второй закон термодинамики определяет направление процессов: естественные процессы протекают в сторону увеличения энтропии, происходит рассеивание энергии. Естественные процессы направлены к состоянию равновесия, которому соответствует максимальное значение энтропии. Все виды энергии (механическая, электрическая, световая и т. д.) *самопроизвольно* и притом полностью переходят в теплоту, тогда как для теплоты такие превращения не имеют места. При этом с ростом энтропии происходит «обесценивание» энергии. Потеря ею способности к дальнейшим самопроизвольным превращениям в другие виды энергии.

Поскольку теплоте присущ наиболее беспорядочный характер движения материи (хаотическое движение молекул), можно сказать, что возрастание энтропии соответствует увеличению беспорядка в состоянии системы. В этом смысле энтропию можно рассматривать как *меру беспорядка состояния системы*.

Австрийский физик Больцман первым перекинул «мостик» между вторым началом термодинамики и теорией вероятностей, связав энтропию с понятием вероятно-



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 89 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

сти состояния статистических систем. По утверждению Больцмана, возрастание энтропии при необратимых процессах является следствием перехода системы от менее вероятных состояний системы к более вероятным. Состояние термодинамического равновесия выступает как наиболее вероятное из всех возможных состояний. Это утверждение математически выражается формулой

$$S = k \ln W, \quad (8.18)$$

где S – энтропия, k – постоянная Больцмана, W – число различных способов задания микросостояний, с помощью которых можно реализовать данное макросостояние системы.

Необходимо отметить, что второй закон термодинамики не является таким же всеобъемлющим и универсальным законом, как первый. Он может быть применен только к изолированным системам конечных размеров.

Среди термодинамических функций, характеризующих энергетическое состояние биологического объекта, исключительно важное место принадлежит энтропии. Живой организм – это, прежде всего, энергетическая система, где действуют те же законы термодинамики, что и в неживой природе. Следует, однако, учесть, что живые организмы характеризуются некоторыми особенностями, которые отсутствуют у физических объектов. Это, как известно, размножение, развитие и т. д. Поэтому энергетический обмен таких систем обладает качественным своеобразием и требует специального анализа. В биосистемах протекают самые разные энергетические процессы: дыхание, фотосинтез, мышечное сокращение, транспорт веществ и т. д. Однако при всем качественном разнообразии эти процессы можно свести к двум типам: обратимые и необратимые.

Особенностью биосистем (как и всех реальных систем) является то, что в них нет обратимых процессов. Все процессы, которые в них протекают, носят необратимый характер, то есть сопровождаются увеличением энтропии. Следовательно, в биосистемах не вся затрачиваемая при данном процессе свободная энергия (то



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 90 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

есть та энергия системы, за счет которой может совершаться работа при постоянной температуре) переходит в полезную работу. Часть ее рассеивается в виде тепла. Отношение количества совершенной работы к количеству затраченной на нее свободной энергии называется коэффициентом полезного действия биологического процесса. Так, мышечное сокращение совершается с КПД $\sim 30\%$, гликолиз $\sim 36\%$ и т. д. Как видим, потери свободной энергии при этих процессах весьма велики. Встречаются, однако, и такие процессы, которые близки к обратимым, то есть КПД которых высок. Например, свечение некоторых тропических насекомых имеет КПД 98–99 %, разряд электрических рыб – 98 %. Причина такого высокоэффективного использования свободной энергии пока не совсем ясна. Таким образом, мы приходим к выводу, что, чем больше увеличение энтропии при данном процессе, тем более он необратим.

Применим ли второй принцип термодинамики к биосистемам? Ответ на этот вопрос не так прост. В биосистемах протекают процессы, при которых энергия в соответствии с этим принципом переходит с более высокого на более низкий уровень. Это, например, процесс дыхания. В ходе его богатые энергией соединения (углеводы) распадаются до простых низкоэнергетических веществ – воды и углекислоты, а выделившаяся свободная энергия используется для протекания других процессов (например, синтеза АТФ). Однако хорошо известно, что в живых системах осуществляются и такие процессы, в ходе которых энергия переходит с более низкого на более высокий уровень. Так, например, происходит при фотосинтезе. Здесь, как известно, из простых бедных энергией соединений углекислоты и воды при участии квантов света синтезируются вещества (например, углеводы), содержащие значительный запас свободной энергии. Можно назвать и другие процессы в биосистемах, протекание которых, казалось бы, не подчиняется второму принципу термодинамики. Это позволило некоторым ученым говорить о том, что данный принцип не действует в биосистемах.

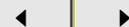
Дело в том, что для рассмотрения приложимости второго начала термодинамики к биосистемам следует брать не организм как таковой, а организм вместе с участком



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 91 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

среды, обеспечивающим его нормальное функционирование в течение определенного времени. Такая система получила название условно изолированной системы. К ней второй принцип термодинамики полностью приложим. В отдельных участках этой системы энтропия, казалось бы, вопреки второму принципу термодинамики, может даже уменьшаться (например, в зеленом листе при фотосинтезе). Однако это уменьшение происходит за счет возрастания энтропии в другой части такой системы (например, в источнике света, от которого световая энергия поступает в лист). В результате общая энтропия такой системы в соответствии со вторым принципом термодинамики не уменьшается, а имеет тенденцию к увеличению.

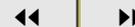
Таким образом, можно констатировать, что, так же как и к неживым объектам, второй принцип термодинамики приложим и к биосистемам. Протекание процессов в них идет в соответствии с этим принципом и энтропии здесь принадлежит важная роль.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 92 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лекция 9. Реальные газы. Жидкости. Твердые тела

Уравнение Ван-дер-Ваальса. Жидкости. Особенности жидкого состояния. Ближний и дальний порядок. Коэффициент поверхностного натяжения. Смачивание. Капиллярные явления и их роль в биологических системах. Растворы. Осмос и его проявления. Испарение и конденсация. Твердые тела. Кристаллическое строение твердых тел.

Литература: [1, с. 168–219], [2, с. 142–160].

Уравнение Клайперона-Менделеева описывает поведение идеального газа, молекулы которого можно рассматривать как материальные точки, между которыми не действуют силы взаимного притяжения. Чтобы получить уравнение состояния реального газа, голландский физик Ван-дер-Ваальс ввел в уравнение Клайперона-Менделеева соответствующие поправки. Запишем уравнение Клайперона-Менделеева для одного моля газа

$$pV_M = RT, \quad (9.1)$$

где V_M – объем одного моля идеального газа, или, то же самое, что и объем сосуда, в котором могут двигаться его молекулы. У реального газа часть b этого объема занимают сами молекулы. Поэтому свободный объем, в котором могут двигаться молекулы реального газа меньше V_M на величину $V_M - b$. Величина b зависит от вида газа.

Давление p в формуле (9.1) это фактически давление, производимое на идеальный газ стенками сосуда. Действие сил притяжения между молекулами реального газа вызывает добавочное сжатие газа, создавая тем самым добавочное внутреннее давление p' . Поэтому фактическое давление реального газа будет равно $p + p'$.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 93 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Ван-дер-Ваальс установил, что внутреннее давление обратно пропорционально квадрату объема

$$p' = \frac{a}{V_M^2}, \quad (9.2)$$

где a – коэффициент пропорциональности, зависящий от вида газа. С учетом данных поправок формула (9.1) примет следующий вид

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right) (V - b) = RT \quad (9.3)$$

– уравнение Ван-дер-Ваальса или уравнение состояния реального газа для одного моля. Учитывая, что $V = \nu V_M$ (где V – объем ν молей газа), а $\nu = m/M$, легко перейти к уравнению Ван-дер-Ваальса для любой массы газа m

$$\left(p + \frac{m^2 a}{M^2 V^2}\right) \left(V - \frac{m b}{M}\right) = \frac{m}{M} RT, \quad (9.4)$$

где M – молярная масса газа.

Жидкость по внешним признакам характеризуется текучестью, не сжимаемостью и наличием свободной поверхности. В жидкостях средние расстояния между молекулами значительно меньше, чем в газах. Поэтому силы взаимного притяжения и отталкивания между молекулами начинают играть существенную роль. Молекулы в жидкости не совершают свободных пробегов как в газе, а колеблются около некоторого положения равновесия, одновременно совершая хаотические блуждания. За одну секунду молекула успевает сменить место «оседлой жизни» около 100 млн. раз, совершив при этом до 100 тыс. колебаний.

Упорядоченность во взаимном расположении атомов или молекул в твёрдых телах и жидкостях характеризуют при помощи понятий *дальний порядок* и *ближний порядок*. Упорядоченность на расстояниях, сравнимых с межатомными, называется



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 94 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

ся ближним порядком, а упорядоченность, повторяющаяся на неограниченно больших расстояниях, – дальним порядком. В идеальном газе расположение атома в какой-либо точке пространства не зависит от расположения других атомов. Т. о., в идеальном газе отсутствует д. п. и б. п., но уже в жидкостях и аморфных телах существует ближний порядок – некоторая закономерность в расположении соседних атомов. На больших расстояниях порядок «размывается» и постепенно переходит в «беспорядок», т. е. дальнего порядка в жидкости нет.

Поверхностный слой жидкости по своим свойствам отличается от внутренних частей жидкости. Молекула, которая находится внутри жидкости, взаимодействует с окружающими ее молекулами. Так как силы взаимодействия статистически симметричны – суммарный эффект такого взаимодействия равен нулю. Молекулы на поверхности жидкости испытывают большее действие со стороны молекул жидкости, чем со стороны молекул газа, находящихся над поверхностью жидкости. В поверхностном слое жидкости возникает избыточное молекулярное давление, направленное по нормали внутрь жидкости. Вследствие этого масса жидкости не подверженная действию внешних сил принимает форму шара.

Форме шара соответствует наименьшая поверхность при данном объеме. Таким образом, под действием сил притяжения между молекулами поверхность жидкости сокращается до минимально возможных размеров. Данное явление получило название *поверхностного натяжения*.

Силы притяжения, между молекулами действующие в поверхностном слое вдоль поверхности жидкости получили название силы *поверхностного натяжения*.

Сила поверхностного натяжения пропорциональна длине контура ограничивающего поверхность жидкости

$$F = \alpha l, \quad (9.5)$$

где α – коэффициент поверхностного натяжения, l – длина контура. Измеряется α в $H/м$. Он зависит от химического состава жидкости и температуры.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 95 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Поверхностный слой жидкости подобен эластичной растянутой пленке. В водоемах по поверхностной пленке воды свободно бегают и прыгают насекомые. Наличием поверхностной пленки обусловлено образование пены на воде, представляющей из себя скопление множества мелких пузырьков воздуха под этой пленкой.

При искривлении поверхности жидкости возникает добавочное давление под поверхностью жидкости, обусловленное кривизной поверхности (поверхностный слой, вследствие поверхностного натяжения, стремится сократиться и принять плоскую форму). Если поверхность имеет выпуклую форму, то добавочное давление положительно и направлено внутрь жидкости. Если поверхность вогнутая, добавочное давление отрицательно.

Добавочное давление под искривленной поверхностью жидкости определяется формулой Лапласа (французский математик и физик)

$$p = \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (9.6)$$

где α – коэффициент поверхностного натяжения, R_1 и R_2 – радиусы кривизны в точке O линий AOB и COD (рисунок 9.1).

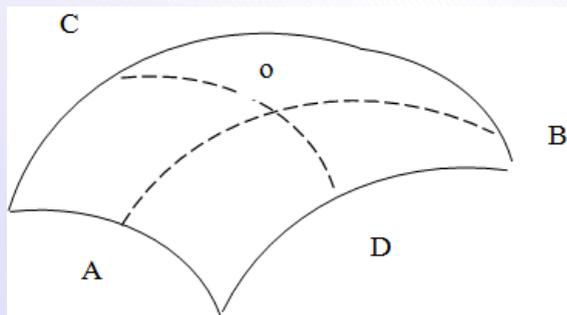


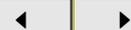
Рисунок 9.1



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 96 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

При большой кривизне поверхности, которая имеет место у очень маленьких капелек, дополнительное давление может быть довольно значительным. Так, например, для капельки воды радиусом 0,001 мм оно достигает порядка 10^5 Па. Именно из таких капелек воды состоит туман.

Добавочное давление играет большую роль в так называемых *капиллярных явлениях*. Жидкости по отношению к твердым телам разделяются на *смачивающие* и *несмачивающие*.

Вблизи твердой поверхности, например, около стенки сосуда поверхность жидкости искривлена.

Такая изогнутая поверхность называется *мениском* (от греческого слова менискос – полумесяц).

Объясняется это тем, что молекулы жидкости взаимодействуют не только с другими молекулами жидкости, но и с молекулами стенки сосуда. Если сила взаимодействия между молекулами жидкости меньше, чем сила взаимодействия между молекулами стенки и молекулами жидкости, то равнодействующая сила F будет направлена в сторону стенки.

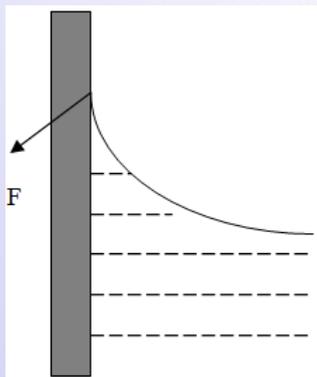


Рисунок 9.2

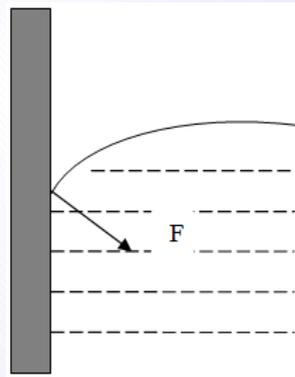


Рисунок 9.3



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 97 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

В рассмотренном случае жидкость приподнята у стенки, мениск вогнутый и наблюдается явление *смачивания* (рисунок 9.2).

Если сила взаимодействия между молекулами жидкости больше, чем сила взаимодействия между молекулами стенки и молекулами жидкости, то равнодействующая сила будет направлена в сторону жидкости. В рассмотренном случае жидкость опущена у стенки, мениск выпуклый и наблюдается явление *несмачивания* (рисунок 9.3). Очевидно, что смачиваемость и несмачиваемость – понятия относительные: жидкость, смачивающая одно твердое тело, может не смачивать другое. Например, вода смачивает стекло и несмачивает воск. Листья и стебли растений не смачиваются водой благодаря покрывающему их тонкому воскообразному налету. Поэтому они не размокают во время дождя.

Смачивание и несмачивание приводят к тому, что в очень узких сосудах, *капиллярах* (от латинского слова *capillaries* – волосной) происходит поднятие или опускание жидкости. Действительно, если например конец капилляра опустить в смачивающую жидкость, то ее поверхность примет вогнутую форму большой кривизны. Создастся большое отрицательное добавочное давление, определяемое по формуле Лапласа, вследствие чего жидкость в капилляре поднимается до тех пор, пока гидростатическое давление столба жидкости высотой h уравнивает добавочное давление. В очень тонких капиллярах подъем жидкости может достигать большой высоты. Так, например, подъем питательного раствора по стеблю и стволу растений в значительной мере обусловлен явлением капиллярности: раствор поднимается по тонким капиллярным трубкам, образованным стенками растительных клеток. Пчелы извлекают нектар из глубин цветка посредством капиллярной трубки, находящейся внутри пчелиного хоботка. По капиллярам поднимается вода из глубинных в поверхностные слои почвы.

При растворении в жидкости твердого вещества его молекулы равномерно распределяются во всем объеме жидкости, образуя среду, называемую *раствором*. При этом жидкость называют *растворителем*, а твердое вещество – *растворенным ве-*



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 98 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

ществом. Масса m растворенного вещества, приходящаяся на единицу объема V раствора, называется концентрацией раствора C ; следовательно

$$C = \frac{m}{V} \quad (9.7)$$

Растворы малой концентрации называют слабыми. Так как в слабом растворе расстояния между молекулами растворенного вещества очень велики, взаимодействием между ними можно пренебречь. Таким образом, в слабом растворе растворенное вещество напоминает идеальный газ. Растворенное вещество обладает парциальным давлением p , величину которого можно определять, используя основные законы теории идеального газа (основное уравнение МКТ и уравнение Менделеева–Клайперона)

Особый интерес представляет явление диффузии растворителей через полупроницаемые перегородки, называемое *осмосом* (от греческого слова осмос – толчок, давление). Если отделить раствор от чистого растворителя так называемой полупроницаемой перегородкой, пропускающей молекулы растворителя, но не пропускающей молекулы растворенного вещества, то молекулы растворителя будут диффундировать через перегородку, молекулы растворенного вещества нет. С течением времени концентрации молекул растворителя в обеих частях сосуда уравниваются. При этом в растворе возникнет избыточное давление (равное парциальному давлению растворенного вещества), называемое *осмотическим*.

Воспользовавшись основным уравнением МКТ и уравнением Менделеева – Клайперона легко получить, что

$$p = \frac{CRT}{M} \quad (9.8)$$

Таким образом, осмотическое давление пропорционально концентрации и температуре раствора и обратно пропорционально молярной массе растворенного вещества. Данный закон был установлен голландским химиком Вант–Гоффом.



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 99 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Явление осмоса играет исключительную роль для живых организмов. Оболочки живых клеток представляют собой полупроницаемые перегородки; они проницаемы для молекул воды и непроницаемы для молекул сложных органических соединений, создающихся внутри клетки в процессе ее жизнедеятельности. Благодаря этому внутри клетки образуется раствор и возникает осмотическое давление, делающее клетку упругой. Построенные из таких клеток ткани организмов обладают большой упругостью и способностью сохранять форму. Посредством различных физиологических процессов в клетках живых организмов поддерживается постоянное осмотическое давление.

В жидкостях при любой температуре (в связи с хаотичностью теплового движения) имеется некоторое количество молекул, кинетическая энергия которых оказывается достаточной, чтобы покинуть поверхность жидкости и перейти в пар. Данный процесс перехода жидкости в газообразное состояние называется *испарением*. При испарении жидкость покидают наиболее быстрые молекулы. Это ведет к уменьшению внутренней энергии жидкости и ее охлаждению. Очевидно, что с повышением температуры жидкости интенсивность испарения возрастает. Хаотически движущиеся молекулы пара, подлетая к поверхности жидкости, могут попасть в сферу притяжения молекул жидкости и перейти в нее. Этот процесс называется *конденсацией*. При конденсации жидкость нагревается. Процессы испарения и конденсации идут одновременно. Если число молекул, покидающих жидкость за единицу времени, равно числу молекул, возвращающихся в нее за тоже время из пара, то наступает *динамическое равновесие*. Пар, находящийся в равновесии с жидкостью, называется *насыщенным*. Давление насыщенного пара возрастает с повышением температуры.

Если давление насыщенного пара станет равным внешнему (например, атмосферному) давлению, то характер испарения существенно изменяется: испарение начинает происходить во всем объеме жидкости. Внутри жидкости образуются пузырьки пара, всплывающие на поверхность. Данный интенсивный процесс испарения называется *кипением*. Соответствующая ему температура называется *температурой*



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 100 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

кипения. Таким образом, температура кипения зависит от внешнего давления. Поэтому, например температура кипения уменьшается с ростом высоты над поверхностью земли (атмосферное давление падает).

Благодаря испарению воды с поверхности водных бассейнов и земли воздух всегда содержит некоторое количество водяного пара (воздух всегда влажен). Влажность воздуха описывается следующими характеристиками.

Абсолютная влажность ρ – количество водяного пара, содержащегося в единице объема воздуха. Измеряется обычно в $\text{кг}/\text{м}^3$.

Относительная влажность φ – это выраженное в процентах отношение абсолютной влажности ρ к тому количеству водяного пара ρ_0 , которое необходимо для насыщения 1 м^3 воздуха при данной температуре (или отношение давления водяного пара p к давлению насыщенного пара p_0 при той же температуре)

$$\varphi = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \cdot 100 \% \text{ или } \varphi = \left(\frac{p}{p_0} \right) \cdot 100 \% \quad (9.9)$$

Значения ρ_0 и p_0 однозначно определяются температурой и приводятся в специальных таблицах.

Испарение и конденсация играют важную роль в процессах влагооборота и теплообмена на земном шаре. При конденсации водяного пара образуются: роса, туман и облака. Человеческий организм за сутки испаряет до двух килограммов воды. Испарение пота с поверхности кожи предотвращает перегрев организма. Для замедления процесса испарения растения засушливых районов имеют обычно маленькие и немногочисленные листья.

Твердым телом называется агрегатное состояние вещества, характеризующееся постоянством формы и объема, причем тепловое движение частиц в них представляет собой хаотическое колебание атомов относительно положений равновесия. Твердые тела подразделяют на *кристаллические* и *аморфные*. Кристаллы имеют правильную геометрическую форму, которая является результатом упорядоченно-



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 101 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

го расположения частиц (атомов, молекул, ионов), составляющих кристалл. Структура, для которой характерно регулярное расположение частиц с периодической повторяемостью в трех измерениях, называется *кристаллической решеткой*. Точки, в которых расположены частицы, а точнее – средние равновесные положения, около которых частицы совершают колебания, называются *узлами кристаллической решетки*.

Монокристаллы – это твердые тела, частицы которых образуют единую кристаллическую решетку. Твердые тела называются поликристаллами, если они имеют мелкокристаллическую структуру, т. е. состоят из множества беспорядочно ориентированных мелких кристаллических зерен (монокристаллов). Характерной особенностью монокристаллов является их *анизотропность*, т. е. зависимость физических свойств – упругих, механических, тепловых, электрических, магнитных, оптических – от направления. Анизотропия монокристаллов объясняется тем, что плотность расположения частиц кристаллической решетки по разным направлениям неодинакова, что и приводит к различию свойств кристалла вдоль этих направлений. В поликристаллах анизотропия наблюдается только для отдельных мелких кристалликов (монокристаллов), но их различная ориентация приводит к тому, что свойства поликристалла по всем направлениям в среднем одинаковы.

Твердые тела, физические свойства которых одинаковы по всем направлениям (изотропны) называют аморфными. Для аморфных тел, как и для жидкостей, характерен ближний порядок в расположении частиц, но, в отличие от жидкостей, подвижность частиц в них мала. Органические аморфные тела, которые состоят из большого числа длинных молекулярных цепочек, соединенных химическими связями, называются полимерами (каучук, полиэтилен, резина).



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 102 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Вопросы и задания для самоконтроля по разделу «Молекулярная физика и термодинамика»

1. Какой приблизительный размер молекулы?
2. Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетической теории.
3. Напишите уравнение состояния идеального газа.
4. Напишите основное уравнение молекулярно-кинетической теории.
5. В чем заключается физический смысл температуры?
6. Напишите барометрическую формулу.
7. Что такое средняя длина пробега молекулы?
8. Что называют эффективным диаметром молекулы?
9. В чем заключается явление диффузии?
10. Какое течение называют ламинарным, а какое турбулентным?
11. В чем заключается явление теплопроводности?
12. Что такое внутренняя энергия?
13. Что такое число степеней свободы?
14. Запишите формулу для определения количества теплоты.
15. Что такое теплоемкость? Удельная теплоемкость? Молярная теплоемкость?
16. Сформулируйте первое начало (закон) термодинамики.
17. Какой процесс называют адиабатическим?
18. Сформулируйте второе начало термодинамики.
19. Что такое энтропия?
20. Чем жидкость отличается от газа?
21. В чем заключается явление поверхностного натяжения?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 103 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Лекция 10. Основы электростатики

Электризация. Электрический заряд. Закон сохранения заряда. Закон Кулона. Электростатическое поле. Напряженность электростатического поля. Принцип суперпозиции электростатических полей. Линии вектора напряженности. Поток вектора напряженности. Теорема Гаусса. Потенциал. Разность потенциалов. Эквипотенциальные поверхности. Связь между потенциалом и напряженностью электростатического поля. Распределение зарядов на поверхности проводника. Электростатическая защита. Заземление. Конденсаторы. Энергия электростатического поля. Поляризация диэлектрика. Сегнетоэлектрики. Электрические явления в природе. Биологическое действие электростатического поля.

Литература: [1, с. 248–275], [2, с. 163–201].

Еще в VII веке до нашей эры греческий ученый Фалес указал на способность янтаря натертого шелком, притягивать легкие предметы. Но лишь в конце XVI века английский врач Гилберт провел соответствующие опыты и обнаружил, что таким свойством обладают и многие другие тела натертые мягкими материалами. Он назвал это явление *электризацией* (от греческого слова электрон – янтарь). Оказалось, что электризация бывает двух видов. Один вид назвали положительной, второй – отрицательной. Одноименно наэлектризованные тела отталкиваются, а разноименно – притягиваются.

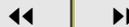
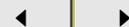
Электризацию долгое время объясняли существованием невидимой электрической жидкости перетекающей от одного тела к другому. В 1881 году немецкий физик Гельмгольц выдвинул гипотезу о том, что электрические явления обусловлены существованием электрически заряженных элементарных частиц. Данная гипотеза подтвердилась открытием в 1897 году электрона, а затем протона и многих других



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 104 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

электрически заряженных частиц. Говорят, что эти частицы несут электрический заряд, который обозначают буквой q и измеряют в кулонах ($Кл$). Заряд электрона отрицательный и равен $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Заряд протона положительный и равен по величине заряду электрона. Такой заряд называют *элементарным электрическим* зарядом и часто обозначают e . Это наименьший заряд, который может иметь частица или тело. Заряд любого тела кратен элементарному заряду

$$q = \pm ne, \quad (10.1)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$

Современная физика объясняет явление электризации следующим образом. Все тела состоят из атомов. Атом в свою очередь состоит из положительно заряженного ядра (в состав которого входят положительно заряженные протоны и нейтральные нейтроны) и отрицательно заряженные электроны. В нормальном состоянии атом электрически нейтрален (суммарный заряд электронов и протонов равен нулю). В результате внешнего воздействия атом может потерять один или несколько электронов и стать положительно заряженным (*положительным ионом*) или наоборот присоединить к себе один или несколько электронов и стать отрицательно заряженным (*отрицательным ионом*).

Фактически положительный заряд какого-либо тела представляет собой недостаток электронов, а отрицательный – избыток электронов. Так при электризации трением часть электронов переходит от одного тела к другому. При этом электризуются оба тела: одно положительно, второе отрицательно.

Электрические заряды могут перемещаться в пределах одного тела или от одного тел к другому, но не могут уничтожаться и создаваться. Иными словами *в изолированной системе алгебраическая сумма электрических зарядов остается постоянной*. Это положение называется *законом сохранения электрического заряда*.

Тела, в которых электрические заряды могут свободно перемещаться, называются *проводниками*. К ним относятся металлы, электролиты и ионизированные газы.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 105 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Тела, в которых возможность перемещения зарядов весьма ограничена (мало свободных электронов и практически нет ионов) называются *диэлектриками*. Промежуточное положение занимают *полупроводники*.

Первые количественные исследования по взаимодействию электрически заряженных тел были проведены французским физиком Кулоном. Опытным путем было установлено, что два точечных заряда (размерами тел, на которых находятся заряды можно пренебречь по сравнению с расстояниями между ними) взаимодействуют с силой, пропорциональной величинам зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними и направленной вдоль прямой соединяющие эти заряды.

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2}, \quad (10.2)$$

где ϵ – *диэлектрическая проницаемость*, характеристика электрических свойств среды в которой находятся заряды, показывающая во сколько раз сила взаимодействия между зарядами в данной среде меньше силы их взаимодействия в вакууме. Для вакуума и воздуха $\epsilon = 1$, для других веществ $\epsilon > 1$. Коэффициент пропорциональности k в системе СИ равен

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2 \cdot \text{Кл}^2} \quad (10.3)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/\text{Н} \cdot \text{м}^2$ – так называемая электрическая постоянная. Она не имеет физического смысла и введена для упрощения формул электричества в системе СИ.

Электрические заряды, находясь на расстоянии, друг от друга взаимодействуют между собой посредством особого вида материи – *электрического поля*. Каждое заряженное тело создает вокруг себя электрическое поле. Электрическое поле неподвижного заряда называют электростатическим. Электрическое поле отдельного заряда можно обнаружить, если внести в него другой заряд, на который в соответствии с законом Кулона будет действовать определенная сила.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 106 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Электрическое поле характеризуют при помощи векторной физической величины получившей название напряженность электрического поля \vec{E} .

Напряженностью электрического поля в данной его точке называется векторная физическая величина, равная отношению силы действующей со стороны этого поля на точечный пробный положительный электрический заряд q_0 , помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (10.4)$$

Напряженность является силовой характеристикой электрического поля. Направление вектора напряженности электрического поля совпадает с направлением вектора силы, действующей на пробный положительный заряд.

В СИ напряженность электрического поля измеряется в ньютонах на кулон ($H/Кл$) или в вольтах на метр ($B/м$).

Электрическое поле изображают при помощи силовых линий. Силовая линия электрического поля называется воображаемая в пространстве линия, касательная к которой в каждой точке совпадает по направлению с вектором напряженности электрического поля в это точке (рисунок 10.1).

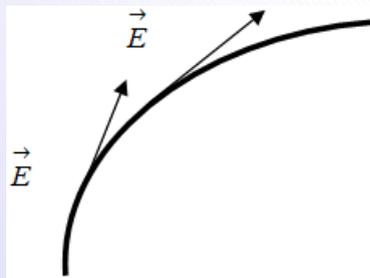


Рисунок 10.1



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 107 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Так, например, электрические поля положительного и отрицательного точечных зарядов имеют следующий вид (рисунок 10.2)



Рисунок 10.2

Силовые линии электрического поля не замкнуты: они начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных или уходят на бесконечность.

Многие живые организмы ведут себя подобно электрическим диполям. *Электрическим диполем* называют систему из двух равных по модулю зарядов противоположного знака, находящихся на расстоянии l друг от друга (рисунок 10.3)

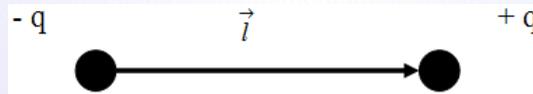


Рисунок 10.3

Вектор \vec{l} , проведенный от отрицательного заряда к положительному называется *плечом диполя*.

Основной характеристикой диполя является электрический дипольный момент \vec{p} – векторная физическая величина, равная произведению модуля одного из его зарядов на плечо

$$\vec{p} = |q|\vec{l} \quad (10.5)$$

К кулоновским силам применим принцип независимости действия сил – результирующая сила, действующая со стороны поля на пробный заряд равна векторной



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 108 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

сумме сил, приложенных к нему со стороны каждого заряда, создающего электростатическое поле.

Напряженность результирующего поля, создаваемого системой зарядов, также равна геометрической сумме напряженностей полей, создаваемых в данной точке каждым из зарядов в отдельности:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n E_i \quad (10.6)$$

Эта формула выражает *принцип суперпозиции (наложения) электростатических полей*.

Чтобы с помощью линий напряженности можно было характеризовать не только направление, но и значение напряженности электростатического поля их проводят с определенной густотой. Число линий напряженности пронизывающих рассматриваемую поверхность называется потоком вектора напряженности (Φ_E). Поток вектора напряженности через произвольную замкнутую поверхность S определяется выражением:

$$\Phi_E = \oint_S (\vec{E}, d\vec{S}) = \oint_S E_n dS, \quad (10.7)$$

где dS – элементарная площадка поверхности, $E_n = E \cos \alpha$ – проекция вектора \vec{E} на нормаль \vec{n} к площадке, α – угол между \vec{E} и \vec{n} .

Вычисление напряженности поля системы электрических зарядов можно значительно упростить, используя *теорему Гаусса*, определяющую поток вектора напряженности сквозь произвольную замкнутую поверхность: *поток вектора напряженности электростатического поля в вакууме сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности зарядов*.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 109 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Электростатическое поле является потенциальным. Это означает, что работа по перемещению заряда в электростатическом поле не зависит от формы траектории, по которой перемещается заряд, а определяется только начальным и конечным положением заряда. На всякий заряд, помещенный в электростатическое поле, действует сила, которая может переместить его. Любой электрический заряд, находящийся в электростатическом поле, обладает некоторой потенциальной энергией. Поэтому работа A , совершаемая при перемещении электрического заряда из одной точки поля в другую равна убыли потенциальной энергии W этого заряда

$$A = W_1 - W_2, \quad (10.8)$$

где W_1 и W_2 – потенциальные энергии заряда в начальной и конечной точках соответственно. Важнейшей энергетической характеристикой электрического поля является потенциал. *Потенциалом электрического поля* φ называется скалярная физическая величина, численно равная потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещенного в данную точку поля

$$\varphi = \frac{W}{q} \quad (10.9)$$

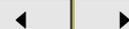
Из данной формулы следует единица измерения потенциала – *вольт (В)*: $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$. Под действием сил поля положительный заряд будет стремиться переместиться из точки с более высоким потенциалом в точку с более низким потенциалом, а отрицательный заряд наоборот. Численное значение и знак потенциала зависят от выбора нулевого уровня. В физике обычно полагают, что потенциал равен нулю на бесконечности. На практике в электротехнике, за нулевой потенциал обычно выбирают потенциал поверхности Земли или проводника соединенного с Землей. При расчетах важно знать не абсолютные значения потенциалов, в каких либо двух точках поля, а *разность потенциалов* $U = \varphi_1 - \varphi_2$, где φ_1 – потенциал точки 1, φ_2 – потенциал точки 2.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 110 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

При перемещении заряда q из одной точки электрического поля в другую совершается работа

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU, \quad (10.10)$$

тогда

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q} \quad (10.11)$$

Из данной формулы следует единица измерения разницы потенциалов также – *вольт (В)*: $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$.

Для потенциального поля между консервативной силой и потенциальной энергией существует связь:

$$\vec{F} = -\text{grad } W, \quad (10.12)$$

поскольку $\vec{F} = q\vec{E}$ и $W = q\varphi$, то

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi, \quad (10.13)$$

Знак минус показывает, что \vec{E} направлен в сторону убывания потенциала.

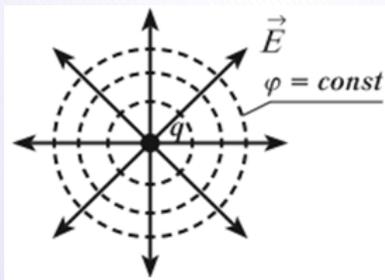


Рисунок 10.4

Для графического изображения распределения потенциала используются эквипотенциальные поверхности – поверхности во всех точках, которых потенциал имеет



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 111 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

одинаковое значение. На **рисунке 10.4** приведены эквипотенциальные поверхности положительного точечного заряда.

Опыт показывает, что при увеличении заряда проводника возрастает и его потенциал. Однако отношение

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad (10.14)$$

остаётся постоянным. Величина C называется *ёмкостью проводника*. Ёмкость характеризует способность проводников накапливать электрические заряды. Она зависит от формы и размеров проводника и от диэлектрических свойств окружающей среды. Единицей ёмкости является *фарад* (Φ) ёмкость такого уединённого проводника, которому заряд в 1 Кл сообщает потенциал в 1 В: $1 \Phi = 1 \text{ Кл/В}$. 1 фарад это очень большая ёмкость. Земной шар, например, обладает ёмкостью $\approx 711 \text{ мк}\Phi$. Однако учеными были созданы устройства, которые при относительно небольших размерах способны накапливать достаточно большой электрический заряд. Они получили название – *конденсаторы*. Конденсатор состоит из двух проводников, находящихся на небольшом расстоянии друг от друга, разделённых слоем диэлектрика. Ёмкость конденсатора равна отношению заряда, накопленного в конденсаторе к разности потенциалов между его обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U} \quad (10.15)$$

Энергия электростатического поля заряженного конденсатора определяется выражением:

$$W = \frac{q^2}{2C} \quad (10.16)$$

Если поместить в однородное электрическое поле нейтральный проводник свободные электроны проводника начнут перемещаться против внешнего поля (от $-$ к $+$). В результате одна часть проводника зарядится отрицательно вторая положительно. Это явление называется *электростатической индукцией*. Индуцированные



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 112 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

заряды создадут внутри проводника собственное электрическое поле направленное противоположно внешнему.

Перераспределение зарядов в проводнике будет происходить до тех пор, пока внешнее поле не компенсируется собственным. При этом результирующее поле внутри проводника отсутствует.

Очевидно, что электрическое поле будет отсутствовать не только внутри сплошного проводника, но и внутри полостей, имеющих в проводнике. На этом основана электростатическая защита: объект, который надо защитить от действия внешнего электрического поля, окружают со всех сторон проводником, например, густой металлической сеткой.

Соприкосновение разнородных тел, плотный контакт тел при трении может привести к значительной их электризации вследствие перераспределения электронов. Электризация сопровождается раскол или разрыв тел на части, нагрев, разбрызгивание жидкости. Все это сопровождается накоплением на поверхности тел значительных статических зарядов и образованием вблизи них сильных электрических полей и искровых разрядов, поражающих человека. В технологических процессах, связанных с переработкой и получением горючих веществ, возникающие в результате электризации искровые разряды часто являются причиной пожаров и взрывов на химических производствах. Для предотвращения электрических разрядов производят *заземление* оборудования (соединение оборудования с точкой нулевого потенциала).

Внесение диэлектрика во внешнее электрическое поле приводит к его *поляризации*. Диэлектрик, как и всякое другое вещество, состоит из молекул, каждая из которых электрически нейтральна и представляет собой *электрический диполь* с электрическим дипольным моментом. Различают три типа диэлектриков:

1. *Диэлектрики с неполярными молекулами* – молекулы, которых в отсутствие внешнего поля имеют нулевой дипольный момент.
2. *Диэлектрики с полярными молекулами* – молекулы, которых вследствие асимметрии имеют ненулевой дипольный момент.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 113 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

3. *Ионные диэлектрики* – кристаллы, представляющие из себя пространственные решетки с чередованием ионов различного знака.

Поляризацией диэлектрика называют процесс ориентации диполей или появление под действием электрического поля ориентированных по полю диполей. При этом диэлектрик объемом V приобретает дипольный момент

$$\vec{p}_V = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i, \quad (10.17)$$

где \vec{p}_i – дипольный момент одной молекулы.

Для количественного описания поляризации диэлектрика используется векторная величина – *поляризованность* – которая определяется как дипольный момент единицы объема диэлектрика:

$$\vec{P} = \frac{\vec{p}_V}{V} \quad (10.18)$$

Кристаллические диэлектрики, которые демонстрируют на протяжении определенного интервала температур спонтанную поляризацию, существенно зависящую от внешних влияний, называются *сегнетоэлектриками* (сегнетова соль, титанат бария и т. п.). Сегнетоэлектрики состоят из *доменов* – участков с разными направлениями поляризации; суммарный электрический дипольный момент кристалла равен нулю. Вследствие нагревания спонтанная поляризация сегнетоэлектриков исчезает при определенной температуре, называемой *точкой Кюри*. Сегнетоэлектрики используются для измерения температуры в детекторах электромагнитного излучения в качестве электрооптических материалов, оптические свойства которых изменяются под влиянием электрического поля.

Электрические явления лежат в основе различных биологических процессов. Биологические жидкости, циркулирующие в телах животных и растений, содержат значительное число носителей заряда – положительных и отрицательных ионов.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 114 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Процессы обмена, непрерывно происходящие в живом организме, приводят к перераспределению зарядов в тканях и возникновению разностей потенциалов, названных *биопотенциалами*. К настоящему времени установлено, что все клетки животных и растительных организмов обладают тем или иным видом электрической активности.

Для клеток в состоянии покоя характерна определенная разность потенциалов порядка 60–100 мВ между внутренним содержимым клетки и наружной средой. Это объясняется тем, что оболочка клетки – биомембрана – избирательно пропускает одни ионы и задерживает другие, из-за чего концентрация ионов определенного вида по обе стороны мембраны оказывается различной. Образующийся двойной электрический слой создает в мембране (толщина 7–10 нм) сильное электрическое поле, которое в свою очередь оказывает влияние на ионообмен в клетках. Мембраны выступают в роли конденсаторов. Электроемкость мембран велика и в расчете на 1 см² поверхности составляет несколько мкФ.

Исследования показали, что в работающей мышце постепенно увеличивается положительный заряд. Это приводит к повышенному снабжению ее кислородом, поскольку эритроциты артериальной крови имеют избыточный отрицательный заряд. Работа мышц, нервных клеток приводит к определенному распределению потенциала в работающем органе. Сердце, например, ведет себя как электрический диполь, момент которого периодически меняется, образуя переменное электрическое поле в организме. Это позволяет регистрировать биопотенциалы поля сердечной мышцы на поверхности тела. С электродов, размещенных на участках тела с различными потенциалами, снимают слабый электрический сигнал, периодически меняющийся во времени, – *электрокардиограмму*.

Исследования показывают, что тело рыб является своего рода электрическим диполем, образующим в окружающей среде электрическое поле. Видимо, поэтому рыбы очень чувствительны к внешним электрическим полям. Перераспределение заряда в теле рыбы происходит за счет работы нервно-мышечной ткани. Некоторые виды



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 115 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

рыб (электрический угорь, скат, сом и др.) имеют специальный орган для накопления электрической энергии – своеобразную батарею конденсаторов из множества чередующихся прослоек нервной (проводящей) и соединительной (непроводящей) ткани. Напряжение при этом может достигать 600–1000 В, а мощность электрического импульса при разряде – до 1 кВт. Фотосинтез, происходящий в растениях под действием света, также сопровождается перераспределением заряда.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 116 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лекция 11. Постоянный электрический ток

Сила тока. ЭДС. Напряжение. Сопротивление. Электрический ток в металлах. Законы Ома. Работа и мощность постоянного тока. Электрический ток в жидкостях и газах. Электропроводимость биологических тканей. Действие электрического тока на живой организм. Ионизация молекул. Плазма и ее использование в химии. Электрокинетические явления (электрофорез, электроосмос).

Литература: [1, с. 282–339], [2, с. 205–245].

Электрическим током называется направленное движение электрически заряженных частиц. За направление тока принято считать направление движения положительных зарядов. Основной характеристикой электрического тока является *сила тока* (I), численно равная заряду, протекающему через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (11.1)$$

Единицей измерения силы тока в СИ является *ампер* (A): $1 A = 1 Кл/с$. Если сила тока и его направление с течением времени не изменяются, такой ток называют постоянным. Для постоянного тока:

$$I = \frac{q}{t} \quad (11.2)$$

Пусть на концах некоторого проводника длины l имеется разность потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ ($\varphi_1 > \varphi_2$).

Данная разность потенциалов создаст внутри проводника электрическое поле с напряженностью \vec{E} . В проводнике возникнет направленное движение электрических зарядов (электрический ток) от большего потенциала к меньшему. С течением вре-



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 117 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

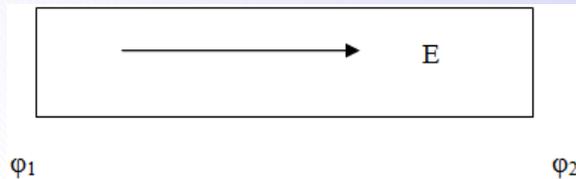


Рисунок 11.1

мени движение зарядов приведет к выравниванию потенциалов во всех точках. Электрическое поле в проводнике исчезнет и ток прекратится. Таким образом, первым необходимым условием существования электрического тока является наличие разности потенциалов U не равной нулю. Для ее поддержания необходимо специальное устройство, с помощью которого будет происходить разделение зарядов на концах проводника. Такое устройство называют генератором или источником тока. Источник тока выполняет одновременно и второе условие возникновения электрического тока – он замыкает электрическую цепь, по которой можно было бы осуществлять непрерывное движение зарядов. Ток течет по внешней части цепи – проводнику и по внутренней – источнику тока.

Источник тока имеет два полюса: положительный (+) с более высоким потенциалом и отрицательный (–) с более низким потенциалом. На отрицательном полюсе создается избыток электронов, а на положительном – недостаток. Разделение зарядов в источнике тока производится с помощью сил имеющих неэлектрическую природу, так как электрические силы могут только соединять, но не разделять разноименные заряды. Поэтому эти силы называют *сторонними*. Природа сторонних сил может быть различной. Например, в гальванических элементах они возникают за счет энергии химических реакций, в генераторе за счет механической энергии вращения ротора, в солнечных батареях за счет энергии фотонов и т. п. Роль источника тока в электрической цепи такая же, как роль насоса, который необходим для поддержания тока жидкости в гидравлической системе.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 118 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Работа, совершаемая сторонней силой по перемещению вдоль данного участка цепи единичного положительного заряда, называется электродвижущей силой (ЭДС) и обозначается ε :

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q_0} \quad (11.3)$$

Из (11.3) следует, что ЭДС, как и потенциал выражается в вольтах.

Участок цепи, на котором не действуют сторонние силы, называется *однородным*. Участок цепи, на котором на носители тока действуют сторонние силы, называется *неоднородным*.

Работа результирующей силы по перемещению заряда на участке цепи, равна сумме работ электрических и сторонних сил:

$$A = A_{\text{эл}} + A_{\text{ст}} = q_0 (\varphi_1 - \varphi_2) + q_0 \varepsilon \quad (11.4)$$

Для замкнутой цепи ($\varphi_1 = \varphi_2$) работа электрических сил равна нулю и $A = A_{\text{ст}} = q_0 \varepsilon$.

Напряжением (U) называется физическая величина, численно равная суммарной работе совершаемой электрическими и сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда на данном участке цепи:

$$U = \frac{A_{\text{эл}}}{q_0} + \frac{A_{\text{ст}}}{q_0} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon \quad (11.5)$$

Понятие напряжение является обобщением понятия разность потенциалов; напряжение на концах участка цепи равно разности потенциалов, если участок не содержит источника тока (т. е. на участке не действует ЭДС, сторонние силы отсутствуют).

Как было установлено носителями зарядов в металлах являются свободные электроны. Таким образом, ток в металлических проводниках это направленное движение свободных электронов (несмотря на то, что за направление тока принято направление движения положительно заряженных частиц).



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 119 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Еще в 1826 году немецкий физик Ом опытным путем установил, что сила тока в проводнике пропорциональна напряжению U между концами проводника:

$$I = kU, \quad (11.6)$$

где k – коэффициент пропорциональности, называемый электропроводностью или проводимостью проводника. Единица электрической проводимости – *сименс* (См). Величина

$$R = \frac{1}{k}, \quad (11.7)$$

обратная проводимости, называется электрическим сопротивлением проводника. Тогда

$$I = \frac{U}{R} \quad (11.8)$$

Выражение (11.8) называется законом Ома для однородного участка цепи (не содержащего источник тока). Единица измерения сопротивления получила название Ом. Из (11.8) следует, что: $1 \text{ Ом} = 1 \text{ В/А}$.

Сопротивление, оказываемое току металлическим проводником, обусловлено столкновением свободных электронов с ионами металла. Оно зависит от формы, размеров и вещества проводника:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (11.9)$$

где l – длина проводника, S – площадь его поперечного сечения, ρ – удельное сопротивление, коэффициент пропорциональности, характеризующий материал из которого изготовлен материал. Единица измерения удельного сопротивления *Ом·м*.

Рассмотрим однородный участок цепи с сопротивлением R к концам которого приложено напряжение U . За время dt через поперечное сечение проводника переносится заряд $dq = Idt$. В этом случае работа тока:

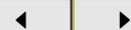
$$dA = dqU = IUdt = I^2Rdt = \frac{U^2}{R}dt, \quad (11.10)$$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 120 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

тогда мощность тока

$$P = \frac{dA}{dt} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (11.11)$$

Из формулы (11.11) вытекает внесистемная единица измерения работы тока – *ватт-час (Вт·ч)* или *киловатт-час (кВт·ч)*. 1 Вт·ч – работа тока мощностью 1 Вт в течение 1 ч: $1 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 3600 \text{ Вт}\cdot\text{с} = 3600 \text{ Дж}$. Аналогично $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 1000 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

Опыт показывает, что ток всегда вызывает некоторое нагревание проводника. Нагревание обусловлено переходом кинетической энергии движущихся по проводнику электронов с ионами кристаллической решетки в теплоту. Данное количество теплоты определяется *законом Джоуля-Ленца*:

$$Q = I^2 R t, \quad (11.12)$$

где I – сила тока в проводнике, R – сопротивление, t – время прохождения тока через проводник. Именно на тепловом действии тока основана работа ламп накаливания, электропечей, электросварки, бытовых электронагревательных приборов и т. д.

В общем случае, когда электрическая цепь замкнута источником тока (рис. 11.2)

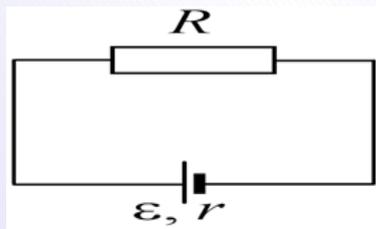


Рисунок 11.2

справедлив закон Ома для замкнутой цепи:

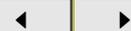
$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (11.13)$$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 121 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

где I – сила тока, R – сопротивление внешней цепи, r – внутреннее сопротивление источника тока, ε – ЭДС.

В отличие от металлов ток жидкостях это направленное движение ионов. Вещества растворы, которых проводят электрический ток, получили название – *электролиты*. Многие кислоты, соли и щелочи в растворах обладают способностью к диссоциации (распаду молекул на положительные (катионы) и отрицательные (анионы) ионы). Этот процесс обусловлен колебанием атомов в молекуле электролита и тем, что молекулы растворителя и электролита являются электрическими диполями (молекулы растворителя разрывают молекулу электролита на части). Такой процесс называют *электролитической диссоциацией*. В отсутствии внешнего электрического поля катионы и анионы в растворе движутся хаотично. При наличии поля (например, если опустить в раствор электроды источника тока) в растворе возникает электрический ток. Катионы упорядоченно движутся по полю от плюса к минусу, анионы против направления внешнего электрического поля. Подходя к электродам ионы, нейтрализуются и оседают на электродах или же выделяются вблизи электродов в виде газа. Такой процесс называется *электролизом*. Количественные закономерности электролиза были установлены английским физиком Фарадеем

$$m = kq = kIt, \quad (11.14)$$

где m – масса вещества, выделяющаяся на электроде, q – заряд, прошедший через раствор, I – сила тока в растворе, t – время, k – электрохимический эквивалент, постоянная для данного вещества величина.

$$k = \frac{M}{Fz}, \quad (11.15)$$

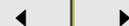
где M – молярная масса вещества, z – валентность, $F = eN_A = 96500$ Кл/моль – постоянная Фарадея (e – элементарный заряд, N_A – постоянная Авогадро). Электролиз нашел широкое практическое применение. Так получают и очищают от примесей



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 122 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

некоторые металлы и газы. Посредством электролиза различные изделия покрывают слоем металла. На электролизе основана зарядка аккумуляторов. Практическое использование электрохимических процессов дало толчок развитию современной области промышленности – электрохимии.

Все жидкости животных и растительных организмов являются растворами электролитов, а, следовательно, хорошими проводниками электрического тока. Прохождение тока через живой организм сопровождается химическими реакциями и перераспределением электрических зарядов, что вызывает в нем разнообразные раздражения. Интенсивность раздражения определяется в основном силой тока. Постоянный ток уже в несколько сотых долей ампера вызывает в организме человека сокращение мышц (человек не в состоянии выпустить оголенный провод), параличи, расстройство дыхания и кровообращения. Более сильные токи могут оказаться смертельными. Сила тока, проходящего через организм, зависит от его сопротивления. У человека оно в основном определяется сопротивлением кожи (удельное сопротивление кожи достигает 10^3 Ом·м). Сопротивление человеческого тела весьма значительно. При сухой неповрежденной коже рук сопротивление от конца одной руки до конца другой достигает 15000 Ом. По электропроводности живой организм очень неоднороден. В нем можно выделить хорошо проводящие участки (нервные ткани, биологические жидкости) и участки с низкой проводимостью (кожа, костная ткань, оболочки клеток).

Природа электрического тока в газах значительно отличается от тока в металлах и жидкостях. Газ в естественном состоянии состоит из нейтральных молекул (атомов) и не проводит электричества. Для того чтобы газ начал проводить электрический ток хотя бы часть его молекул необходимо *ионизировать* (превратить в ионы и свободные электроны). Ионизаторами газа могут служить интенсивное нагревание, радиоактивные излучения, рентгеновское и ультрафиолетовое излучение и некоторые другие факторы. При наличии внешнего электрического поля в ионизированном газе возникает электрический ток, обусловленный направленным движением



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 123 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

разноименных ионов и электронов. Процесс прохождения электрического тока через газ называют *газовым разрядом*. Различают несамостоятельный и самостоятельный газовый разряды. *Несамостоятельный газовый разряд*, ток, который прекращается после прекращения действия ионизатора. *Самостоятельный газовый разряд* – ток, который продолжается и после прекращения действия внешнего ионизатора. Ионы и электроны необходимые для поддержания самостоятельного разряда, создаются самим разрядом в результате внутренних процессов (например, самоионизации газа при сильных электрических полях). В зависимости от давления газа и напряженности электрического поля выделяют несколько видов самостоятельного разряда.

Искровой разряд возникает при давлениях близких к нормальному и напряженности электрического поля порядка 10^6 В/м. Он имеет вид ярко светящегося разветвленного канала (стримера) и сопровождается сильным треском. Газ в канале нагревается до очень высокой температуры (порядка 10^4 К). Треск обусловлен звуковыми волнами, возникающими при резком расширении нагревающегося в канале газа. Примером природного искрового разряда является молния – электрическая искра, проскакивающая между облаками или облаком и землей.

Коронный разряд возникает при давлениях близких к нормальному в неоднородном электрическом поле, вблизи заостренных частей электродов. Представляет собой слабое свечение газа, сопровождающееся легким шипением. В природе коронный разряд возникает, например, около проводов высокого напряжения, у вершин матч и других остроконечных предметов.

Глеющий разряд наблюдается в газах при низких давлениях (около 10 Па) и большой напряженности электрического поля. Имеет вид светящегося столба. Цвет свечения зависит от вида газа. Примером в естественных условиях является полярное сияние. Глеющий разряд возбуждается в верхних слоях атмосферы потоками заряженных космических частиц, собираемых магнитным полем Земли в зонах земных полюсов. В быту – лампы дневного света.

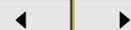
Ионизированный газ с высокой концентрацией заряженных частиц, но в целом не имеющий избыточного заряда (концентрации положительных и отрицательных



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 124 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

частиц равны) называется *плазмой*. Плазма – наиболее распространенное (из известных науке) состояние вещества во Вселенной. При температуре порядка 10000 К и выше все вещества представляют из себя плазму. Говорят, что плазма – это четвертая фаза состояния вещества, наряду с твердым, жидким и газообразным. Выделяют низкотемпературную ($10^4 – 10^5$ К) и высокотемпературную плазму. Все звезды представляют собой сгустки высокотемпературной плазмы. Низкотемпературная плазма представляет особый интерес для химии. В такой плазме наряду с процессами разрушения вещества идут процессы образования новых соединений, не существующих в обычных условиях.

Существенную роль в жизнедеятельности растений и животных играют *электрокинетические явления*. Они происходят в двухфазных системах (жидкость – твердое тело, жидкость – газ). Основными из них являются электрофорез и электроосмос.

Электрофорез – движение заряженных дисперсных частиц (взвешенные твердые частицы, капельки жидкости, пузырьки газа) в жидкой среде под действием постоянного электрического поля.

Электроосмос – движение жидкости через капилляры или пористые тела под действием внешнего электрического поля.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 125 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лекция 12. Постоянное магнитное поле

Основные характеристики магнитного поля. Закон Био-Савара-Лапласа. Закон Ампера. Сила Лоренца. Природа магнетизма. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Ферромагнетизм. Действие магнитного поля на биологические системы. Магнитное поле Земли. Магнитные бури. Физические основы магнитобиологии.

Литература: [1, с. 344–373], [2, с. 247–268].

Магнитные свойства некоторых железных руд (способность притягивать к себе железные предметы) известны с глубокой древности и получили применение более чем за тысячу лет до нашей эры в устройстве магнитного компаса. Выяснилось, что постоянный магнит имеет два полюса – *северный* (обозначается буквой N) и *южный* (обозначается S). Северным полюсом магнит, которому предоставлена возможность свободно ориентироваться, поворачивается на север, а южным – на юг. Оказалось также, что разноименные полюсы магнитов взаимно притягиваются, а одноименные отталкиваются. В результате, в науке возникло представление о существовании магнитных зарядов. Однако, оказалось, что если электрический диполь можно разделить на отрицательный и положительный заряды, то из разрезанного магнита всегда получается два новых магнита. Разделить полюса магнита не удалось.

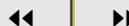
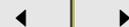
В 1820 году датский физик Эрстед установил, что провод, по которому течет электрический ток, воздействует на расположенную вблизи него магнитную стрелку. Магнитная стрелка поворачивается перпендикулярно проводу. Тогда же французский физик Ампер обнаружил магнитное взаимодействие двух проводников с током (взаимное притяжение или отталкивание в зависимости от направления протекающих в них токов). Последующие опыты показали, что магнитными свойствами обладает и ток в жидкостях, газах, любой движущийся электрический заряд. Таким образом, выяснилось, что вокруг движущихся электрических зарядов (электриче-



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 126 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

ских токов) возникает еще один вид поля – *магнитное поле*. Никаких магнитных зарядов не существует, магнитное поле порождается движущимися электрическими зарядами и переменным электрическим полем. Магнитное поле является силовым полем – оно действует с некоторой силой на движущиеся заряды, проводники с током, постоянные магниты. Так как магнитное поле является силовым полем, то его изображают графически посредством силовых линий также как и электрическое поле. Силовые линии магнитного поля всегда замкнуты, они не имеют ни начала, ни конца. Поэтому магнитное поле является вихревым. Так магнитное поле постоянного магнита имеет следующий вид (рисунок 12.1):

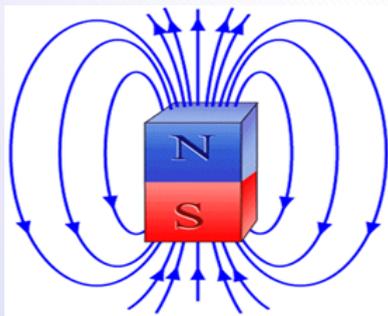


Рисунок 12.1

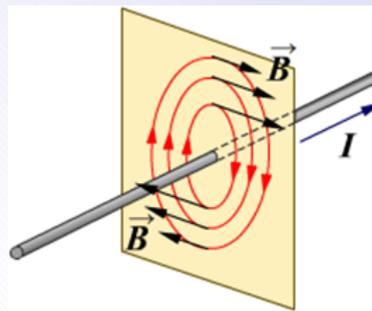


Рисунок 12.2

Касательная к магнитной силовой линии в любой ее точке совпадает по направлению с так называемым вектором магнитной индукции \vec{B} . Так, например, магнитное поле прямолинейного проводника с током имеет следующий вид (рисунок 12.2).

Поэтому силовые линии магнитного поля обычно называют линиями магнитной индукции.

Вектор магнитной индукции \vec{B} – основная силовая характеристика магнитного поля (аналогичная вектору напряженности \vec{E} для электрического поля). Эта величина пропорциональна силе, которая действует на северный конец бесконечно ма-



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 127 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

ленькой магнитной стрелки, помещенной в данную точку магнитного поля. Вектор магнитной индукции характеризует результирующее магнитное поле создаваемое всеми макро- и микротоками. *Макротоки* – электрические токи протекающие по проводникам в электрических цепях. *Микротоки* – обусловлены движением электронов в атомах вещества. Поэтому при одном и том же макротоке \vec{B} в разных средах будет иметь различное значение. Индукция \vec{B} в веществе и индукция \vec{B}_0 в вакууме связаны между собой следующим соотношением

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0, \quad (12.1)$$

где μ – магнитная проницаемость вещества, безразмерная физическая величина, характеризующая магнитные свойства среды. Для вакуума $\mu = 1$.

Наряду с индукцией \vec{B} существует другая характеристика магнитного поля – напряженность \vec{H} , связанная с магнитной индукцией соотношением

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (12.2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, зависящая от выбора системы единиц. В международной системе единиц

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \quad (12.3)$$

Величина \vec{H} не зависит от свойств среды и является характеристикой магнитного поля, создаваемого внешними по отношению к рассматриваемому объекту источниками (макротоками).

Для магнитного поля, как и для электрического, справедлив принцип суперпозиции: магнитная индукция результирующего поля, создаваемого несколькими токами, равна векторной сумме магнитных индукций полей, создаваемых каждым током.

Для вычисления магнитной индукции создаваемой произвольным проводником с током применяют закон Био-Савара-Лапласа: элемент проводника $d\vec{l}$ с силой



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 128 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

тока I создает в некоторой точке A индукцию поля

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu I \left[d\vec{l}, \vec{r} \right]}{4\pi r^3}, \quad (12.4)$$

где \vec{r} – радиус вектор, проведенный из элемента $d\vec{l}$ проводника в точку A (см. рис. 12.3)

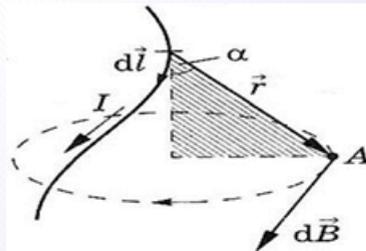


Рисунок 12.3

Модуль вектора $d\vec{B}$ определяется выражением

$$dB = \frac{\mu_0 \mu I dl \sin \alpha}{4\pi r^2} \quad (12.5)$$

Действие магнитного поля на проводник с током было исследовано французским физиком Ампером. Ампер на основе опытов установил, что на прямолинейный проводник длиной dl с током I со стороны однородного магнитного поля, индукция которого \vec{B} , действует сила:

$$d\vec{F} = I \left[d\vec{l}, \vec{B} \right] \quad (12.6)$$



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 129 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Модуль силы Ампера определяется выражением

$$dF = IBdl \sin \alpha, \quad (12.7)$$

где α – угол между направлением тока в проводнике и вектором магнитной индукции \vec{B} .

Наглядно направление силы Ампера принято определять по правилу левой руки: если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входил вектор \vec{B} , а четыре вытянутых пальца расположить по направлению тока в проводнике, то отогнутый большой палец покажет направление силы Ампера (рис. 12.4)

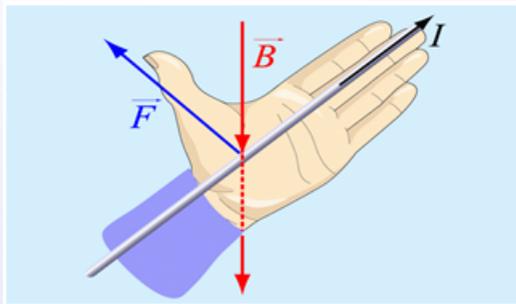


Рисунок 12.4

Из формулы (12.7) вытекает единица измерения магнитной индукции – *тесла* ($Tл$). Пусть \vec{B} перпендикулярен направлению тока в проводнике, тогда $\sin \alpha = 1$ и

$$B = \frac{dF}{Idl} \quad (12.8)$$

и

$$1 \text{ Тл} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \quad (12.9)$$



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 130 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

1 Тл – магнитная индукция такого однородного магнитного поля, которое действует с силой 1 Н на каждый метр длины прямолинейного проводника, расположенного перпендикулярно направлению поля, если по этому проводнику проходит ток 1 А.

Из формулы (12.2) для вакуума ($\mu = 1$) получим $H = \frac{B}{\mu_0}$. Единица напряженности магнитного поля (\vec{H}) – ампер на метр (А/м) – напряженность такого поля, индукция которого в вакууме равна $4\pi \cdot 10^{-7}$ Тл.

Также как и на проводник с током, магнитное поле действует и на движущийся в нем отдельный заряд. Процесс взаимодействия движущихся зарядов с внешним магнитным полем исследовался датским физиком Лоренцем. В результате обобщения опытных данных он вывел формулу для расчета силы, действующей со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу. Данная сила получила название *сила Лоренца*:

$$\vec{F} = q [\vec{v}, \vec{B}] \quad (12.10)$$

или

$$F_{\perp} = qvB \sin \alpha, \quad (12.11)$$

где q – заряд частицы, \vec{v} – ее скорость, \vec{B} – магнитная индукция, α – угол между векторами \vec{B} и \vec{v} . Будучи перпендикулярна скорости, сила Лоренца изменяет только направление скорости движения частицы и не изменяет ее величину.

Если частица влетает в однородное магнитное поле параллельно линиям магнитной индукции, то она продолжает двигаться по прямой линии с первоначальной скоростью равномерно и прямолинейно ($\alpha = 0$, $\sin \alpha = 0$ и следовательно $F_{\perp} = 0$).

Если вектор начальной скорости частицы перпендикулярен линиям магнитной индукции, то в этом поле частица будет двигаться по окружности некоторого радиуса с постоянным периодом. При этом период обращения зависит только от удельного заряда q/m частицы.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 131 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Если частица влетает в однородное магнитное поле под неким углом α к вектору магнитной индукции \vec{B} , то ее траектория представляет собой винтовую спираль (рис. 12.5).

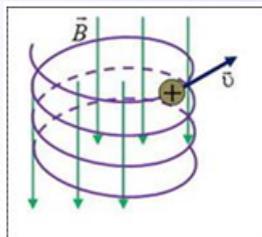


Рисунок 12.5

Особенности движения заряженных частиц в магнитном и электрическом полях широко используются в современной технике. Они лежат в основе работы радиолокатора, электронного микроскопа, осциллографа, ускорителей заряженных частиц и т. д. На этих же физических явлениях основана и масс-спектрометрия – метод определения масс частиц и их относительного содержания в сложных веществах, который широко используется в химии и биологии.

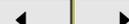
Опыт показывает, что все вещества, помещенные в магнитное поле, приобретают магнитные свойства. При этом одни вещества ослабляют внешнее магнитное поле, а другие усиливают его. Первые называют – *диамагнетики*. Для диамагнетиков μ немного меньше единицы. Вторые вещества называются *парамагнетики*. Для парамагнетиков μ немного больше единицы. Среди парамагнетиков выделяется группа веществ, вызывающих очень большое усиление ($\mu \gg 1$) внешнего поля. Эти вещества называются *ферромагнетики*. Подавляющее большинство веществ в природе – это диамагнетики. К диамагнетикам относятся органические соединения, вода, фосфор, сера, углерод, золото, серебро и т. д. Парамагнетиками являются некоторые газы (кислород, азот) и металлы (алюминий, вольфрам, платина). В довольно ма-



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 132 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

лчисленную группу ферромагнетиков входят железо, никель, кобальт, некоторые сплавы и окислы этих металлов.

Выясним физические причины диа-, пара- и ферромагнетизма. Исходя из классических представлений, движение электронов в атоме можно уподобить элементарному замкнутому круговому току (орбитальному току). Произведение силы кругового тока I на обтекаемую им площадь S называют *магнитным моментом* p_m кругового тока:

$$p_m = IS \quad (12.12)$$

Магнитный момент является вектором, расположенным перпендикулярно плоскости кругового тока в его центре и совпадающим по направлению с напряженностью магнитного поля H в центре кругового тока (**рисунок 12.6**).

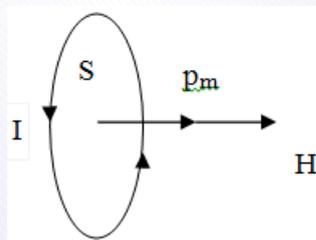


Рисунок 12.6

Каждому орбитальному току соответствует магнитный момент. Кроме того, электроны обладают магнитным моментом. Собственным магнитным моментом обладает также и ядро атома. Геометрическая сумма этих трех магнитных моментов образует *магнитный момент атома*.

У диамагнетиков магнитный момент атома равен нулю. Под влиянием внешнего магнитного поля у этих атомов возникает магнитный момент направленный противоположно внешнему полю. В результате диамагнетик ослабляет его. При лик-



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 133 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

ликвидации внешнего поля индуцированные магнитные моменты атомов исчезают и диамагнетик размагничивается.

У парамагнетиков суммарный магнитный момент атома не равен нулю. Атомы парамагнетика являются как бы маленькими магнитами. В отсутствие внешнего магнитного поля они расположены беспорядочно и парамагнетик магнитных свойств не проявляет. Внешнее поле поворачивает атомы парамагнетика таким образом, что их магнитные моменты устанавливаются преимущественно по полю и усиливают его. При ликвидации внешнего поля тепловое движение сразу же разрушает ориентацию атомных магнитных моментов и парамагнетик размагничивается.

У ферромагнетиков магнитная проницаемость не только в сотни, а то и в десятки тысяч раз превышает проницаемость парамагнетиков, но и непостоянна. Она зависит от напряженности внешнего магнитного поля. При ликвидации внешнего поля ферромагнетик полностью не размагничивается. В нем сохраняется остаточная магнитная индукция. Кроме того, ферромагнетики обладают еще одной особенностью: при определенной (для каждого ферромагнетика) температуре, называемой *точкой Кюри*, они теряют свои уникальные магнитные свойства и превращаются в обычный парамагнетик. Рассмотренные особенности ферромагнетика обусловлены существованием в нем крупных (объединяющих миллиарды атомов) областей – *доменов*. В пределах домена магнитные моменты атомов ориентированы одинаково.

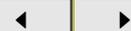
Вначале было отмечено, что магнитная стрелка вблизи каждой точки земной поверхности устанавливается определенным образом – приблизительно с севера на юг. Этот опытный факт является простейшим доказательством существования *магнитного поля Земли*. Еще в 1600 году английский ученый Уильям Гильберт в своей книге «О магните, магнитных телах и большом магните – Земле» представил Землю, как гигантский постоянный магнит, ось которого не совпадает с осью вращения Земли (угол между этими осями называют магнитным склонением). Гильберт подтвердил свое предположение на опыте: он выточил из естественного магнита большой шар и, приближая к поверхности шара магнитную стрелку, показал, что она всегда уста-



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 134 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

навливается так же, как стрелка компаса на Земле. Графически магнитное поле Земли похоже на магнитное поле постоянного магнита. В северном полушарии все линии магнитной поля Земли сходятся в точке, лежащей на 75° северной широты и 96° западной долготы. Эта точка называется южным магнитным полюсом. В южном полушарии точка схождения лежит приблизительно на 70° южной широты и 150° восточной долготы – северный магнитный полюс. Причем точки схождения лежат не на поверхности земли, а под ней. Магнитные полюсы Земли не совпадают с ее географическими полюсами (рис. 12.7).

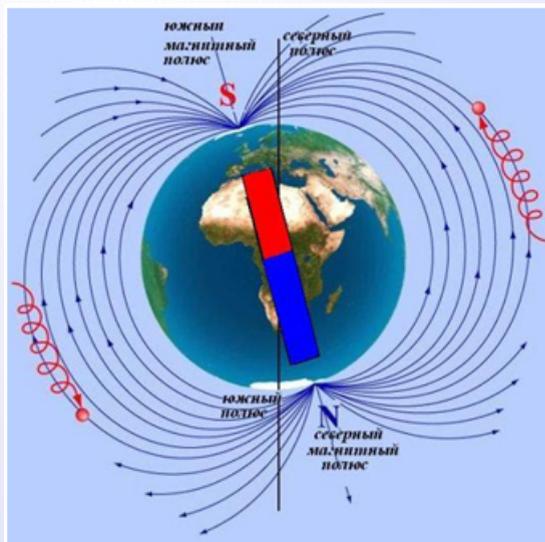


Рисунок 12.7

Основная причина наличия магнитного поля Земли в том, что ядро Земли состоит из раскаленного железа (хорошего проводника электрических токов, возникающих внутри Земли). Магнитное поле Земли образует магнитосферу, простираю-



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 135 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

щуюся на 70-80 тыс. км в направлении Солнца. Она экранирует поверхность Земли, защищает от вредного влияния заряженных частиц, высоких энергий и космических лучей, определяет характер погоды. Магнитное поле Земли меняется. Установлено, что существуют постоянные и кратковременные изменения магнитного поля Земли. Причиной постоянных изменений является наличие залежей полезных ископаемых. На Земле имеются такие территории, где ее собственное магнитное поле сильно искажается залеганием железных руд. Причина кратковременных изменений магнитного поля Земли – действие «солнечного ветра», т. е. действие потока заряженных частиц, выбрасываемых Солнцем. Магнитное поле этого потока взаимодействует с магнитным полем Земли, возникают «магнитные бури». На частоту и силу магнитных бурь влияет солнечная активность. В годы максимума солнечной активности (один раз в каждые 11,5 лет) возникают такие магнитные бури, что нарушается радиосвязь, а стрелки компасов начинают непредсказуемо «плясать».

В настоящее время накоплено огромное количество опытных фактов, свидетельствующих о влиянии магнитных полей на биологические объекты. В биофизике выделен целый раздел, получивший название магнитобиология. *Магнитобиология изучает влияние внешних искусственных и естественных магнитных полей на живые системы (клетка, организм, популяция и т. д.), исследует магнитные поля, генерируемые живыми структурами (сердце, мозг, нерв и т. п.), и определяет магнитные свойства веществ биологического происхождения.* К ним относятся, например способность многих живых организмов ориентироваться в магнитных полях, влияние магнитного поля на свойства крови, водного обмена, состояние кровеносных сосудов, активность переноса кислорода через кровь к окружающим тканям, транспортировку питательных веществ через полупроницаемые мембраны клеток. Резкое изменение внешнего магнитного поля, например, при магнитной буре или активной геомагнитной зоне всегда отрицательно сказывается на самочувствии и здоровье. Современная наука считает, что магнитное поле влияет на ткани организма через диа- и парамагнитные эффекты.



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 136 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лекция 13. Электромагнетизм

Явление электромагнитной индукции. Самоиндукция. Взаимная индукция. Переменный электрический ток. Получение синусоидального переменного тока. Действие переменного тока на организм. Понятие об электромагнитном поле. Электромагнитные волны. Шкала электромагнитных волн. Защита от электромагнитного излучения. Микроволновая терапия.

Литература: [1, с. 382–396], [2, с. 270–278].

При рассмотрении вопроса о движении заряженных частиц в магнитном поле было установлено, что на них действует сила Лоренца. В каждом проводнике содержатся свободные электроны. Если этот проводник перемещать в магнитном поле, то каждый электрон, находящийся в проводнике, подвергнется воздействию силы Лоренца. Произойдет перемещение зарядов и на концах проводника возникнет некоторая разность потенциалов. Если такой проводник замкнуть по цепи пойдет электрический ток. Следовательно, в проводнике *индуцируется* (от латинского слова *inductio* – наведение) электродвижущая сила (ЭДС индукции ε_i). Возникающий в проводнике ток называют *индукционным*, а само явление – явлением электромагнитной индукции.

Электрический ток возникает не только при поступательном движении контура (замкнутого проводника) в магнитном поле, но и в случаях, когда он вращается, происходит его деформация или неподвижный контур находится в переменном магнитном поле. Явление электромагнитной индукции открыл в 1831 году английский физик Майкл Фарадей. Это фундаментальное открытие явилось опытным подтверждением неразрывной связи магнитных и электрических явлений и является основой всей электротехники.

Условием возбуждения индукционного тока в контуре является изменение *потока магнитной индукции* (Φ), пронизывающего площадь S этого контура. Факти-



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 137 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

чески *магнитный поток* равен числу линий магнитной индукции пронизывающих поверхность, ограниченную контуром. Если магнитное поле однородно, то

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad (13.1)$$

где B – магнитная индукция, α – угол между направлением вектора магнитной индукции и нормалью \vec{n} к поверхности (рисунок 13.1). Единица измерения магнитного потока – *вебер* ($Вб$). Данная единица названа в честь немецкого физика Вильгельма Вебера. Под $1 Вб$ понимают магнитный поток через площадку в $1 м^2$, перпендикулярную магнитному полю, магнитная индукция которого равна $1 Тл$.

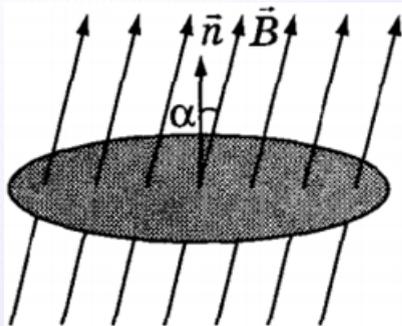


Рисунок 13.1

Таким образом, величина ЭДС индукции ε_i определяется скоростью изменения магнитного потока

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (13.2)$$

Данное выражение носит название закона электромагнитной индукции или *закона Фарадея*. Знак « $-$ » в формуле (13.2) отражает направление индукционного тока. Общее правило для определения направления индукционного тока установил в



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 138 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

1833 г. русский физик Ленц: *индуцированный ток имеет такое направление, что его собственное магнитное поле компенсирует изменение магнитного потока, вызывающее этот ток.* Исходя из формулы (13.2) можно дать другое определение единице магнитного потока. Если магнитный поток через площадь ограниченную контуром, изменяется на 1 Вб за 1 с , то в контуре индуцируется ЭДС равная 1 В . Следовательно: $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$.

Закон Фарадея применим не только к отдельному контуру (витку), но и к катушке, которую можно представить как N витков

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (13.3)$$

Рассмотрим частные случаи явления электромагнитной индукции: самоиндукцию и взаимную индукцию. Ток, текущий по контуру создает вокруг себя магнитное поле. Магнитный поток Φ , связанный с контуром, пропорционален силе тока I в контуре, т. е.

$$\Phi = LI, \quad (13.4)$$

где L – коэффициент, получивший название *индуктивность*. Он зависит от формы и размеров проводника. Предположим теперь, что за время dt ток в контуре меняется на величину dI . Тогда согласно формуле (13.4) магнитный поток, связанный с контуром, изменится на величину

$$d\Phi = LdI, \quad (13.5)$$

в результате чего в этом контуре появится электродвижущая сила самоиндукции

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt} \quad (13.6)$$

Из формулы (13.6) вытекает единица измерения индуктивности – *генри* (Гн):

$$1 \text{ Гн} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}} \quad (13.7)$$



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 139 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 140 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Единица названа в честь американского физика Джозефа Генри. Знак минус в формуле (13.6) показывает, что э.д.с. самоиндукции (следовательно, и ток самоиндукции) всегда препятствует изменению основного (внешнего) тока. Если основной ток увеличивается ($\frac{dI}{dt} > 0$), то $\varepsilon_i < 0$ и ток самоиндукции направлен навстречу основному току. Если же основной ток уменьшается ($\frac{dI}{dt} < 0$), то $\varepsilon_i > 0$ и ток самоиндукции направлен одинаково с основным током. Наглядным примером явления самоиндукции служат так называемые *экстраток* замыкания и размыкания, возникающие при включении и выключении тока в контуре, обладающем значительной индуктивностью. При включении тока возникает *экстраток замыкания*, направленный противоположно включенному току и потому задерживающий нарастание этого тока; если в контуре имеется электрическая лампочка, то она разгорается не сразу, а с заметным запаздыванием (тем большим, чем больше индуктивность контура).

В момент выключения тока возникает *экстраток размыкания*, направленный одинаково с выключаемым током и потому усиливающий этот ток (задерживающий его спадание). Вследствие этого на размыкаемом участке цепи (ключе, рубильнике и т. п.) образуется искра.

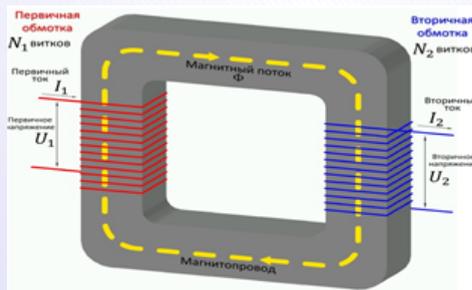


Рисунок 13.2

Взаимной индукцией называется возбуждение тока в контуре при изменении тока в соседнем контуре. Данное явление лежит в основе работы трансформатора

(рисунок 13.2), устройства применяемого для изменения силы тока и напряжения. Две обмотки трансформатора – первичная и вторичная надеты на общий замкнутый железный сердечник. Первичная обмотка имеет N_1 витков, а вторичная обмотка N_2 витков.

Изменение магнитного потока в сердечнике, вызванное например подключением к первичной обмотке внешней ЭДС ε_1 , вызовет во второй обмотке появление ε_2 . Отношение этих ЭДС:

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_2}{N_1} = k, \quad (13.8)$$

где k – коэффициент трансформации. Таким образом, задавая число витков в обмотке трансформатора можно понижать или повышать электродвижущую силу и соответственно понижать или повышать ток. При $k > 1$ трансформатор является повышающим, а при $k < 1$ – понижающим.

Возбуждение электродвижущей силы индукции в контуре, вращаемом в магнитном поле, используется для получения переменного электрического тока.

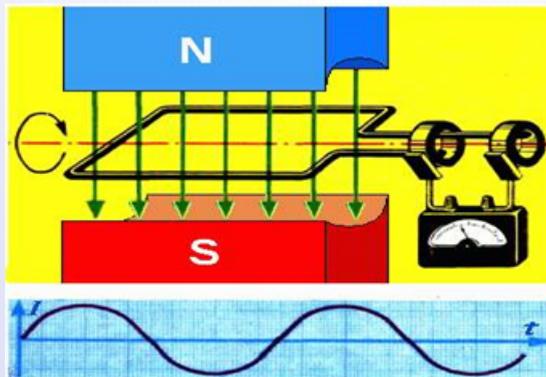


Рисунок 13.3



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 141 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Пусть прямоугольный контур площади S равномерно вращается в постоянном однородном магнитном поле, магнитная индукция которого равна B , с угловой скоростью ω (рисунок 13.3).

Магнитный поток, пронизывающий контур в любой момент времени t будет равен

$$\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t, \quad (13.9)$$

где $\alpha = \omega t$ – угол между направлением вектора магнитной индукции и нормалью к плоскости контура. Изменение магнитного потока вызовет в контуре периодически изменяющуюся ЭДС индукции, которая согласно закону Фарадея равна

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t \quad (13.10)$$

где $BS\omega = \varepsilon_m$ максимальное значение этой ЭДС (наступающее при $\sin \omega t = 1$).

Таким образом

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t \quad (13.11)$$

Данная переменная ЭДС, изменяющаяся по закону синуса, порождает в контуре переменный синусоидальный ток силой

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t, \quad (13.12)$$

где R – сопротивление контура и электрической цепи, куда отводится ток.

Переменный ток является колебательным процессом. Поэтому его описывают при помощи характеристик колебательного процесса. А именно: ε_m – амплитуда ЭДС, I_m – амплитуда тока (максимальное значение силы тока), ω – круговая частота, α – фаза, T – период, ν – частота.

Рассмотренный способ получения переменного тока лежит в основе устройства генератора переменного тока. В генераторе переменного тока контур состоит из N



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 142 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

последовательно соединенных витков проволоки, намотанной на ферромагнитный сердечник (ротор). Ротор приводится во вращение внешней силой в мощном магнитном поле создаваемом электромагнитом. Промышленные генераторы переменного тока создают напряжение в десятки тысяч вольт. Если через обмотку ротора генератора пропускать ток, то под действием силы Лоренца ротор придет во вращение, то есть получится электродвигатель.

Когда проводник движется в постоянном магнитном поле, индукционный ток вызывается силой Лоренца. Какая же сила возбуждает индукционный ток в неподвижном проводнике, находящемся в переменном магнитном поле? Ответ на этот вопрос был дан выдающимся английским физиком Максвеллом. Согласно Максвеллу, всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле. Последнее и является причиной возникновения индукционного тока в контуре.

Между тем, как понимали явление электромагнитной индукции Максвелл и Фарадей имеется существенное различие. Согласно Фарадею, электромагнитная индукция состоит в возбуждении электрического тока. А Максвелл видит сущность электромагнитной индукции, прежде всего в возбуждении электрического поля, а не тока. Появление индукционного тока в замкнутом проводнике есть лишь одно из проявлений электрического поля. Электромагнитная индукция может наблюдаться и тогда, когда в пространстве вообще нет никаких проводников. Возникающее электрическое поле может производить и другие действия: поляризовать диэлектрик, вызывать пробой конденсатора, изменять скорость заряженных частиц и т. д.

На основе исследований Фарадея по электромагнитной индукции Максвеллом в 60-х годах 19 века была разработана теория единого электромагнитного поля. Согласно этой теории переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле, а переменное магнитное поле порождает переменное электрическое поле. Эти вторичные поля имеют вихревой характер. Образуется система «переплетенных» между собой электрических и магнитных полей – *электромагнитное поле*. Посто-



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 143 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

янные электрические и магнитные поля являются лишь частными случаями единого электромагнитного поля. Источниками электромагнитного поля служат всевозможные переменные токи: переменный ток в проводниках, колебательное движение заряженных частиц, движение электронов в атомах и т. д. Максвелл сформулировал систему уравнений, в которой в сжатой и точной форме содержатся все количественные законы электромагнитного поля. То есть Максвелл облек основные идеи Фарадея в математическую форму. Система уравнений Максвелла является наиболее крупным достижением физики 19 века.

Из уравнений Максвелла следует существование электромагнитных волн. Каждая точка электромагнитного поля характеризуется определенным значением напряженностей (\vec{E}) электрического поля и магнитного поля (\vec{H}). Напряженности \vec{E} и \vec{H} связаны между собой и изменяются синхронно. Изменение \vec{H} в некоторой точке будет вызывать появление \vec{E} не только в этой точке, но и в соседних и наоборот, и эти изменения будут передаваться от одной точки к другой. Таким образом, в пространстве с определенной скоростью будет распространяться электромагнитное поле. Из теории Максвелла следует, что эта скорость равна

$$\nu = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\epsilon\mu}} \text{ м/с} \quad (13.13)$$

следовательно, скорость распространения электромагнитного поля совпадает со скоростью распространения света (в вакууме приблизительно $3 \cdot 10^8$ м/с), которая была определена экспериментально. Данный результат не является случайным и указывает на связь между оптическими и электромагнитными явлениями.

Распространяющееся в пространстве электромагнитное поле, в котором напряженности электрического и магнитного полей изменяются по периодическому закону, называется *электромагнитной волной*. Электромагнитную волну графически представляют в виде двух синусоид, лежащих во взаимно перпендикулярных плоскостях. Одна синусоида отображает колебания вектора напряженности электрического поля, а другая вектора напряженности магнитного поля (рис. 13.4).



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 144 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

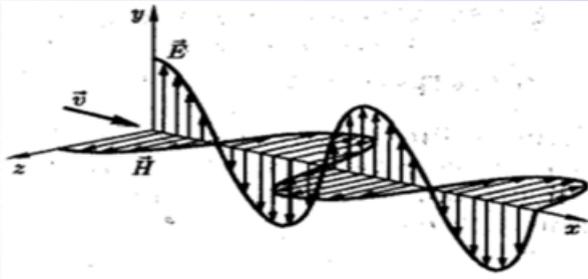


Рисунок 13.4

Вектор скорости электромагнитной волны перпендикулярен векторам \vec{E} и \vec{H} . Электромагнитные волны также как и механические характеризуются длиной волны λ , частотой ν и периодом T .

Расчеты показывают, что интенсивность электромагнитной волны (электромагнитная энергия, переносимая за единицу времени через единицу площади, перпендикулярной электромагнитному лучу) пропорциональна квадрату частоты волны. Поэтому для создания электромагнитных волн, способных переносить энергию на значительное расстояние, необходим переменный ток с частотой порядка миллиона герц. Переменные токи такой высокой частоты называют электрическими колебаниями.

Обычные генераторы переменного тока не могут создать ток такой частоты. В качестве источника электромагнитных волн высокой частоты используется так называемый колебательный контур. Простейший колебательный контур состоит из конденсатора и катушки самоиндукции (рис. 13.5).

Для возбуждения в контуре электрических колебаний конденсатор предварительно заряжают. Пусть верхняя пластина конденсатора заряжена положительно, а нижняя отрицательно. В начальный момент времени вся энергия контура будет сосредоточена в конденсаторе. Конденсатор начнет разряжаться, через катушку потечет электрический ток. Электрическая энергия конденсатора начнет превращаться в магнитную энергию катушки.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 145 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

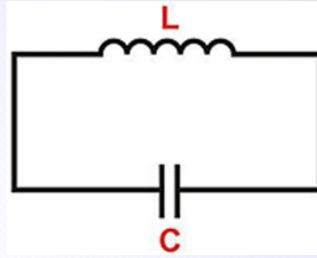


Рисунок 13.5

Когда конденсатор разрядится, ток в контуре и энергия катушки достигнут максимального значения. С этого момента ток в контуре, не меняя направления, будет уменьшаться, перезаряжая при этом конденсатор (нижняя пластина заряжается положительно, а верхняя отрицательно). Через некоторый промежуток времени конденсатор полностью перезарядится и энергия контура вновь окажется в электрическом поле конденсатора. В контуре появится ток, и процесс пойдет в обратном направлении.

Таким образом, в контуре возникает переменный электрический ток (электрические колебания). Период возникающих электрических колебаний определяется формулой Томсона (получена американским физиком Томсоном)

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (13.14)$$

Подбирая соответствующие значения индуктивности и емкости можно получать переменный ток очень высокой частоты, который создает интенсивное электромагнитное излучение.

В 1887–1891 гг. немецкий физик Герц, используя колебательный контур усовершенствованной конструкции (вibrator Герца), установил идентичность природы электромагнитного излучения и света. Он установил, что скорость распространения



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 146 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

электромагнитных волн равна скорости света, чем экспериментально подтвердил теорию Максвелла.

Дальнейшие исследования показали, что электромагнитную природу имеет не только видимый свет, но и инфракрасное и ультрафиолетовое излучения, рентгеновские и гамма – лучи, то есть существует целый спектр электромагнитных волн. Они распространяются в пространстве с одной и той же скоростью и отличаются друг от друга только длиной волны (частотой). Так в вакууме

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (13.15)$$

Названия для излучений, лежащих в различных областях спектра, сложились исторически.

Так радиоволны и ультракороткие волны имеют длину волны от нескольких километров до нескольких сантиметров. Генерируют их при помощи колебательных контуров различных конструкций. Инфракрасное излучение, видимый свет и ультрафиолетовые лучи испускают тела, нагретые до различных температур. Рентгеновские лучи генерируются при резком торможении электронов. Гамма – лучи испускаются при радиоактивном распаде атомов. Широкое распространение в технике (микроволновые печи, сотовые телефоны, устройства Bluetooth, Wi-Fi и т. д.) получили так называемые микроволны или сверхвысокочастотное излучение (СВЧ-излучение). Они представляют собой электромагнитное излучение, включающее в себя сантиметровый и миллиметровый диапазон радиоволн (от 30 см – частота 1 ГГц до 1 мм – 300 ГГц).

В медицине получила распространение *микроволновая терапия* – использование энергии электромагнитного поля СВЧ небольшой мощности для лечения воспалительных, травматических и дистрофических заболеваний суставов, некоторых болезней нервной системы, органов малого таза и внутренних органов.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 147 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Вопросы и задания для самоконтроля по разделу «Электричество и магнетизм»

1. В чем заключается явление электризации?
2. Какой заряд называется элементарным?
3. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда.
4. В чем различие между проводниками и диэлектриками?
5. Запишите закон Кулона.
6. Какая векторная величина является силовой характеристикой электрического поля?
7. Что такое электрический диполь?
8. Какая скалярная величина является энергетической характеристикой электростатического поля?
9. Что такое разность потенциалов?
10. Что такое электрическая емкость?
11. В чем заключается явление электростатической индукции?
12. В чем заключается явление поляризации диэлектриков?
13. Что такое биопотенциал?
14. Какое явление называется электрическим током?
15. Что такое сила тока? ЭДС? Напряжение?
16. Какой электрический ток называется постоянным?
17. Запишите закон Ома для однородного участка цепи и для замкнутой цепи?
18. Запишите закон Джоуля-Ленца.
19. Что представляет собой электрический ток в металлах, жидкостях, газах?
20. Что является источником магнитного поля?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 148 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

21. Какая векторная величина является основной силовой характеристикой магнитного поля?
22. Запишите закон Ампера.
23. Запишите выражение для силы Лоренца.
24. В чем разница между диамагнетиками и парамагнетиками?
25. В чем основная причина наличия магнитного поля у Земли?
26. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
27. Что такое электромагнитная волна?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 149 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

ОПТИКА

Лекция 14. Волновая оптика

Природа света. Интерференция и дифракция света. Дифракционная решетка. Рентгеноструктурный анализ и его использование. Естественный и поляризованный свет. Оптически-активные вещества. Поляриметрия. Исследование биологических систем в поляризованном свете. Дисперсия света. Поглощение и рассеяние света. Рассеяние света в атмосфере.

Литература: [1, с. 457–493], [2, с. 330–377].

Оптика (от греческого слова *оптикос* – *зрительный*) – раздел физики, в котором изучаются вопрос о природе света, закономерности световых явлений и процессы взаимодействия света с веществом.

В течение последних трех столетий представление о природе света претерпело весьма существенное изменение. В конце XVII в. сформировались две принципиально различные теории о природе света: *корпускулярная теория*, разработанная Ньютоном, и *волновая теория*, разработанная Гюйгенсом. Согласно корпускулярной теории, свет есть поток материальных частиц (*корпускул*), летящих с большой скоростью от источника света.

Согласно волновой теории, свет представляет собой волну, исходящую от источника света и распространяющуюся с большой скоростью в «мировом эфире» – неподвижной упругой среде, непрерывно заполняющей всю Вселенную. Таким образом, волновая теория рассматривала свет как механические волны, распространяющиеся в особой среде (подобно звуковым волнам в воздухе).

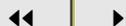
До конца XVIII в. подавляющее большинство физиков отдавало предпочтение корпускулярной теории Ньютона. В начале XIX века благодаря исследованиям *Юнга* и *Френеля* волновая теория была в значительной мере развита и усовершенствована.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 150 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

вана. Волновая теория успешно объяснила почти все известные в то время световые явления, в том числе интерференцию, дифракцию и поляризацию света, в связи с чем эта теория получила всеобщее признание, а корпускулярная теория Ньютона была отвергнута.

Слабым местом волновой теории являлся гипотетический «мировой эфир», реальность существования которого оставалась весьма сомнительной (в 1881 г. американский физик Майкельсон экспериментально доказал, что мирового эфира не существует). В 60-х годах XIX в., когда Максвелл разработал теорию единого электромагнитного поля, необходимость в «мировом эфире» как особом носителе световых волн отпала: выяснилось, что свет представляет собой электромагнитные волны и, следовательно, их носителем является электромагнитное поле.

Видимому свету соответствуют электромагнитные волны длиной от 0,77 до 0,38 мкм, создаваемые колебаниями зарядов, входящих в состав атомов и молекул. Таким образом, волновая теория о природе света эволюционировала в *электромагнитную теорию света*.

Представление о волновой (электромагнитной) природе света оставалось незыблемым вплоть до конца XIX в. Однако к этому времени накопился достаточно обширный материал, не согласующийся с этим представлением и даже противоречащий ему.

Изучение данных о спектрах свечения химических элементов, о распределении энергии в спектре теплового излучения черного тела, о фотоэлектрическом эффекте и некоторых других явлениях привело к необходимости предположить, что излучение и поглощение электромагнитной энергии носит *дискретный* (прерывистый) характер, т. е. свет испускается и поглощается не непрерывно (как это следовало из волновой теории), а *порциями (квантами)*.

Исходя из этого предположения немецкий физик *Планк* в 1900 г. создал квантовую теорию электромагнитных процессов, а *Эйнштейн* в 1905 г. разработал *квантовую теорию света*, согласно которой свет представляет собой поток *световых*



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 151 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

частиц – фотонов. Однако фотоны существенно (качественно) отличаются от обычных материальных частиц: все фотоны движутся со скоростью, равной скорости света, обладая при этом *конечной* массой («масса покоя» фотона равна нулю).

Важную роль в дальнейшем развитии квантовой теории света сыграли теоретические исследования, выполненные *Бором, Шредингером, Дираком, Фейнманом, Фоком* и др. По современным воззрениям, *свет – сложный электромагнитный процесс, обладающий как волновыми, так и корпускулярными свойствами.*

В некоторых явлениях (интерференция, дифракция, поляризация света) обнаруживаются волновые свойства света; эти явления описываются волновой теорией. В других явлениях (фотоэффект, люминесценция, атомные и молекулярные спектры) обнаруживаются корпускулярные свойства света; такие явления описываются квантовой теорией.

Таким образом, волновая (электромагнитная) и корпускулярная (квантовая) теория не отвергают, а дополняют друг друга, отражая тем самым *двойственный характер свойств света.* Здесь мы встречаемся с наглядным примером диалектического единства противоположностей: свет является и волной и частицей. Уместно подчеркнуть, что подобный дуализм присущ не только свету, но и микрочастицам веществ.

Современная физика стремится создать *единую* теорию о природе света, отражающую двойственный корпускулярно-волновой характер света; разработка такой единой теории пока еще не завершена.

Интерференция света – это явление усиления или ослабления колебаний, которое происходит в результате сложения двух или нескольких волн сходящихся в некоторой точке пространства. Необходимым условием интерференции волн является их когерентность: равенство их частот и постоянная по времени разность фаз. Этому условию *удовлетворяют монохроматические* световые волны (от греческого (монос) – один, (хрома) – цвет, т. е. монохроматическому свету соответствует какая-либо одна длина волны). При соблюдении данного условия можно наблюдать и интерференцию других волн (например, звуковых).



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 152 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Для световых волн, так же как и для любых других справедлив принцип суперпозиции. Так как свет имеет электромагнитную природу, то применение этого принципа означает, что результирующая напряженность электрического (магнитного) поля двух световых волн, проходящих через одну точку, равна векторной сумме напряженностей электрических (магнитных) полей каждой из волн в отдельности.

В частном случае, когда напряженности составляющих полей равны, но противоположно направлены, напряженность результирующего поля будет равна нулю (свет гасится светом). Если они направлены в одну сторону, происходит максимальное усиление света.

Результатом интерференции является интерференционная картина – устойчивое во времени распределение в пространстве интерференционных максимумов и минимумов (например, чередование темных и светлых полос на экране; в природе радужная окраска крыльев насекомых и птиц, мыльных пузырей, масляной пленки на воде и т. д.).

Частным случаем интерференционной картины являются так называемые кольца Ньютона (рис. 14.1).

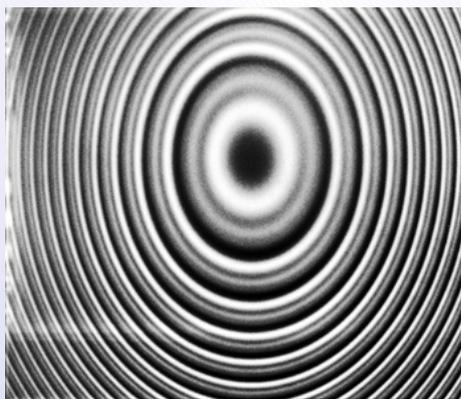


Рисунок 14.1



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 153 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Они наблюдаются в системе образованной плоскопараллельной пластинкой и соприкасающейся с ней плосковыпуклой линзой с большим радиусом кривизны.

Важной оптической характеристикой среды является *абсолютный показатель преломления* n (или просто показатель преломления). Он показывает во сколько раз скорость света в данной среде меньше скорости света в вакууме

$$n = \frac{c}{v}. \quad (14.1)$$

Для вакуума $n = 1$.

Результат интерференции двух световых волн (в одной и той же среде) зависит от *оптической разности хода* $\Delta = |n_1 l_1 - n_2 l_2|$. Где l_1 и l_2 – геометрические длины путей, прошедших светом от источников S_1 и S_2 до точки A в средах с показателями преломления n_1 и n_2 соответственно (рис. 14.2).

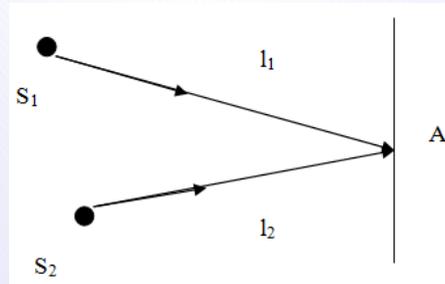


Рисунок 14.2

Если в разности хода лучей укладывается четное число полуволн, т. е. если

$$\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2}, \quad (14.2)$$

то в точке A на экране будет максимум света (λ – длина волны, S_1 и S_2 – монохроматические источники света, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$).



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 154 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Если в разности хода лучей укладывается нечетное число полуволн, т. е. если

$$\Delta l = (k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (14.3)$$

то в точке A будет минимум света. Интерференционная картина очень чувствительна к величине разности хода интерферирующих волн. На этом основано *устройство интерферометра* прибора служащего для определения малых длин, углов, показателя преломления среды, длин световых волн.

Дифракцией называется отклонение света от прямолинейного распространения близи препятствия (огибание светом преграды). Так например если между источником света S и экраном A поставить другой экран B с отверстием, на экране A можно наблюдать дифракционную картину состоящую из чередующихся светлых и темных колец и захватывающих область геометрической тени (особенно заметно, когда размеры отверстия много меньше расстояния между экранами).

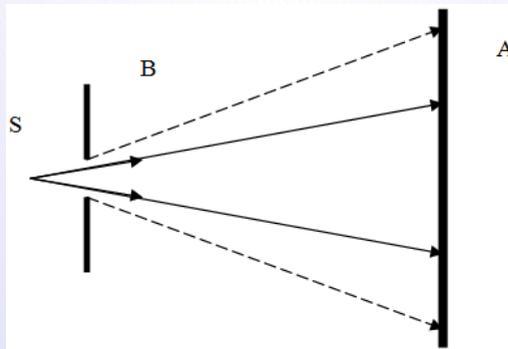


Рисунок 14.3

При использовании белого (немонохроматического света) дифракционная картина приобретает радужную окраску.



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 155 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Явление дифракции объясняется при помощи принципа Гюйгенса – Френеля. Согласно данному принципу, каждая точка волновой поверхности достигающей отверстия становится вторичным источником света. Эти источники являются когерентными, поэтому исходящие от них световые лучи будут интерферировать между собой. В зависимости от величины разности хода на экране A возникнут максимумы и минимумы освещенности. В лабораторной практике дифракционную картину получают обычно от узких светящихся щелей. Совокупность большого числа параллельных узких прозрачных для света щелей, разделенных непрозрачными промежутками, называют *дифракционной решеткой*. Дифракционные решетки изготавливают путем нанесения тонких штрихов на поверхности стеклянной пластинки (прозрачная решетка) или металлического зеркала (отражательная). Сумму ширины щели a и промежутка b между щелями называют периодом или постоянной решетки: $d = a + b$. Дифракционные решетки дают четкую дифракционную картину и применяются для определения длины волны, а также в спектральном анализе для разложения света в спектр и заключения о химическом составе вещества. Дифракционные картины нередко возникают в природе. Так, например, цветные кольца, окружающие источник света, когда воздух насыщен каплями воды (туман) или пылью результат дифракции света на этих частицах. Дифракцией объясняется окраска перламутра и радужный цвет глаз многих насекомых, глаза которых являются своеобразными дифракционными решетками.

В химии широкое применение получил рентгеноструктурный анализ, метод исследования структуры вещества по распределению в пространстве и интенсивностям рассеянного на анализируемом объекте рентгеновского излучения. В его основе лежит взаимодействие рентгеновского излучения с электронами вещества, в результате которого возникает дифракция рентгеновских лучей. Дифракционная картина зависит от длины волны используемых рентгеновских лучей и строения объекта. Для исследования атомной структуры применяют излучение с длиной волны порядка размеров атомов. Методами рентгеноструктурного анализа изучают металлы, сплавы, минералы, неорганические и органические соединения, полимеры, аморф-



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 156 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

ные материалы, жидкости и газы, молекулы белков, нуклеиновых кислот и т. д. Наиболее успешно его применяют для установления атомной структуры кристаллических тел. Это обусловлено тем, что кристаллы обладают строгой периодичностью строения и представляют собой созданную самой природой дифракционную решётку для рентгеновских лучей.

Свет представляет суммарное электромагнитное излучение множества атомов. Как известно электромагнитную волну, можно представить в виде колебаний двух взаимно перпендикулярных векторов напряженностей электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} . Так как электромагнитная волна является поперечной, то оба вектора колеблются в плоскостях, перпендикулярных к вектору скорости – направлению распространения луча. Электромагнитная волна, в которой колеблется лишь один из этих векторов, невозможна. Электрическое поле, в котором изменяется \vec{E} , неизбежно порождает магнитное поле, в котором по такому же закону изменяется \vec{H} , и наоборот. Явления поляризации рассматривается относительно вектора напряженности \vec{E} , но при этом следует помнить об обязательном существовании перпендикулярного ему вектора напряженности \vec{H} . Плоскость, в которой происходят колебания вектора напряженности электрического поля, называют плоскостью колебаний. Плоскость, в которой колеблется вектор напряженности магнитного поля, называется плоскостью поляризации.

Естественный свет с этой точки зрения можно схематично представить следующим образом (рис. 14.4):

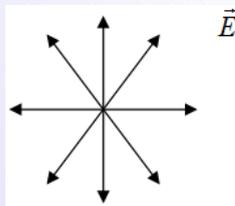


Рисунок 14.4



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 157 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Равномерное расположение векторов \vec{E} обусловлено большим числом атомарных излучателей. Такой свет называется *неполяризованным*. В таких световых волнах векторы имеют различные ориентации колебаний, причем все ориентации равновероятны. Если влиянием внешних воздействий на свет или внутренних особенностей источника света появляется предпочтительное, наиболее вероятное направление колебаний, то такой свет называется *частично поляризованным* (рис. 14.5).

С помощью специальных устройств из пучка естественного света можно выделить луч, в котором колебания вектора \vec{E} будут происходить в одной определенной плоскости (рис. 14.6).

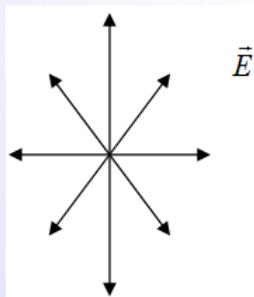


Рисунок 14.5

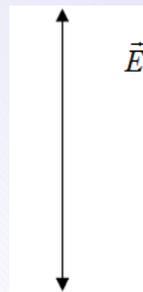


Рисунок 14.6

Такой свет будет полностью поляризованным. В отличие от естественного света поляризованный свет характеризуется кроме интенсивности и длины волны еще и положением плоскости поляризации. Человеческий глаз не отличает естественный и поляризованный свет. Поляризация света видна многим насекомым. Особенно это касается пчёл и муравьёв, которые в облачную погоду благодаря такой своей особенности могут ориентироваться на местности и без труда возвращаться в места обитания. Такая способность достигается за счет строения зрительной системы. В то время как в глазе человека и любого другого млекопитающего животного свето-



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 158 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

чувствительные молекулы располагаются беспорядочно, у насекомых они ориентированы в одном направлении и лежат в аккуратных рядах.

На практике поляризованный свет обычно получают, пропуская естественный свет через кристаллы, которые, как известно, характеризуются анизотропностью (физические свойства зависят от направления в кристалле). Поляризованный свет широко используют в химических и биологических исследованиях. Например, некоторые вещества, называемые оптически активными, поворачивают плоскость поляризации проходящего через них поляризованного света. Причем угол поворота зависит от толщины слоя вещества. Таким образом, можно определять концентрацию веществ в растворе, что лежит в основе метода исследования веществ – поляриметрии. С помощью оптических поляриметров определяют величину вращения плоскости поляризации света при прохождении его через оптически-активные среды (твёрдые вещества или растворы). Поляриметрия широко применяется в аналитической химии для быстрого измерения концентрации оптически-активных веществ для идентификации эфирных масел и в других исследованиях. Почти все биологически функциональные молекулы являются оптически активными. Поляризация широко используется в технике это и 3D-кинематограф и поляризационные очки, в которых не видно бликов солнца на воде, а свет фар встречных машин не слепит водителя и т. п.

Значение показателя преломления среды в основном определяется свойствами этой среды. Однако в некоторой степени он зависит еще и от длины волны (частоты) света. Поэтому одна и та же среда по-разному преломляет световые лучи разной длины волны. Зависимость показателя преломления среды от длины световой волны называется *дисперсией света* (от латинского *dispersio* – рассеяние).

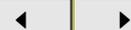
Дисперсия называется нормальной, если показатель преломления возрастает с уменьшением световой волны, в противном случае аномальной. Благодаря дисперсии, луч белого света, проходящий через преломляющую среду, оказывается разложенным на различные монохроматические лучи (красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый). Попадая на экран, эти лучи образуют дис-



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 159 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

персионный спектр – совокупность разноцветных полос. Наиболее четко дисперсионный спектр обнаруживается при преломлении света в призме (рис. 14.7). Угол между лучами, соответствующими крайним цветам дисперсионного спектра, называется углом дисперсии. От него зависит ширина спектра. По виду спектра можно судить о химическом составе преломляющей среды. На этом основан так называемый спектральный анализ.

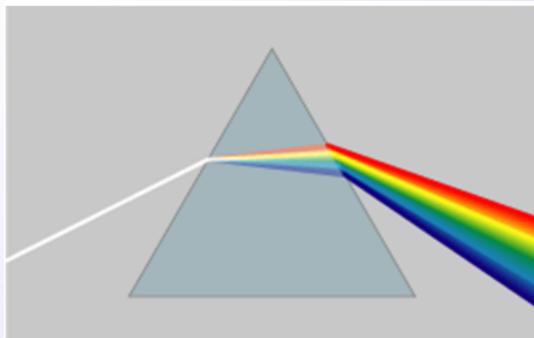


Рисунок 14.7

При прохождении света через вещество происходит его частичное поглощение, обусловленное превращением электромагнитной энергии световой волны в другие виды энергии (например, тепловую энергию). Вещества слабо поглощающие свет называются прозрачными. Сильно поглощающие свет – непрозрачными. Такое разделение является относительным, так как прозрачность зависит не только от вида вещества, но и толщины его слоя. Кроме того, поглощение света веществом носит избирательный характер. Различные вещества по-разному поглощают свет разных длин волн. Именно этим определяется цвет тела. Из потока белого цвета данное тело поглощает только лучи определенной длины волны, остальные пропускаются, отражаются или рассеиваются и воспринимаются человеческим глазом. Так, напри-



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 160 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

мер листья живых растений обладают значительным поглощением во всем видимом спектре, кроме зеленой и темно-красной его части.

При распространении света в однородной среде, как показали исследования Бугера и Ламберта, интенсивность света изменяется по следующему закону:

$$I = I_0 e^{-kx}, \quad (14.4)$$

где I_0 – интенсивность света при входе в слой вещества, I – интенсивность света при выходе из него, x – толщина слоя вещества, k – коэффициент поглощения, зависящий от рода вещества и длины волны. Поглощением света обусловлены, в конечном счете, все виды воздействия света на вещество. Именно в результате действия света возникает фотосинтез (превращение неорганических веществ в органические сопровождающееся выделением кислорода).

Проходя через мутную среду (среда в которой взвешено множество частиц какого либо постороннего вещества), свет дифрагирует от ее беспорядочно расположенных микрооднородностей и распространяется во все стороны (рассеивается). При этом среда приобретает голубой оттенок. Данное явление объясняется законом Релея:

$$I \sim 1/\lambda^4, \quad (14.5)$$

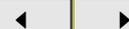
т. е. интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна четвертой степени длины волны. Из формулы (14.5) видно, что лучи с более короткой длинной волны рассеиваются сильнее (самой маленькой длиной волны обладает голубой свет). Рассеяние света происходит и в средах очищенных от посторонних частиц (так называемое молекулярное рассеяние). В данном случае свет дифрагирует от случайных уплотнений среды обусловленных беспорядочным тепловым движением молекул. В данном случае интенсивность рассеянного света невелика и становится заметной при большой толщине среды. Молекулярным рассеянием объясняется голубой цвет неба и желтый цвет солнечного диска. Так как свет, проходящий через атмосферу, состоит преимущественно из длинных волн.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 161 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лекция 15. Геометрическая оптика

Отражение и преломление света. Полное отражение света. Световоды и их использование в эндоскопии. Тонкие линзы. Оптическая сила линз. Недостатки линз. Оптическая система глаза. Недостатки оптической системы глаза и их исправление.

Литература: [1, с. 428–444].

В однородной среде (*оптически однородной средой* является среда, во всех точках которой показатель преломления одинаков) свет распространяется прямолинейно с постоянной скоростью. Прямая, вдоль которой распространяется световая волна, называется *лучом*. Прямолинейность световых лучей нарушается, если свет падает на границу раздела двух сред. При этом наблюдается раздвоение луча: отраженный луч распространяется в той же среде с прежней скоростью v_1 , а преломленный луч проходит во второй среде со скоростью v_2 (рисунок 15.1).

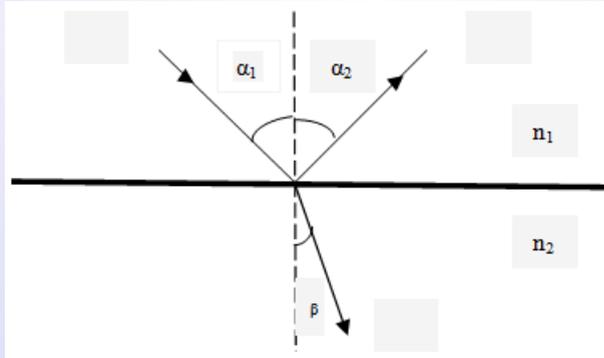


Рисунок 15.1



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 162 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Распространение лучей подчиняется законам преломления и отражения света:

1. Угол падения равен углу отражения:

$$\alpha_1 = \alpha_2 \quad (15.1)$$

2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \text{const}, \quad (15.2)$$

где n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления граничащих сред.

3. Луч падающий, луч отраженный и луч преломленный лежат в одной плоскости с перпендикуляром, проведенным в точке падения к границе раздела.

Из двух сред, имеющих различные показатели преломления, среда с меньшим показателем преломления называется *оптически менее плотной*, а среда с большим показателем преломления – *оптически более плотной*. Если свет проходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду, то согласно формуле (15.2), угол падения α будет меньше угла преломления β (рис. 15.2).

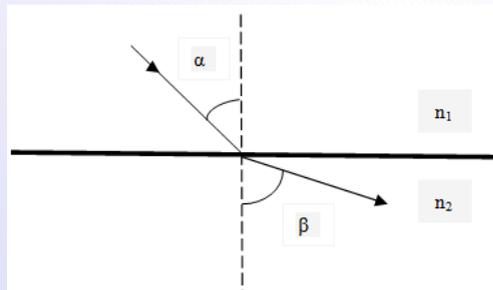


Рисунок 15.2



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 163 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Поэтому при некотором угле падения α_0 угол преломления окажется равным 90° , и преломленный луч будет скользить вдоль границы раздела сред, не входя во вторую среду. Угол α_0 называется *предельным углом падения*. При $\alpha > \alpha_0$ свет полностью отражается в первую среду. Это явление называется *полным отражением света*.

Явление полного отражения нашло применение в *волоконной оптике*, сущность которой состоит в следующем. Стеклянная нить покрывается слоем оптически менее плотного вещества. Луч света, падающий на торец такой нити, проходит через всю нить, испытывая многократные полные отражения от ее поверхности, и выходит через другой ее торец независимо от того, каким образом изогнута нить. Кабель, составленный из множества таких нитей, образует *световод*, позволяющий как угодно искривлять путь светового пучка. Если перед торцом световода поместить освещенный объект, то на другом конце световода появится его точное изображение. Кабели на базе оптических волокон используются в волоконно-оптической связи, позволяющей передавать информацию на большие расстояния с более высокой скоростью передачи данных, чем в электронных средствах связи. Пучок света, передаваемый оптическим волокном, используется совместно с линзами — например, в эндоскопе, который используется для просмотра объектов через маленькое отверстие. Технические эндоскопы используются для осмотра труднодоступных полостей машин и оборудования при техническом обслуживании и оценке работоспособности (лопатки турбин, цилиндры двигателей внутреннего сгорания, оценка состояния трубопроводов и т. д.). Медицинские эндоскопы используются в медицине для исследования и лечения полых внутренних органов человека (пищевод, желудок, бронхи, мочеиспускательный канал, мочевого пузыря, женские репродуктивные органы, почки, органы слуха), а также брюшной и других полостей тела. Эндоскопы вводят через естественные отверстия тела или через операционные разрезы.

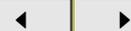
Самой существенной частью оптического прибора является *линза* (от латинского слова *lens* – *чечевица*). Линзой называется прозрачное тело, обладающее определенным показателем преломления и ограниченное двумя криволинейными (обычно



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 164 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

сферическими) поверхностями. Кривизна поверхности характеризуется радиусами кривизны R_1 и R_2 (рис. 15.3).

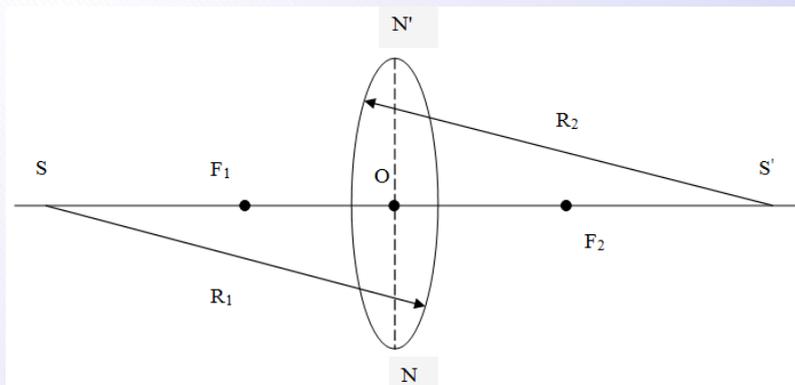


Рисунок 15.3

Если радиусы кривизны велики по сравнению с толщиной линзы, то такая линза называется тонкой. Прямая SS' , проходящая через центры кривизны поверхностей, образующих линзу, называется *главной оптической осью* линзы. Точка O на главной оптической оси, проходящая через которую лучи не преломляются, называется *оптическим центром* линзы. Плоскость, проходящая через прямую NN' , перпендикулярная главной оптической оси, называется *главной плоскостью линзы*. Пучок света, идущий параллельно главной оптической оси, собирается линзой в точке F_2 (F_1), называемой *главным фокусом линзы*. Расстояние F от оптического центра линзы до ее главного фокуса называется *фокусным расстоянием* линзы. Фокусное расстояние собирающей линзы считается положительным ($F > 0$), рассеивающей – отрицательным ($F < 0$).

Изображение предмета, даваемое линзой. Можно получить непосредственным геометрическим построением. Для этого достаточно провести от каждой из край-



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 165 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

них точек предмета по два луча. Один луч должен быть параллельным оптической оси, другой должен проходить через оптический центр. Если предмет расположен между фокусом и двойным фокусом собирающей линзы, то изображение получается действительным, увеличенным, перевернутым (рис. 15.4).

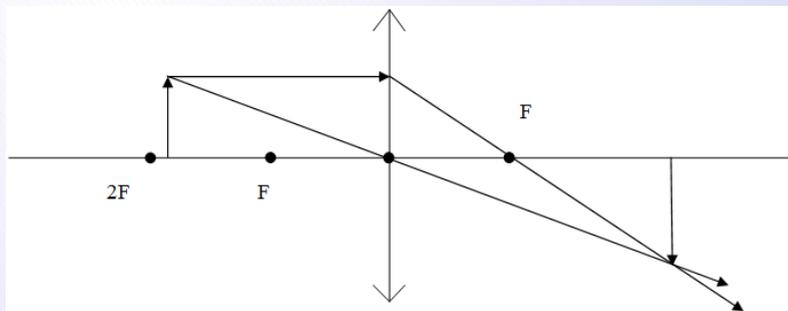


Рисунок 15.4

Если предмет расположен между фокусом и оптическим центром, то изображение получается мнимое, увеличенное и прямое (рис. 15.5).

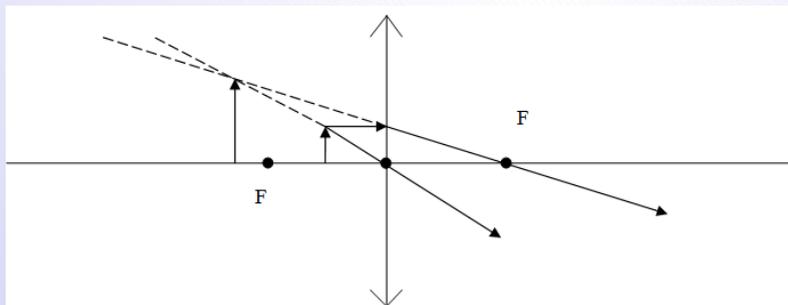


Рисунок 15.5



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 166 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Общая формула тонкой линзы, помещенной в однородную среду, имеет вид

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (15.3)$$

где a и b – расстояния от оптического центра линзы до предмета и его изображения соответственно, n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления линзы и среды. Расстояние b положительно для действительного изображения и отрицательно для мнимого. Рассеивающая линза всегда дает мнимое изображение, за исключением случая, когда на нее падает пучок сходящихся лучей.

Формула (15.3) справедлива при следующих условиях: лучи падающие на линзу, образуют небольшие углы с ее главной оптической осью; каждой точке предмета соответствует единственная точка изображения, которое называется *стигматическим* (от греческого слова стигма – укол). Стигматичность характеризует хорошее качество изображения. Положительная или отрицательная величина

$$D = \frac{1}{F} \quad (15.4)$$

называется *оптической силой линзы* и измеряется в *диоптриях* (дптр). Одна диоптрия это оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 метр.

Если предмет находится бесконечно далеко от линзы ($a = \infty$) то $b = F$ и

$$D = \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (15.5)$$

Принимая во внимание формулу (15.3), можно записать формулу линзы в виде

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad (15.6)$$

Изображения светящихся предметов, получаемое с помощью реальных оптических систем, имеет ряд дефектов. Кратко рассмотрим наиболее существенные из них.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 167 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Сферическая aberrация (от латинского слова *aberratio* – *уклонение*). Имеет место при прохождении через линзу не только белого света (все длины волн видимого света), но и монохроматического излучения. Сущность данного дефекта изображения заключается в том, что лучи прошедшие через центральную область линзы, и лучи, прошедшие через периферийные участки линзы, собираются не в одной точке, даже если источник света точечный. В результате сферической aberrации изображение точки S , лежащей на оптической оси системы, получается в виде небольшого кружка. При определенной комбинации собирающей линзы с рассеивающей можно получить собирающую систему, в которой сферическая aberrация сведена до минимума.

Хроматическая aberrация. Имеет место при прохождении через линзу света, состоящего из излучений разных длин волн, в общем случае белого света. Пучок белого света испытывает дисперсию. Фиолетовые лучи имеют наибольший показатель преломления, поэтому они соберутся ближе к линзе. Красные лучи, показатель преломления которых меньше, соберутся дальше от линзы. Поэтому изображение светящейся точки, испускающей белый свет, имеет вид радужного пятна. Хроматическую aberrацию устраняют, подбирая линзы с различной дисперсией.

Астигматизм. Этот недостаток связан с невозможностью получить стигматическое изображение даже для узких пучков света, если они падают на линзу под большим углом к главной оптической оси. В результате нарушается подобие между предметом и изображением. Изображение точки предмета может иметь вид небольшого кружка, эллипса, отрезка прямой. Изображения предметов имеют изогнутую поверхность. Исправление астигматизма достигается сложной системой линз.

Оптические приборы многочисленны и разнообразны и нашли широкое распространение в биологии. Рассмотрим характерные особенности некоторых наиболее широко применяемых оптических приборов.

Луна (от французского *loupe*). Оптический прибор для рассматривания мелких объектов, плохо различимых глазом. Обычно это двояковыпуклая короткофокусная линза. Наблюдаемый предмет помещают от лупы на расстоянии, немного меньшем



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 168 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

её фокусного расстояния. В этих условиях лупа даёт прямое, увеличенное и мнимое изображение оптического предмета. После прохождения лупы лучи от предмета ещё раз преломляются в глазу и собираются в его дальней точке. Они попадают в глаз под углом, большим, чем лучи от предмета в отсутствие лупы; этим и объясняется увеличивающее действие лупы (рис. 15.6).

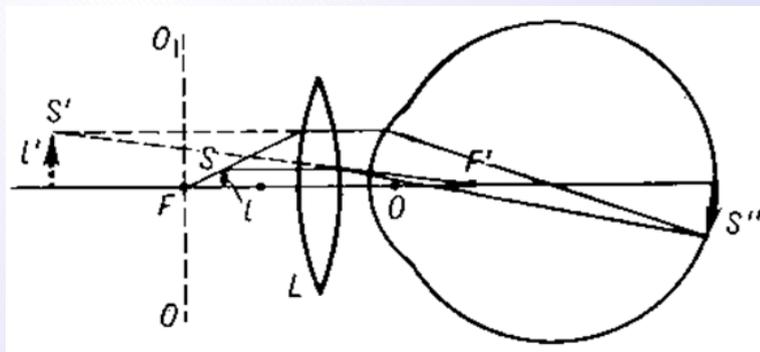


Рисунок 15.6

Предмет l помещают в непосредственной близости от фокальной плоскости лупы OO_1 . Лучи, исходящие из точки S предмета, собираются в точке S'' на сетчатке глаза. В этой же точке собирались бы лучи от точки S' , если бы лупы не было (точка S' – мнимое изображение точки S).

Размер изображения на сетчатке глаза определяется углом зрения. Однако для малых предметов угол зрения мал и детали и детали предмета выявляются недостаточно. Оптические приборы позволяют увеличить угол зрения. Достигаемый при этом эффект характеризуется угловым увеличением Γ прибора

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \alpha'}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (15.7)$$



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 169 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

где α' и α – углы зрения, под которыми виден предмет соответственно через прибор и невооруженный глаз. Угловое увеличение лупы подсчитывается по формуле

$$\Gamma = \frac{25}{F}, \quad (15.8)$$

где 25 – расстояние наилучшего зрения для нормального глаза в см, F – фокусное расстояние линзы, выраженное также в см.

Микроскоп (от греческих слов микрос – маленький и скопо – смотрю). Самыми простыми и самыми старыми из микроскопов являются оптические микроскопы. Такой микроскоп состоит из двух оптических систем: объектива и окуляра. В качестве объектива используется сложная система линз, различных по форме и составу стекла, которая работает как одна линза с очень коротким фокусным расстоянием. Рассматриваемый предмет помещается на предметный столик и сверху накрывается тонким покровным стеклом. Устройство типичного микроскопа изображено на [рис. 15.7](#).

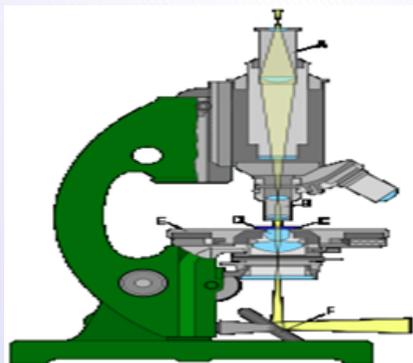


Рисунок 15.7



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 170 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Угловое увеличение микроскопа равно

$$\Gamma = \frac{25\Delta}{F_1 \cdot F_2}, \quad (15.9)$$

где F_1 и F_2 – фокусные расстояния соответственно объектива и окуляра (см); 25 – расстояние наилучшего зрения для нормального глаза в см, Δ – расстояние между внутренними фокусами объектива и окуляра. Обычный микроскоп работает с видимым оптическим излучением, в диапазоне 400–700 нм потому максимальное увеличение, которого можно добиться, не превышает ~ 2000 раз.

Степень проникновения в микромир, изучения микромира зависит от возможности рассмотреть величину микрообъектов, от разрешающей способности прибора, определяемой длиной волны используемого в микроскопии опорного излучения (свет, УФ, ИК, рентгеновское излучение). Главным ограничением возможности рассматривать более мелкие частицы – это когда, достигнут предел возможности применить длину опорной (например, размер площади) волны излучения (освещения) объекта меньше его (то есть внутри его границ). Например, наш глаз способен рассмотреть размер пятен изображения или две риски в пределах 0,176 мм с расстояния 250 мм. Уменьшение размеров пятен или расстояний между рисками мы воспринимаем как сплошное любое цветное или чёрно-белое (серое) изображение без видимых деталей. То есть «проникнуть глубже» в микромир возможно при применении более коротковолновых излучений, то есть излучений с меньшими длинами волн, соответственно с более высокой *разрешающей способностью* микроскопов. В настоящее время достигнут предел разрешающей способности микроскопа или микроскопии, равный длине опорной волны луча «жёсткого» рентгеновского излучения (1-10 нм).

В 2006 году немецкие ученые Штефан Хелль и Мариано Босси разработали оптический микроскоп, позволяющий наблюдать объекты размером около 10 нм и получать высококачественные трехмерные 3D изображения. Увидеть объекты размером менее 200 нанометров (минимальной длины волны ближнего ультрафиолетового излучения) было возможно только при помощи неоптических методов (например,



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 171 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

электронной микроскопии), однако эти методы имели свои ограничения, в частности, в отличие от оптических не позволяли работать с целыми и тем более живыми клетками. Ученые применили метод микроскопии, в котором молекулы при помощи специально подобранного очень короткого импульса переводятся из «темного» состояния в «светлое», при котором они излучают энергию, люминесцируют. Излучаемый свет фиксируется и тем самым выдает данные об объектах размером значительно меньше 200 нанометров. Эта разработка позволила взглянуть в микромир живых клеток на атомно-молекулярном уровне в трехмерном пространстве 3D с разрешением изображений в 1-10 нм.

Существует несколько видов микроскопии: оптическая микроскопия, электронная микроскопия, рентгеновская микроскопия, рентгеновская лазерная микроскопия, отличающиеся конструктивными элементами, деталями, узлами самих микроскопов, что обеспечивает наблюдение в разных диапазонах спектра электромагнитных лучей. Каждый из видов микроскопии тесно связан с техническими возможностями соответствующего оборудования. Все указанные направления имеют комплекс специальных приёмов для подготовки образцов, фиксации объектов исследования, микрофотографирования и видеозаписи, дешифровки изображений. Химическими и физическими методами отдельные элементы изображения могут быть выделены (окрашены, протравлены) или замаскированы, с целью определения тонкой структуры объекта. Существуют методы повышения контрастности и цветовой контрастности изображений, замены цветов для улучшения восприятия структуры объекта. Разработаны различные компьютерные программы для выделения и подсчёта числа определённых структурных элементов изображения. Возможности микроскопии как метода изучения и фотографирования малых объектов зависят от разрешающей способности, применения новых технологий оптических систем, стереоскопии, методов подготовки объекта (срезы, окрашивание препаратов, использование метода тёмного и светлого поля, поляризованного света и т. д.).

Глаз как оптическая система. Глаз человека имеет приблизительно шарообразную форму; диаметр его (в среднем) 2,5 см; глаз окружен снаружи тремя оболочками (рис. 15.8).



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 172 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

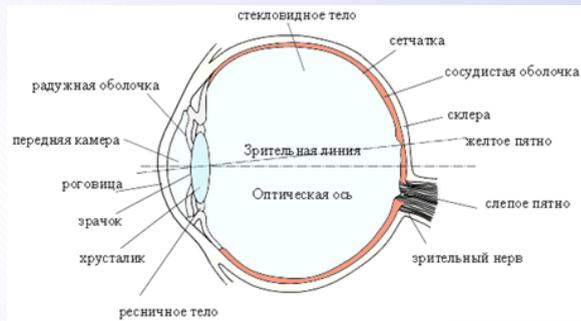


Рисунок 15.8

Внутри глаза, непосредственно за зрачком, расположен хрусталик, представляющий собой прозрачное упругое тело, имеющее форму двояковыпуклой линзы. Кривизна поверхностей хрусталика может меняться в результате действия облегающей его со всех сторон мышцы. По своему устройству глаз как оптическая система сходен с фотоаппаратом. Роль объектива выполняет хрусталик совместно с преломляющей средой передней камеры и стекловидного тела. Изображение предмета, рассматриваемого глазом, помещается на сетчатке. Оно является действительным, уменьшенным и перевернутым (рис. 15.9).

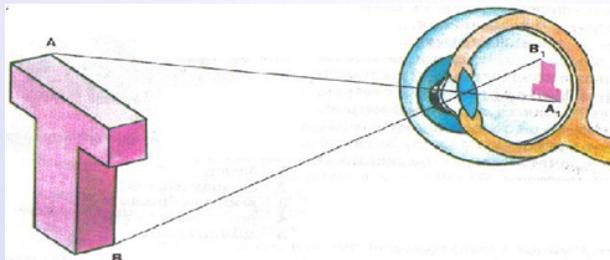


Рисунок 15.9



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 173 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Правильное впечатление о расположении предмета создается благодаря корректирующему действию мозга.

Зрачок глаза играет роль диафрагмы: его диаметр меняется в соответствии с количеством света, попадающего в глаз. Этим обеспечивается резкость получаемого на сетчатке изображения предметов, находящихся на различных расстояниях от глаза. Способность глаза приспособливать фокусное расстояние хрусталика к расстоянию до наблюдаемого предмета называется *аккомодацией* (от латинского слова *accomodatio* – приспособление)

Глаз называется нормальным, если он в ненапряженном состоянии собирает параллельные лучи в точке, лежащей на сетчатке. Наиболее распространены два недостатка глаза – близорукость и дальнозоркость. Близоруким называется такой глаз, у которого фокус при спокойном состоянии глазной мышцы лежит внутри глаза. Близорукость может быть обусловлена большим удалением сетчатки от хрусталика по сравнению с нормальным глазом. Если предмет расположен на расстоянии 25 см от близорукого глаза, то изображение предмета получится не на сетчатке, а ближе к хрусталику, впереди сетчатки. Чтобы изображение оказалось на сетчатке, нужно приблизить предмет к глазу. Поэтому у близорукого глаза расстояние наилучшего видения меньше 25 см (рис. 15.10).

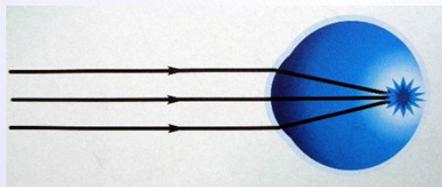


Рисунок 15.10

Дальнозорким называется глаз, у которого фокус при спокойном состоянии глазной мышцы лежит за сетчаткой. Дальнозоркость может быть обусловлена тем, что сетчатка расположена ближе к хрусталику по сравнению с нормальным глазом.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 174 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Изображение предмета получается за сетчаткой такого глаза. Если предмет удалить от глаза, то изображение попадёт на сетчатку, отсюда и название этого недостатка – дальнозоркость (рис. 15.11).

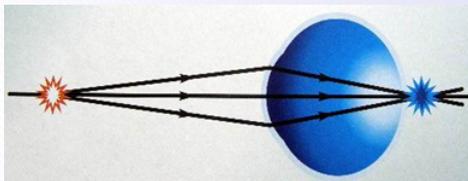


Рисунок 15.11

Разница в расположении сетчатки даже в пределах одного миллиметра уже может приводить к заметной близорукости или дальнозоркости. Люди, в пожилом возрасте видят хуже. Это объясняется тем, что мышцы, сжимающие хрусталик, ослабевают, и способность к аккомодации уменьшается. Происходит это и из-за уплотнения хрусталика, теряющего способность сжиматься. Близорукость и дальнозоркость устраняются применением линз. У близорукого глаза изображение получается внутри глаза впереди сетчатки. Чтобы оно передвинулось на сетчатку, нужно уменьшить оптическую силу преломляющей системы глаза. Для этого применяют рассеивающую линзу (рис. 15.12).

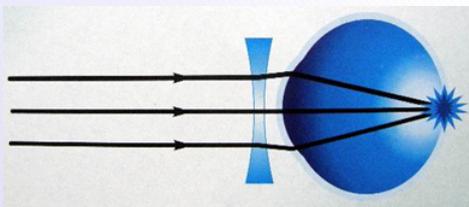


Рисунок 15.12



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 175 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Оптическую силу системы дальновзорного глаза нужно, наоборот, усилить, чтобы изображение попало на сетчатку. Для этого используют собирающую линзу (рис. 15.13).

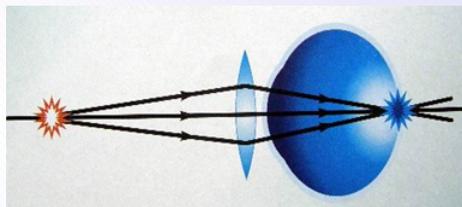


Рисунок 15.13

Итак, для исправления близорукости применяют очки с вогнутыми, рассеивающими линзами. Если, например, человек носит очки, оптическая сила которых равна $-0,5$ дптр (или -2 дптр, $-3,5$ дптр), то значит он близорукий. В очках для дальновзорких глаз используют выпуклые, собирающие линзы. Такие очки могут иметь, например, оптическую силу $+0,5$ дптр, $+3$ дптр, $+4,25$ дптр.

Светочувствительные элементы, выстилающие сетчатку, подразделяются на так называемые *палочки* и *колбочки*. Палочки более чувствительны к свету, но не реагируют на цвет. Колбочки менее чувствительны к свету, но обладают спектральной чувствительностью.

Человеческий глаз чувствителен лишь к очень узкому интервалу длин электромагнитных волн от $0,77$ до $0,38$ мкм (видимый свет), причем даже в этом интервале чувствительность глаза к различным длинам волн неодинакова. Наибольшей чувствительностью человеческий глаз обладает к длине волны $0,555$ мкм, т. е. зеленому цвету. Чувствительность глаза для более коротких и более длин волн резко снижается, достигая нуля для инфракрасного и ультрафиолетового излучения. Поэтому несколько источников монохроматического света одинаковой мощности, но испускающих свет различного цвета, представляются глазу неодинаково яркими.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 176 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Отношение мощности W_m монохроматического излучения с длиной волны $\lambda_m = 0,555$ мкм (зеленый цвет) к мощности W_λ монохроматического излучения с длиной волны λ , вызывающего ощущение такой же яркости как излучение с длиной волны λ_m называется *коэффициентом видности*

$$V_\lambda = \frac{W_m}{W_\lambda} \quad (15.10)$$

Коэффициент видности служит мерой спектральной чувствительности глаза. Для зеленого света он равен единице. График спектральной чувствительности (зависимость коэффициента видности от длины волны) человеческого глаза представлен на **рис. 15.14**.

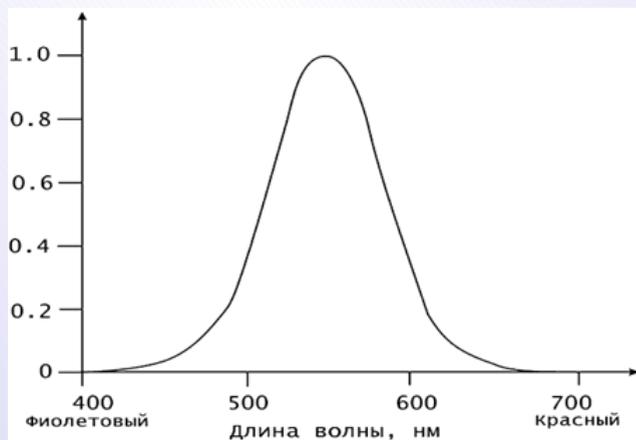


Рисунок 15.14



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 177 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Вопросы и задания для самоконтроля по разделу «Оптика»

1. Современные представления о природе света.
2. В чем заключается явление интерференции?
3. В чем заключается явление дифракции?
4. Какой свет называется поляризованным?
5. В чем заключается явление дисперсии?
6. Запишите закон Бугера.
7. Запишите закон Релея.
8. Что такое абсолютный показатель преломления?
9. В чем заключается явление полного внутреннего отражения?
10. В чем заключаются явления сферической и хроматической абберации?
11. Что такое оптическая сила линзы?
12. Что такое астигматизм?
13. Что такое аккомодация?
14. Чем отличается близорукость от дальнозоркости?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 178 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Лекция 16. Элементы специальной теории относительности и релятивистской динамики

Представления о свойствах пространства и времени в классической механике. Принцип относительности. Опыты Майкельсона–Морли. Постулаты СТО. Преобразования Лоренца. Элементы релятивистской динамики.

Литература: [2, с. 60–78].

Классическая механика Ньютона базируется на гипотезе абсолютного пространства и времени. В основе механики Ньютона лежит *принцип относительности* Галилея о неразличимости покоя и прямолинейного равномерного движения: *никакими механическими опытами внутри данной инерциальной системы отсчета нельзя установить, покоится ли она или движется с некоторой постоянной скоростью*. Иными словами: *законы механики одинаковы во всех инерциальных системах отсчета*.

Согласно Ньютону все физические величины делятся на абсолютные и относительные. К абсолютным величинам относятся пространство, масса тела и его геометрические размеры (размеры и масса тела одинаковы для всех наблюдателей, как бы быстро относительно друг друга они не двигались). Абсолютно также и время. Оно течет одинаково на поверхности Земли, в самолете, на Луне, Солнце и звездах.

К относительным величинам относятся: скорость, импульс, кинетическая энергия и др. Пусть например, первый наблюдатель перемещается прямолинейно и равномерно относительно земли в вагоне поезда со скоростью 100 км/ч. Тогда для наблюдателя, находящегося в другом поезде, движущегося прямолинейно и равномерно с такой же скоростью относительно земли, но навстречу первому поезду, скорость первого наблюдателя будет совершенно другой ($100 \text{ км/ч} + 100 \text{ км/ч} = 200 \text{ км/ч}$).

Система отсчета, относительно которой рассматривается движение данного тела, является инерциальной, если по отношению к ней скорость тела, свободного от



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 179 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

внешних воздействий, сохраняется неизменной по величине и направлению. В классической механике принимается, что свойства пространства и ход времени во всех инерциальных системах отсчета одинаковы.

Пусть инерциальная система отсчета K' движется относительно неподвижную системы отсчета K вдоль оси Ox прямолинейно и равномерно со скоростью (рис. 16.1).

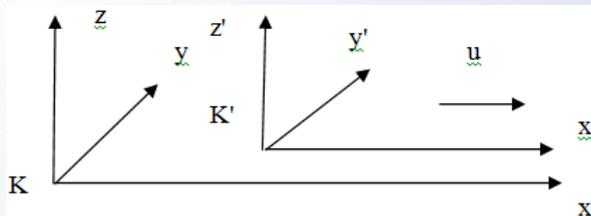


Рисунок 16.1

Согласно классической механике координаты одной и той же точки пространства и время в этих системах связаны между собой соотношениями:

$$\begin{cases} x = x' + ut \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases} \quad (16.1)$$

Соотношения (16.1) называются преобразованиями координат Галилея. Продифференцировав их по времени получим классический закон сложения скоростей:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u}, \quad (16.2)$$

где v и v' – соответственно скорости тела в системах K и K' , u – относительная скорость этих систем.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 180 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Ускорение в системах отсчета движущихся относительно друг друга прямолинейно и равномерно, одинаково:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{v}'}{dt} + \frac{d\vec{u}}{dt} = \frac{d\vec{v}'}{dt} = \vec{a}' \quad (16.3)$$

Это и служит доказательством принципа относительности Галилея.

Когда была получена система уравнений Максвелла предсказывающая, что свет распространяется в пространстве с конечной скоростью, преобразования Галилея без всякой критики были перенесены на законы распространения света. В результате была обнаружена нестыковка двух областей физики: проверенной временем и практикой механики Ньютона и сравнительно молодой науки электродинамики. В максвелловой электродинамике скорость распространения электромагнитных волн оказалась не зависящей от скоростей движения как источника этих волн, так и наблюдателя. Уравнения Максвелла оказались инвариантными относительно принципа относительности и преобразований Галилея – что противоречило ньютоновской концепции абсолютного пространства классической механики.

Теория распространения света в движущихся средах строилась по аналогии с известными закономерностями распространения звука. Для распространения волны необходима среда, которая будет передавать колебания. Например, для распространения акустической волны (то есть звука) нужен воздух. Следовательно, и электромагнитная волна распространяется в специфической среде названной эфиром (невидимой и неосязаемой субстанции заполняющей всю Вселенную). Ученые тщательно проработали теоретическую модель эфира и механику распространения света, включая всевозможные рычаги и оси, якобы способствующие распространению колебательных световых волн в эфире. Даже сам Максвелл полагал, что электромагнитные волны распространяются в среде, подобно тому, как акустические волны распространяются в воздухе, а морские – в воде.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 181 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

В наиболее простых моделях считалось, что эфир и вещество – различные вещи, и первый не оказывает материи никакого сопротивления, поэтому законы Ньютона для движущихся тел какими были, такими и остаются, а уравнения Максвелла справедливы только в системе отсчета, которая неподвижна относительно эфира. Из этих условий следовали классические взаимоисключающие параграфы – эфир должен одновременно быть и абсолютно твердым, для проведения электромагнитных волн, и абсолютно разреженным, во избежание энергетических потерь. Такое решение всех устроило бы, но из него следовал один важный вывод: солнечная система, двигаясь с гигантскими скоростями в космосе, несётся сквозь эфир, поэтому можно поставить эксперимент по обнаружению этого «эфирного ветра».

В 1887 году два американских физика – Альберт Майкельсон и Генри Морли – решили совместно провести эксперимент, призванный раз и навсегда доказать скептикам, что *светоносный эфир* реально существует, наполняет Вселенную и служит средой, в которой распространяются свет и прочие электромагнитные волны.

Майкельсон и Морли использовали *интерферометр* – оптический измерительный прибор, в котором луч света расщепляется надвое полупрозрачным зеркалом (стеклянная пластина посеребрена с одной стороны ровно настолько, чтобы частично пропускать поступающие на нее световые лучи, а частично отражать их; аналогичная технология сегодня используется в зеркальных фотоаппаратах). В итоге луч расщепляется и два получившихся *когерентных* луча расходятся под прямым углом друг к другу, после чего отражаются от двух равноудаленных от полупрозрачного зеркала зеркал-отражателей и возвращаются на полупрозрачное зеркало, результирующий пучок света от которого позволяет наблюдать интерференционную картину и выявлять малейшую *десинхронизацию* двух лучей то есть запаздывание одного луча относительно другого (рис. 16.2).



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 182 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

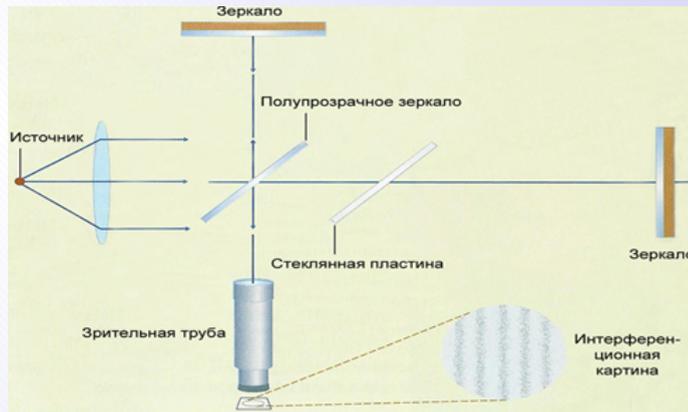


Рисунок 16.2

Опыт Майкельсона–Морли был принципиально направлен на то, чтобы подтвердить существование мирового эфира посредством выявления «эфирного ветра». Действительно, двигаясь по орбите вокруг Солнца, Земля совершает движение относительно гипотетического эфира полгода в одном направлении, а следующие полгода в другом. Следовательно, полгода «эфирный ветер» должен обдувать Землю и, как следствие, смещать показания интерферометра в одну сторону, полгода – в другую. Итак, наблюдая в течение года за своей установкой, Майкельсон и Морли не обнаружили никаких смещений в интерференционной картине: полный эфирный штиль!

В отсутствие эфирного ветра и эфира, как такового, стал очевиден неразрешимый конфликт между классической механикой Ньютона (подразумевающей некую абсолютную систему отсчета) и уравнениями Максвелла (согласно которым скорость света имеет предельное значение, не зависящее от выбора системы отсчета), что и привело в итоге к появлению теории относительности. Опыт Майкельсона–Морли окончательно показал, что «абсолютной системы отсчета» в природе не существует.

Специальная теория относительности была разработана в конце XIX – начале XX века усилиями Лоренца, Пуанкаре, Лармора и Эйнштейна. В основе специальной



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 183 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

теории относительности лежат два положения, которые называются *постулатами специальной теории относительности*:

1. *В любых инерциальных системах отсчета все физические явления при одинаковых начальных условиях протекают одинаково. Все законы физики, во всех инерциальных системах отсчета должны иметь одинаковый вид.*

Этот постулат является обобщением принципа относительности Галилея на все физические явления.

2. *Во всех инерциальных системах отсчета скорость света c в вакууме одинакова и не зависит от скорости движения, как источника, так и приемника света. Эта скорость является предельной скоростью всех процессов и движений, сопровождаемых переносом энергии.*

В специальной теории относительности преобразования Галилея, описывающие переход от одной инерциальной системы отсчета к другой, заменяются новыми соотношениями – *преобразованиями Лоренца*.

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}; y' = y; z' = z; t' = \frac{t - \frac{ux}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (16.4)$$

При малых скоростях ($u \ll c$) преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея.

Рассмотрим некоторые выводы из специальной теории относительности, вытекающие из преобразований Лоренца.

Сокращение длины. Собственная длина тела l_0 , измеренная в системе отсчета K' , в которой оно покоится, больше длины l в любой другой системе отсчета K , относительно которой K' движется со скоростью u :

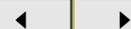
$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} \quad (16.5)$$



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 184 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Для стороннего наблюдателя длина тела кажется уменьшенной в направлении движения.

Замедление времени. Собственное время t_0 , измеренное часами, неподвижными относительно инерциальной системы отсчета K' , меньше промежутка времени t между теми же событиями, измеренного в инерциальной системе отсчета K , относительно которой K' движется со скоростью u :

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (16.6)$$

Часы, движущиеся относительно инерциальной системы отсчета, идут медленнее неподвижных часов.

Релятивистский (от лат. Relativus – относительный) закон сложения параллельных скоростей:

$$v = \frac{v' + u}{1 + \frac{v'u}{c^2}}, \quad (16.7)$$

где v и v' – соответственно скорости тела в системах K и K' , u – относительная скорость этих систем. Из формулы (16.7) следует, что суммарная скорость не равна сумме скоростей, а меньше ее на величину $1 + \frac{v'u}{c^2}$. Возьмем предельный случай. Пусть тело движется в ракете со скоростью $v' = c$, а сама ракета имеет скорость $v = c$. Что обнаружит земной наблюдатель? Согласно выражению (16.7) запишем $v = \frac{c+c}{1+\frac{c \cdot c}{c^2}} = c$. Значит, если тело движется внутри ракеты со скоростью света, с точки зрения стороннего наблюдателя, скорость света не изменится, она по-прежнему будет равна скорости света. Этот вывод выражает второй постулат специальной теории относительности. В случае, когда $u \ll c$, мы приходим к классическому закону сложения скоростей.

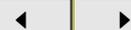
Основные уравнения механики Ньютона соответственным образом изменяются в релятивистской механике (раздел механики, изучающий законы движения тел со скоростями, близкими к скорости света).



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 185 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Одним из основных законов классической механики является закон сохранения импульса. Рассматривая взаимодействия тел и используя преобразования Лоренца, можно показать, что величина $m\vartheta$ не сохраняется, а сохраняются величины вида $\frac{m_0\vartheta}{\sqrt{1-\frac{\vartheta^2}{c^2}}}$, где m_0 – масса покоя, т. е. масса при $\vartheta = 0$. В соответствии с этим масса зависит от скорости (системы отсчета) и определяется по формуле

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}}, \quad (16.8)$$

т. е. масса не является абсолютной величиной. Из формулы (16.8) следует, что объект обладающий массой покоя не может иметь скорость равную скорости света. Если подставить в (16.8) $\vartheta \rightarrow c$ то $m \rightarrow \infty$.

Второй закон Ньютона в релятивистской механике имеет такую же форму, как и в классической механике

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}, \quad (16.9)$$

т. е. производная импульса по времени равна действующей силе. Но выражение импульса в соответствии с (16.8) имеет более сложный вид

$$p = m\vartheta = \frac{m_0\vartheta}{\sqrt{1 - \frac{\vartheta^2}{c^2}}} \quad (16.10)$$

Энергия движущегося тела растет в релятивистской механике со скоростью быстрее, чем в классической механике. Однако возрастание энергии, так же как и в классической механике, вызывается работой силы. Используя данное положение и выражение (16.8) можно получить, что наименьшая энергия системы – энергия покоя определяется выражением

$$E_0 = m_0c^2 \quad (16.11)$$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание

◀ ▶

◀◀ ▶▶

Страница 186 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Полная энергия движущегося тела равна

$$E = mc^2 \quad (16.12)$$

Уравнение (16.12) выражает один из важнейших законов природы – закон взаимосвязи массы и энергии: полная энергия системы равна произведению ее полной релятивистской массы на квадрат скорости тела в вакууме.

Кинетическая энергия тела определяется выражением

$$E_k = E - E_0 \quad (16.13)$$

Из (16.12) следует, что увеличение энергии тела на ΔE связано с увеличением его массы на Δm , причем

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} \quad (16.14)$$

Формула (16.14) выражает возможность взаимного превращения вещества в энергию и наоборот и является основой ядерной энергетики. Из нее следует, что масса является не только мерой инертных и гравитационных свойств, но и мерой энергии.

Основной вывод теории относительности: *пространство и время тесно связаны и образуют единую форму существования материи – пространство-время.*

Вопросы и задания для самоконтроля по разделу «Основы специальной теории относительности»

1. Сформулируйте постулаты специальной теории относительности.
2. В чем заключается явление сокращения длины?
3. В чем заключается явление замедления времени?
4. Запишите выражение для массы в релятивистской механике.
5. Запишите закон взаимосвязи массы и энергии.



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 187 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ОПТИКИ

Лекция 17. Квантовые свойства излучения

Тепловое излучение. Абсолютно черное тело. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела. Формула Планка. Фотон. Энергия, импульс, масса фотона. Фотоэлектрический эффект. Уравнение Эйнштейна. Фотобиологические явления. Люминесценция. Источники теплового излучения в медицине.

Литература: [1, с. 498–534], [2, с. 380–404].

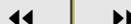
Каждое тело, за счет энергии теплового движения молекул (внутренней энергии), излучает при какой-либо температуре, кроме абсолютного нуля, энергию в виде электромагнитных волн. Это электромагнитное излучение называется *тепловым излучением*. При низких температурах такое излучение находится в инфракрасном диапазоне, то есть оно невидимо для глаза. С повышением температуры тело краснеет, а при достаточно высоких температурах приобретает белый цвет. Анализ теплового излучения свидетельствует о том, что оно состоит из набора разных длин волн инфракрасного, видимого и ультрафиолетового диапазонов. В конце XIX столетия стало очевидным, что классическая теория не способна пояснить спектральное распределение теплового излучения. Основные проблемы возникли в процессе понимания спектрального распределения излучения, образуемого *абсолютно черным телом*. *Абсолютно черным телом называется тело способное поглощать при любой температуре все падающее на него излучение*. Идеальной моделью черного тела является замкнутая полость с небольшим отверстием, внутренняя поверхность которой зачернена. Луч, попавший внутрь такой полости, полностью поглощается. Спектр излучения абсолютно черного тела, полученный экспериментально для различных температур (рис. 17.1), не совпадает с теоретической кривой спектральной зависимости излучения абсолютно черного тела, которая описывается законами классической физики (закон Релея-Джинса, рис. 17.2).



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 188 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

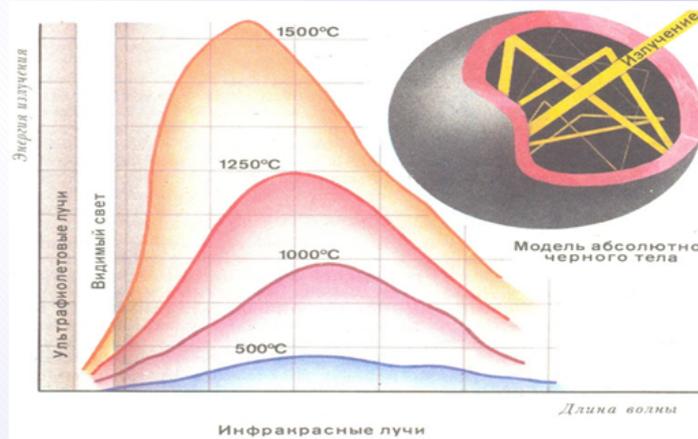


Рисунок 17.1

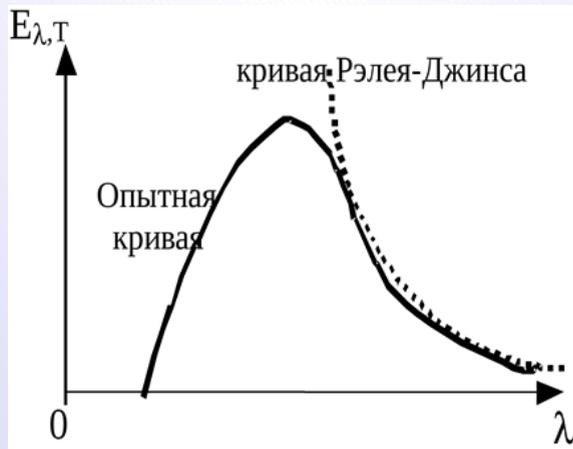


Рисунок 17.2



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 189 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Эти расходимости являются особенно существенными в коротковолновой области спектра. Такая противоречивая ситуация получила название «ультрафиолетовой катастрофы».

В 1900 г. немецкий физик Макс Планк нашел выход из тупика. Для этого ему пришлось отказаться от классических представлений об электромагнитном излучении как о непрерывной электромагнитной волне. Планк выдвинул гипотезу, что электромагнитная энергия испускается и поглощается не непрерывно, а отдельными порциями – *квантами* (от немецкого слова quantum – количество). Энергия кванта равна

$$\varepsilon = h\nu = h\frac{c}{\lambda}, \quad (17.1)$$

где c – скорость света в вакууме, $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – *постоянная Планка*, ν – частота, λ – длина волны. Используя эту гипотезу, Планк получил формулу, которая устранила все противоречия между теорией и практикой.

Кванты электромагнитного излучения различной частоты обладают различными энергиями. Квант электромагнитного излучения, относящийся к оптическому диапазону спектра, называю *фотоном*. Согласно закону пропорциональности массы и энергии $\varepsilon = mc^2$ и гипотезе Планка легко получить выражение для массы фотона

$$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2} \quad (17.2)$$

Масса покоя фотона равна нулю. Квант электромагнитного излучения существует только в движении, распространяясь со скоростью света. У него нет электрического заряда. Если фотон, каким – либо образом остановить он исчезает (поглощаются атомами).

Импульс фотона определяется выражением

$$p = m_{\phi}c = \frac{h\nu}{c} \quad (17.3)$$



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 190 из 319

Назад

На весь экран

Закреть



Наличие у фотонов импульса подтверждается существованием светового давления. Данное физическое явление основано на передаче фотонами своего импульса освещаемой поверхности. Свет как любое электромагнитное излучение обладает *корпускулярно-волновым дуализмом*: в различных явлениях он проявляет как волновые (например, дифракция света) так и корпускулярные (вышеупомянутое давление) свойства.

Квантовая теория позволила объяснить экспериментальные закономерности фотоэффекта, на основе которого работают фотоэлементы, фоторезисторы и солнечные батареи. *Внешним фотоэффектом* называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения. Схема экспериментального прибора, с помощью которого изучали фотоэлектрический эффект (фотоэффект), изображена на [рис. 17.3](#).

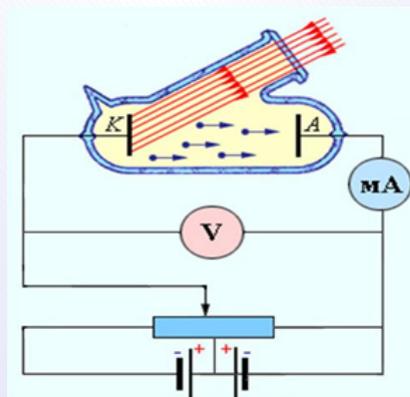


Рисунок 17.3

Стеклянный или кварцевый баллон содержит два металлических электрода, один из которых (катод) соединен с отрицательным полюсом источника тока, а другой (анод) с положительным. Когда баллон находится в темноте, ток в электрической

цепи, который фиксируется амперметром, равен нулю. При освещении катода из него вырываются электроны, которые движутся к аноду – в цепи возникает электрический ток (*фототок*).

Закон сохранения энергии для процесса взаимодействия фотона с электроном во время фотоэффекта описывается *уравнением Эйнштейна*:

$$h\nu = A + \frac{m\nu^2}{2}, \quad (17.4)$$

где A – работа выхода электрона из вещества, $\frac{m\nu^2}{2}$ – кинетическая энергия электрона. Работа выхода A зависит от природы вещества и состояния его поверхности. Минимальная энергия фотона, достаточная для получения фотоэффекта, равна:

$$h\nu_{\text{кр}} = A \quad (17.5)$$

Поскольку в видимом диапазоне минимальной частоте волны соответствует красный цвет, эта частота получила название *красной границы*.

Свет является одним из важнейших внешних факторов, влияющих на живой организм. Влияние света связано с такими основными параметрами света как *интенсивность света (освещенность)*, *спектральный состав* и *продолжительность освещения (фотопериод)*.

Под влиянием солнечного излучения совершаются *фотобиологические реакции* – физические или химические изменения в растительных системах. Все фотобиологические реакции можно поделить на четыре основных группы:

1. *Энергетические* – реакции, при которых световая энергия вследствие синтеза новых органических молекул трансформируется в химическую. Примером таких реакций может быть *фотосинтез* – процесс преобразования зелеными растениями и фотосинтезирующими микроорганизмами энергии Солнца в энергию химических связей органических веществ. Ежегодно вследствие фотосинтеза на Земле образуется около 150 млрд т органического вещества, осва-



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 192 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

ивается 300 млрд т диоксида углерода и выделяется около 200 млрд т свободного кислорода.

2. *Информационные* – реакции, при которых свет является управляющим сигналом, который вызывает посредством специализированных механизмов образование фотопродуктов и обеспечивает информацию относительно окружающей среды. К информационным можно отнести:

- а) *фотодвижение* – движение или изменение движения организмов, вызываемое светом. Свет – это важный внешний фактор, который благодаря фотодвижению используется подвижными организмами (в первую очередь – водорослями и простейшими) в поисках оптимальных условий существования;
- б) *фотоморфогенез* – вся совокупность контролируемых светом процессов, связанных с развитием и ростом растения. Фотоморфогенетическими реакциями можно считать прорастание семян, удлинение стебля, формирование листьев, развитие хлоропластов и т. д.;
- в) *фототропизм* – индуцированное светом движение части (стебля, корня, листьев) фиксированного растительного организма, которое представляет собой реакцию растения на градиент света. Различают *положительный* (движение к источнику света) и *отрицательный* (от источника) фототропизм.
- г) *фотопериодизм* – ритмические изменения разнообразных морфологических, биохимических и физиологических свойств и функций организмов под действием чередования и продолжительности световых и темновых интервалов. От фотопериода зависят такие процессы как цветение, покой почек, сбрасывание листьев, прорастание семян, формирование луковиц, клубней и т. д.

3. *Биосинтетические* – реакции, при которых в сложной цепи последовательных этапов синтеза органических молекул имеются отдельные фотохимические стадии, протекающие лишь под влиянием света. К этим реакциям относятся биосинтез хлорофилла, индукция синтеза пигментов и витаминов.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 193 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

4. *Деструктивно-модифицирующие* – реакции, связанные с повреждением светом молекул биологического субстрата, приводящее к летальным или мутагенным последствиям. К этому типу реакций относят *фотосенсибилизацию* – процесс, при котором световая энергия, поглощенная молекулами, имеющими хромофоры (сенситизаторы), передается другим молекулам, не способным самостоятельно поглощать свет. Это явление распространено в природе: известно, что некоторые дикорастущие растения содержат сильнодействующие химические соединения; животные, поедающие эти растения, становятся чувствительными к свету в непигментированных участках кожи, особенно около глаз, рта, ушей и копыт, где волосяной покров редкий. Основные симптомы – зуд, возникновение пузырьков размером с горошину (которые лопаются), конъюнктивит, стоматит, лихорадочное состояние, воспалительный процесс (даже в мозге), возбуждение и угнетение. Животное начинает тереться, вносить инфекцию и может погибнуть через 8–10 часов.

Люминесценция (от лат. *lumen (luminis)* – свет и *escentia* – суффикс, обозначающий слабое действие) – свечение газа, жидкости или твёрдого тела, обусловленное не нагревом тела, а нетепловым возбуждением его атомов и молекул. Возникает под действием света, радиоактивного и рентгеновского излучений, электрического поля, при химических реакциях и при механических воздействиях. Примеры люминесценции – свечение гниющего дерева, некоторых насекомых, планктона, минералов, экрана телевизора. Тепловое излучение в видимой области спектра заметно только при температуре около тысячи и более градусов. В то время как люминесценция может наблюдаться при любой температуре даже близкой к абсолютному нулю. Поэтому люминесценцию называют часто холодным свечением. Первоначально понятие люминесценция относилось только к видимому свету. В настоящее время оно применяется к излучению в инфракрасном, видимом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Твердые и жидкие вещества, способные люминесцировать, называют *люминофорами* (от лат. *lumen* – свет и греч. *phoros* – несущий). Чтобы вещество было способно люминесцировать, его спектры должны иметь дискретный характер,



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 194 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

то есть его энергетические уровни должны быть разделены зонами запрещенных энергий. Поэтому металлы в твёрдом и жидком состоянии, обладающие непрерывным энергетическим спектром, не дают люминесценции. Энергия возбуждения в металлах непрерывным образом переходит в тепло. *Биолюминесценция* – видимое свечение организмов, связанное с процессами их жизнедеятельности; является собой результат биохимической реакции, в которой химическая энергия возбуждает специфическую молекулу, и та излучает свет. Некоторые физические и химические особенности являются общими для всех биолюминесцентных реакций. Излучаемый свет не зависит от света или другой энергии, непосредственно поглощаемой организмом. Наблюдается у нескольких десятков видов бактерий, низших растений (грибов), у некоторых беспозвоночных животных (от простейших до насекомых включительно), у рыб. Биолюминесценция более широко распространена среди обитателей морей и океанов. Здесь светящиеся организмы иногда размножаются в таком количестве, что вызывают свечение моря. У многих организмов (бактерии, простейшие, ракообразные, грибы и др.) свечение происходит постоянно и непрерывно, если в окружающей среде есть кислород. У других биолюминесценция происходит отдельными вспышками и связана с условиями жизнедеятельности (голод, период размножения и др.). Биологическое значение биолюминесценции различно. Так, у светящихся насекомых вспышки биолюминесценции служат сигналом, позволяющим самцам и самкам находить друг друга; у ряда глубоководных рыб – для освещения и приманки добычи; у каракатицы – для защиты от хищников (путём выбрасывания светящейся жидкости) и др. Многие животные имеют сложно устроенные органы свечения. В некоторых случаях источником биолюминесценции животного являются светящиеся бактерии-симбионты.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 195 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Вопросы и задания для самоконтроля по разделу «Элементы квантовой оптики»

1. Какое электромагнитное излучение называется тепловым?
2. Что такое абсолютно черное тело?
3. Чему равна энергия кванта электромагнитного излучения?
4. Что такое фотон?
5. В чем заключается явление фотоэффекта?
6. Какие вы знаете фотобиологические реакции?
7. В чем заключается явление люминисценции?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 196 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

ОСНОВЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ

Лекция 18. Строение атома

Строение атомов. Постулаты Бора. Спектры атомов. Излучение возбужденных атомов. Рентгеновское излучение и его природа. Биологическое действие рентгеновского излучения. Рентгенодиагностика. Гипотеза де Бройля. Опыты по дифракции электронов. Волновая функция и ее статистический смысл. Принцип работы электронного микроскопа. Лазеры и их использование в биологии.

Литература: [1, с. 185–208]; [2, с. 458–489].

На основе теории Планка датский физик Нильс Бор в 1913 г. разработал квантовую теорию строения атома. К началу XX века было с полной достоверностью установлено, что в состав каждого атома входят электроны. Вместе с тем было известно, что атом в целом электрически нейтрален. Томсон (открывший электрон) предложил модель строения атома, согласно которой атом представляет непрерывно заряженный положительным зарядом шар диаметром 10^{-10} м в который «вкраплены» электроны.

Опыты Резерфорда, выполненные им в 1911 г. Привели к совсем другой модели атома. Резерфорд предложил применить зондирование атома с помощью α -частиц, которые возникают при радиоактивном распаде радия и некоторых других элементов. Масса α -частиц приблизительно в 7300 раз больше массы электрона, а положительный заряд равен удвоенному элементарному заряду. В своих опытах Резерфорд использовал α -частицы с кинетической энергией около 5 МэВ (скорость таких частиц очень велика – порядка 10^7 м/с, но все же значительно меньше скорости света). α -частицы – это полностью ионизированные атомы гелия. Они были открыты Резерфордом в 1899 году при изучении явления радиоактивности. Этими частицами Резерфорд бомбардировал атомы тяжелых элементов (золото, серебро,



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 197 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

медь и др.). Электроны, входящие в состав атомов, вследствие малой массы не могут заметно изменить траекторию α -частицы. Рассеяние, то есть изменение направления движения α -частиц, может вызвать только тяжелая положительно заряженная часть атома.

Было обнаружено, что большинство α -частиц проходит через тонкий слой металла, практически не испытывая отклонения. Однако небольшая часть частиц отклоняется на значительные углы, превышающие 30° . Очень редкие α -частицы (приблизительно одна на десять тысяч) испытывали отклонение на углы, близкие к 180° . Этот результат был совершенно неожиданным даже для Резерфорда. Его представления находились в резком противоречии с моделью атома Томсона, согласно которой положительный заряд распределен по всему объему атома. При таком распределении положительный заряд не может создать сильное электрическое поле, способное отбросить α -частицы назад.

Эти соображения привели Резерфорда к выводу, что атом почти пустой, и весь его положительный заряд сосредоточен в малом объеме. Эту часть атома Резерфорд назвал атомным ядром. Так возникла ядерная модель атома. **Рисунок 18.1** иллюстрирует рассеяние α -частицы в модели Томсона (а) и Резерфорда (б).

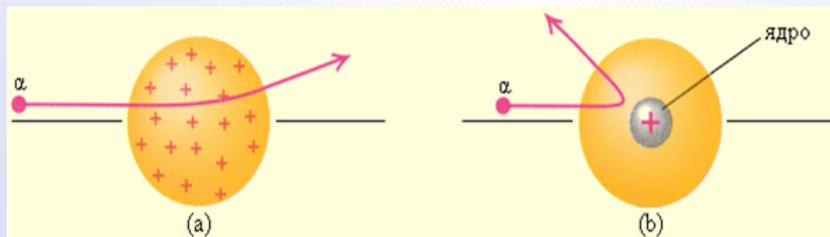


Рисунок 18.1

Опираясь на классические представления о движении микрочастиц, Резерфорд предложил планетарную модель атома. Согласно этой модели, в центре атома распо-



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 198 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

лагается положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома. Атом в целом нейтрален. Вокруг ядра, подобно планетам, под действием кулоновских сил со стороны ядра вращаются электроны.

Однако модель Резерфордовская модель атома не укладывалась в рамки законов классической физики. Согласно законам классической электродинамики, электрон, вращаясь вокруг ядра (т. е. двигаясь с ускорением), должен непрерывно излучать электромагнитные волны. Частота этих волн равна частоте вращения электрона. Так как это излучение сопровождается непрерывной потерей энергии, то электрон должен постепенно приближаться к ядру и упасть на него. Опыт же показывал, что атомы являются очень устойчивыми образованиями. Кроме того, с точки зрения классической физики, по мере приближения электрона к ядру частота вращения электрона, а, следовательно, и частота электромагнитного излучения должны изменяться непрерывно. Поэтому атом должен давать сплошной спектр излучения. Тщательные же исследования спектров излучения различных разряженных газов (т. е. спектров излучения атомов) показали, что каждому газу присущ вполне определенный линейчатый спектр. Более того, обнаружилось, что спектральные линии можно распределить по группам (сериям), линии в которых связаны между собой определенной закономерностью.

Таким образом, попытки построить модель атома в рамках классической физики не привели к успеху: модель Томсона была опровергнута опытами Резерфорда, ядерная же модель оказалась неустойчивой электродинамически и противоречила опытным данным.

Первая попытка построить качественно новую квантовую теорию атома была предпринята датским физиком Нильсом Бором (1885–1962). Он поставил перед собой цель связать в единое целое эмпирические закономерности линейчатых спектров, ядерную модель атома Резерфорда и квантовый характер излучения и поглощения света. В основу своей теории Бор положил два постулата.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний): в атоме существуют стационарные (не изменяющиеся со временем) состояния, в которых он не излучает



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 199 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

энергии. Стационарным состояниям атома соответствуют стационарные орбиты, по которым движутся электроны. Движение электронов по стационарным орбитам не сопровождается излучением электромагнитных волн.

В стационарном состоянии атома электрон, двигаясь по круговой орбите, должен иметь дискретные квантованные значения момента импульса, удовлетворяющие условию

$$m\vartheta_n r_n = n \frac{h}{2\pi}, \quad (18.1)$$

где m – масса электрона, ϑ_n – его скорость на n -ой орбите, r_n – радиус n -ой орбиты, n – целое число (1, 2, 3, и т. д.), называемое главным квантовым числом, h – постоянная Планка.

Второй постулат Бора (правило частот): при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается (поглощается) один фотон с энергией

$$h\nu = E_n - E_m, \quad (18.2)$$

равной разности энергий соответствующих стационарных состояний (E_n и E_m – соответственно энергии стационарных состояний атома до и после излучения (поглощения)). При $E_m < E_n$ происходит излучение фотона – переход атома из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией, переход электрона с более удаленной от ядра орбиты на более близлежащую. При $E_m > E_n$ – его поглощение – переход атома в состояние с большей энергией, т. е. переход электрона на более удаленную от ядра орбиту (рис. 18.2).

Набор возможных дискретных частот $\nu = (E_n - E_m) / h$ квантовых переходов и определяет линейчатый спектр атома.

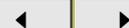
Квантовая теория Бора сыграла важную роль в развитии физики. Она количественно объяснила строение атома водорода и сложную структуру водородного спектра, наметила правильный подход к изучению внутриатомных процессов.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 200 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Правда, непосредственное использование теории Бора для расчета спектров многоэлектронных атомов оказалось невозможным. Понадобилось дальнейшее развитие этой теории, завершившееся созданием современной квантовой механики. Тем не менее, теория Бора дает возможность качественно и наглядно объяснить общие черты строения многоэлектронных атомов и их спектров, дает возможность обосновать закономерности расположения химических элементов в таблице Менделеева.

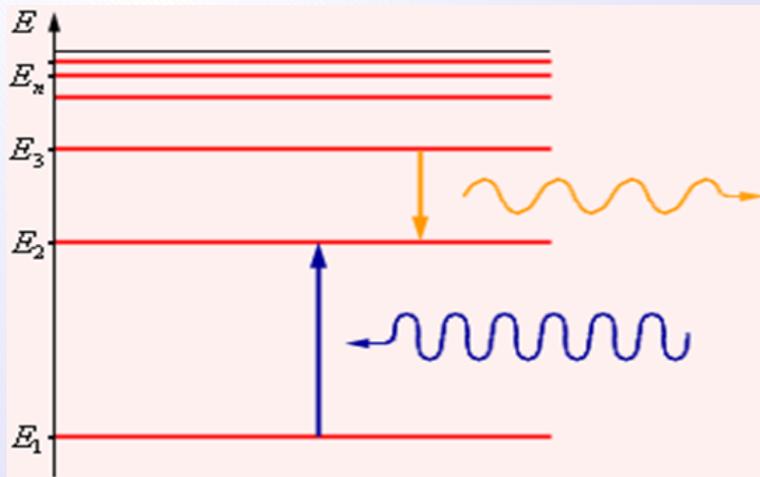


Рисунок 18.2

Рентгеновское излучение – электромагнитные волны, энергия которых лежит на энергетической шкале между ультрафиолетовым излучением и гамма-излучением, что соответствует длинам волн от 10^{-8} до 10^{-12} м. Рентгеновские лучи возникают при сильном ускорении заряженных частиц (в основном электронов) либо же при высокоэнергетичных переходах в электронных оболочках атомов или молекул. Оба эффекта используются в рентгеновских трубках, в которых электроны, испущенные раскалённым катодом, ускоряются и ударяются об анод, где они резко тормозятся



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 201 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

(при этом испускаются рентгеновские лучи: т. н. тормозное излучение) и в то же время выбивают электроны из внутренних электронных оболочек атомов металла, из которого сделан анод. Схема рентгеновской трубки представлена на [рисунке 18.3](#).

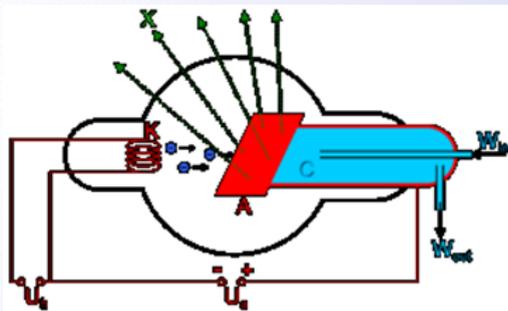


Рисунок 18.3

Открытие рентгеновского излучения приписывается Вильгельму Конраду Рентгену. Он был первым, кто опубликовал статью о рентгеновских лучах, которые он назвал икс-лучами (x-ray).

Рентгеновское излучение является ионизирующим. Оно воздействует на ткани живых организмов и может быть причиной лучевой болезни, лучевых ожогов и злокачественных опухолей. По причине этого при работе с рентгеновским излучением необходимо соблюдать меры защиты. Считается, что поражение прямо пропорционально поглощённой дозе излучения. Рентгеновское излучение является мутагенным фактором.

Рентгеновское излучение получило широкое применение в рентгенодиагностике. При помощи рентгеновских лучей можно просветить человеческое тело, в результате чего можно получить изображение костей, а в современных приборах и внутренних органов. При этом используется тот факт, что у содержащегося преимущественно в костях элемента кальция ($Z = 20$) атомный номер гораздо больше, чем атомные



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 202 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

номера элементов, из которых состоят мягкие ткани, а именно водорода ($Z = 1$), углерода ($Z = 6$), азота ($Z = 7$), кислорода ($Z = 8$). Кроме обычных приборов, которые дают двумерную проекцию исследуемого объекта, существуют компьютерные томографы, которые позволяют получать объёмное изображение внутренних органов.

В 1924 г. Французский физик Луи де Бройль высказал предположение, что *двойственной природе света должна соответствовать двойственная природа вещества, т. е. частицы вещества должны обладать не только корпускулярными, но и волновыми свойствами*. Де Бройль выдвинул идею о том, что волновой характер распространения, установленный для фотонов, имеет универсальный характер. Он должна проявляться для любых частиц, обладающих импульсом. Все частицы, имеющие конечный импульс, обладают волновыми свойствами, в частности, подвержены интерференции и дифракции. Формула де Бройля устанавливает зависимость длины волны λ , связанной с движущейся частицей вещества, от импульса p частицы:

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (18.3)$$

где $p = mv$ – импульс частицы, h – постоянная Планка. Волны, о которых идет речь, называются волнами де Бройля. Экспериментальное подтверждение новая теория получила в 1927 г. В опытах Дэвиссона и Джермера, которые изучали рассеяние электронов никелем. В результате опытов была открыта дифракция электронов. Длина волны электронов, вычисленная на основании экспериментальных данных Дэвиссона и Джермера, хорошо согласовывалась с длиной волны де Бройля.

В связи с этим встает вопрос: если электрон или любая элементарная частица ведет себя аналогично волне, то как определить их точное положение в пространстве? Решение этого вопроса было дано в 1927 году Гейзенбергом. Для расчета движения частицы необходимо знать ее координату (x) и импульс (p). Гейзенберг теоретически пришел к выводу, что одновременное точное определение этих величин для элементарной частицы невозможно. Одна из этих величин может быть измерена с любой



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 203 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

наперед заданной точностью, но лишь за счет уменьшения точности определения другой величины. Аналитически этот вывод записывается в виде неравенства, получившего название *соотношение неопределенностей Гейзенберга*:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi}, \quad (18.4)$$

где Δx – неопределенность (неточность) в измерении координаты частицы, Δp_x – неопределенность (неточность) в измерении составляющей импульса по этой же координате. Неточность в измерении данных величин связана не с несовершенством измерительной аппаратуры, а с объективными свойствами исследуемой системы. В предельном случае, когда значение импульса определено точно, неопределенность координаты достигает бесконечности и вообще становится бессмысленным говорить о каком либо ее значении.

Идеи, высказанные де Бройлем, оказались хорошей почвой для развития целой отрасли физики – квантовой механики. В квантовой механике рассматриваются закономерности движения в микромире. Она отражает качественно новую ступень познания природы. Основное уравнение квантовой механики – волновое уравнение (подобно второму закону Ньютона для классической механики), описывающее динамическое поведение квантовой системы в пространстве и во времени, было сформулировано Шредингером. Шредингер получил волновое уравнение, столь же полно описывающее волновые свойства вещества, как уравнения электродинамики описывают поведение электромагнитных волн.

Уравнение Шредингера описывает квантовые явления при скоростях $v \ll c$. Релятивистские квантовые явления описываются при помощи уравнения Дирака. В задачу квантовой механики входит отыскание решений этих уравнений для конкретных квантовых систем: атом, ядро и т. д.

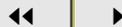
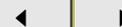
В квантовой механике информацию о движении в микромире получают из *волновой функции* Ψ , аналитическое выражение для которой находят путем решения



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 204 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

уравнения Шредингера. *Волновая функция отражает распределение частиц или систем по квантовым состояниям, которые характеризуются дискретными значениями энергии, момента импульса и др. величин.* Таким образом, волновая функция является функцией состояния частиц в микромире.

Одним из практических применений теории, которая была создана на основе взглядов де Бройля – создание электронного микроскопа и лазера.

Электронный микроскоп – прибор, позволяющий получать изображение объектов с максимальным увеличением до 10^6 раз, благодаря использованию вместо светового потока пучка электронов с энергиями 30-200 кэВ и более. Разрешающая способность электронного микроскопа в 1000-10000 раз превосходит разрешение светового микроскопа и для лучших современных приборов может составлять несколько ангстрем. Для получения изображения в электронном микроскопе используются специальные магнитные линзы, управляющие движением электронов в колонне прибора при помощи магнитного поля.

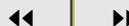
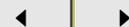
Лазер (англ. laser, сокр. от Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – «усиление света посредством вынужденного излучения»), оптический квантовый генератор – устройство, преобразующее энергию накачки (световую, электрическую, тепловую, химическую и др.) в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения. Физической основой работы лазера служит явление вынужденного (индуцированного) излучения. Суть явления состоит в том, что возбуждённый атом способен излучить фотон под действием другого фотона без его поглощения, если энергия последнего равняется разности энергий уровней атома до и после излучения. При этом излучённый фотон когерентен фотону, вызвавшему излучение (является его «точной копией»). Таким образом, происходит усиление света. Этим явление отличается от спонтанного излучения, в котором излучаемые фотоны имеют случайные направление распространения, поляризацию и фазу. Излучение лазера может быть непрерывным, с постоянной мощностью, или импульсным, достигающим экстремально больших пиковых мощностей.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 205 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

В некоторых схемах рабочий элемент лазера используется в качестве оптического усилителя для излучения от другого источника. Существует большое количество видов лазеров, использующих в качестве рабочей среды все агрегатные состояния вещества. Некоторые типы лазеров, например лазеры на растворах красителей или полихроматические твердотельные лазеры, могут генерировать целый набор частот в широком спектральном диапазоне. Габариты лазеров разнятся от микроскопических для ряда полупроводниковых лазеров до размеров футбольного поля для некоторых лазеров на неодимовом стекле. Уникальные свойства излучения лазеров позволили использовать их в различных отраслях науки и техники, а также в быту, начиная с чтения и записи компакт-дисков и заканчивая исследованиями в области управляемого термоядерного синтеза.

Вопросы и задания для самоконтроля по разделу «Основы атомной физики»

1. Что представляет собой ядерная модель атома?
2. Сформулируйте постулаты Бора.
3. Что представляет собой рентгеновское излучение?
4. Сформулируйте гипотезу Луи де Бройля.
5. Сформулируйте соотношение неопределенностей.
6. Что такое волновая функция?
7. Что такое лазер?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 206 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Лекция 19. Элементы физики атомного ядра

Строение атомного ядра. Нуклоны. Энергия связи нуклонов. Радиоактивность. Естественный радиоактивный фон. Техногенный фон. Виды радиоактивного излучения. Действие радиоактивного излучения на биологические системы. Ядерные и термоядерные реакции.

Литература: [1, с. 228–246]; [2, с. 495–519].

Ядро представляет собой центральную часть атома. В нем сосредоточены положительный электрический заряд и основная часть массы атома; по сравнению с радиусом электронных орбит размеры ядра чрезвычайно малы: $10^{-15} - 10^{-14}$ м. *Ядра всех атомов состоят из нуклонов – положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов, имеющих почти одинаковую массу.* Нуклоны, удерживаются вместе очень большими силами; по своей природе эти силы не могут быть ни электрическими, ни гравитационными, а по величине они на много порядков превышают силы, связывающие электроны с ядром. Они получили название ядерные силы.

Количество протонов в ядре называется его зарядовым числом Z – это число равно порядковому номеру элемента, к которому относится атом в таблице Менделеева. Количество протонов в ядре полностью определяет структуру электронной оболочки нейтрального атома и, таким образом, химические свойства соответствующего элемента.

Количество нейтронов в ядре N называется его изотопическим числом. Ядра с одинаковым числом протонов и разным числом нейтронов называются изотопами. Ядра с одинаковым числом нейтронов, но разным числом протонов – называются изотонами. Термины изотоп и изотон используются также применительно к атомам, содержащим указанные ядра, а также для характеристики нехимических разновид-



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 207 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

ностей одного химического элемента. Полное количество нуклонов в ядре называется его массовым числом A и приблизительно равно средней массе атома, указанной в таблице Менделеева. Очевидно, что

$$A = N + Z \quad (19.1)$$

Нуклиды с одинаковым массовым числом, но разным протон-нейтронным составом принято называть изобарами. Атом или ядро атома химического элемента обозначается A_ZX . В ядерной физике массу ядер принято измерять в атомных единицах массы (а.е.м.), за одну а.е.м. принимают $1/12$ часть массы нуклида ${}^{12}_6C$. $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$. Кроме того, в ядерной физике часто используется энергетический эквивалент массы. Согласно соотношению Эйнштейна, каждому значению массы соответствует полная энергия $E = mc^2$. Соотношение между а.е.м. и её энергетическим эквивалентом в электронвольтах: $1 \text{ а.е.м.} = 931,5 \text{ МэВ}$.

Экспериментально было обнаружено, что для всех стабильных ядер масса ядра меньше суммы масс составляющих его нуклонов, взятых по отдельности. Эта разница называется дефектом массы или избытком массы и определяется соотношением:

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{я}}, \quad (19.2)$$

где m_p – масса протона, m_n – масса нейтрона, $m_{\text{я}}$ – масса ядра.

Дефект массы показывает, что для полного расщепления ядра на составляющие его нуклоны необходимо затратить соответствующую энергию равную

$$\Delta E = \Delta mc^2 \quad (19.3)$$

Величина ΔE называется энергией связи нуклонов и является непосредственной мерой устойчивости ядра изотопа.

Радиоактивность (от лат. *radio* – «излучаю», *radius* – «луч» и *activus* – «действительный») – свойство атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) изменять свой состав



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 208 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

(заряд Z , массовое число A) путём испускания элементарных частиц и излучений. Соответствующее явление называется радиоактивным распадом.

Установлено, что радиоактивны все химические элементы с порядковым номером, большим 82 (то есть начиная с висмута), и многие более лёгкие элементы (протетий и технеций не имеют стабильных изотопов, а у некоторых элементов, таких как индий, калий или кальций, часть природных изотопов стабильны, другие же радиоактивны).

Естественная радиоактивность – самопроизвольный распад ядер элементов, встречающихся в природе.

Искусственная радиоактивность – самопроизвольный распад ядер элементов, полученных искусственным путем через соответствующие ядерные реакции.

Принципиальной разницы между естественной и искусственной радиоактивностью нет, так как свойства изотопа не зависят от способа его образования. Излучение радиоактивных ядер неоднородно по составу. Оно состоит из трех компонентов – α -, β - и γ -лучей.

Альфа-распадом называют самопроизвольный распад атомного ядра на дочернее ядро и α -частицу (ядро атома ${}^4_2\text{He}$). α -распад, как правило, происходит в тяжёлых ядрах с массовым числом $A \geq 140$ (хотя есть несколько исключений). Внутри тяжёлых ядер за счёт свойства насыщения ядерных сил образуются обособленные α -частицы, состоящие из двух протонов и двух нейтронов. Символически α -распад записывается следующим образом



Бета-распад – самопроизвольный распад атомного ядра сопровождающийся испусканием β -частицы (быстрого электрона). Символически β -распад записывается следующим образом



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 209 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Гамма-излучение или поток γ -квантов – это электромагнитное излучение очень высокой частоты. Обычно гамма-излучение сопровождает α - и β -распад ядер. В результате изменяется энергетическое состояние ядра. Испускание гамма-излучения не приводит к превращению элемента.

Излучения радиоактивных веществ оказывают очень сильное воздействие на все живые организмы. Даже сравнительно слабое излучение, которое при полном поглощении повышает температуру тела лишь на 0,001 °С, нарушает жизнедеятельность клеток. Живая клетка – это сложный механизм, не способный продолжать нормальную деятельность даже при малых повреждениях отдельных его участков. Между тем даже слабые излучения способны нанести клеткам существенные повреждения и вызвать опасные заболевания (лучевая болезнь). При большой интенсивности излучения живые организмы погибают. Механизм поражающего биологические объекты действия излучения сводится к ионизации атомов и молекул и это приводит к изменению их химической активности. Проникающие в ткани организма альфа- и бета-частицы теряют энергию вследствие электрических взаимодействий с электронами тех атомов, близ которых они проходят.

Гамма-излучение и рентгеновские лучи передают свою энергию веществу несколькими способами, которые в конечном счете также приводят к электрическим взаимодействиям. За время порядка десяти триллионных секунды после того, как проникающее излучение достигнет соответствующего атома в ткани организма, от этого атома отрывается электрон. Последний заряжен отрицательно, поэтому оставшаяся часть исходно нейтрального атома становится положительно заряженной. Этот процесс называется ионизацией. Оторвавшийся электрон может далее ионизировать другие атомы. И свободный электрон, и ионизированный атом обычно не могут долго пребывать в таком состоянии и в течение следующих десяти миллиардных долей секунды участвуют в сложной цепи реакций, в результате которых образуются новые молекулы, включая и такие чрезвычайно реакционноспособные, как «свободные радикалы». В течение следующих миллионных долей секунды образовавшиеся свободные радикалы реагируют как друг с другом, так и с другими молекулами и через



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 210 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

цепочку реакций, еще не изученных до конца, могут вызвать химическую модификацию важных в биологическом отношении молекул, необходимых для нормального функционирования клетки. Биохимические изменения могут произойти как через несколько секунд, так и через десятилетия после облучения и явиться причиной немедленной гибели клеток или таких изменений в них, которые могут привести к раку.

Ядерная реакция – это процесс взаимодействия атомного ядра с другим ядром или элементарной частицей, сопровождающийся изменением состава и структуры ядра и выделением вторичных частиц или γ -квантов. В результате ядерных реакций могут образовываться новые радиоактивные изотопы, которых нет на Земле в естественных условиях. Первая ядерная реакция была осуществлена Э. Резерфордом в 1919 году в опытах по обнаружению протонов в продуктах распада ядер. Резерфорд бомбардировал атомы азота α -частицами. Ядерные реакции могут протекать при бомбардировке атомов быстрыми заряженными частицами (протоны, нейтроны, α -частицы, ионы). Первая реакция такого рода была осуществлена с помощью протонов большой энергии, полученных на ускорителе, в 1932 году.

Однако наиболее интересными для практического использования являются реакции, протекающие при взаимодействии ядер с нейтронами. Так как нейтроны лишены заряда, они беспрепятственно могут проникать в атомные ядра и вызывать их превращения. Выдающийся итальянский физик Э. Ферми первым начал изучать реакции, вызываемые нейтронами. Он обнаружил, что ядерные превращения вызываются не только быстрыми, но и медленными нейтронами, движущимися с тепловыми скоростями.

Ядерные реакции сопровождаются энергетическими превращениями. Энергетическим выходом ядерной реакции называется величина

$$Q = ((m_a + m_b) - (m_c + m_d)) c^2 = \Delta m c^2, \quad (19.6)$$

где m_a и m_b – массы исходных продуктов, m_c и m_d – массы конечных продуктов реакции, Δm – дефект масс. Ядерные реакции могут протекать с выделением ($Q > 0$) или с поглощением энергии ($Q < 0$). Для того чтобы ядерная реакция имела



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 211 из 319

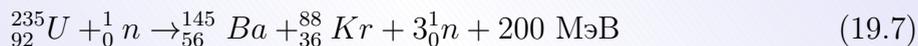
Назад

На весь экран

Закреть

положительный энергетический выход, удельная энергия связи нуклонов в ядрах исходных продуктов должна быть меньше удельной энергии связи нуклонов в ядрах конечных продуктов. Это означает, что величина Δm должна быть положительной. Возможны два принципиально различных способа освобождения ядерной энергии.

1. *Деление тяжелых ядер.* В отличие от радиоактивного распада ядер, сопровождающегося испусканием α - или β -частиц, реакции деления – это процесс, при котором нестабильное ядро делится на два крупных фрагмента сравнимых масс. В 1939 году немецкими учеными О. Ганом и Ф. Штрассманом было открыто деление ядер урана. Продолжая исследования, начатые Ферми, они установили, что при бомбардировке урана нейтронами возникают элементы средней части периодической системы – радиоактивные изотопы бария ($Z = 56$), криптона ($Z = 36$) и др. Уран встречается в природе в виде двух изотопов: ${}_{92}^{238}\text{U}$ (99,3 %) и ${}_{92}^{235}\text{U}$ (0,7 %). При бомбардировке нейтронами ядра обоих изотопов могут расщепляться на два осколка. Уран-238 делится очень плохо и только быстрыми высокоэнергетичными нейтронами. Уран-235 делится любыми нейтронами, но особенно хорошо (медленными) тепловыми нейтронами. Основным интерес для ядерной энергетики представляет реакция деления ядра ${}_{92}^{235}\text{U}$:



Кинетическая энергия, выделяющаяся при делении одного ядра урана, огромна – порядка 200 МэВ. При полном делении всех ядер, содержащихся в 1 г урана, выделяется такая же энергия, как и при сгорании 3 т угля или 2,5 т нефти. При делении ядра урана-235, которое вызвано столкновением с нейтроном, освобождается 2 или 3 нейтрона. При благоприятных условиях эти нейтроны могут попасть в другие ядра урана и вызвать их деление. На этом этапе появятся уже от 4 до 9 нейтронов, способных вызвать новые распады ядер урана и т. д. *Такой лавинообразный процесс называется цепной реакцией.* Схема развития цепной реакции деления ядер урана представлена на [рисунке 19.1](#).



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 212 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

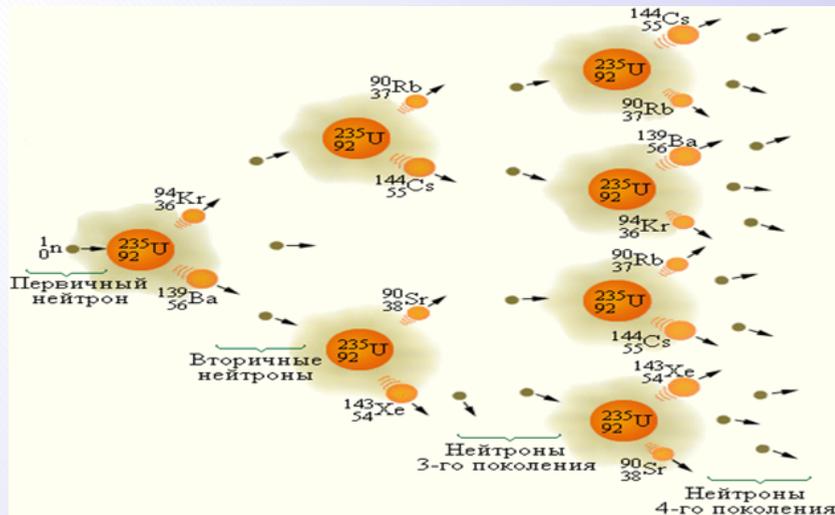


Рисунок 19.1

Цепная реакция в уране с повышенным содержанием урана-235 может развиваться только тогда, когда масса урана превосходит так называемую критическую массу. В небольших кусках урана большинство нейтронов, не попав ни в одно ядро, вылетают наружу. Для чистого урана-235 критическая масса составляет около 50 кг. Критическую массу урана можно во много раз уменьшить, если использовать так называемые замедлители нейтронов. Дело в том, что нейтроны, рождающиеся при распаде ядер урана, имеют слишком большие скорости, а вероятность захвата медленных нейтронов ядрами урана-235 в сотни раз больше, чем быстрых. Наилучшим замедлителем нейтронов является тяжелая вода D_2O . Обычная вода при взаимодействии с нейтронами сама превращается в тяжелую воду. Хорошим замедлителем является также графит, ядра которого не поглощают нейтронов. При упругом взаимодействии с ядрами дейтерия или углерода нейтроны замедляются до тепловых скоростей.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 213 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Применение замедлителей нейтронов и специальной оболочки из бериллия, которая отражает нейтроны, позволяет снизить критическую массу до 250 г. В атомных бомбах цепная неуправляемая ядерная реакция возникает при быстром соединении двух кусков урана-235, каждый из которых имеет массу несколько ниже критической. Устройство, в котором поддерживается управляемая реакция деления ядер, называется ядерным (или атомным) реактором.

2. *Термоядерные реакции.* Второй путь освобождения ядерной энергии связан с реакциями синтеза. При слиянии легких ядер и образовании нового ядра должно выделяться большое количество энергии. Вплоть до ядер с массовым числом около 60 удельная энергия связи нуклонов растет с увеличением A . Поэтому синтез любого ядра с $A < 60$ из более легких ядер должен сопровождаться выделением энергии. Общая масса продуктов реакции синтеза будет в этом случае меньше массы первоначальных частиц.

Реакции слияния легких ядер носят название термоядерных реакций, так как они могут протекать только при очень высоких температурах. Чтобы два ядра вступили в реакцию синтеза, они должны сблизиться на расстояние действия ядерных сил порядка $2 \cdot 10^{-15}$ м, преодолев электрическое отталкивание их положительных зарядов. Для этого средняя кинетическая энергия теплового движения молекул должна превосходить потенциальную энергию кулоновского взаимодействия. Расчет необходимой для этого температуры T приводит к величине порядка $10^8 - 10^9$ К. Это чрезвычайно высокая температура. При такой температуре вещество находится в полностью ионизированном состоянии, которое называется плазмой.

Энергия, которая выделяется при термоядерных реакциях, в расчете на один нуклон в несколько раз превышает удельную энергию, выделяющуюся в цепных реакциях деления ядер. Так, например, в реакции слияния ядер дейтерия и трития



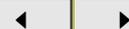
выделяется 3,5 МэВ/нуклон. В целом в этой реакции выделяется 17,6 МэВ. Это одна из наиболее перспективных термоядерных реакций. Осуществление управляемых



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 214 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

термоядерных реакций даст человечеству новый экологически чистый и практически неисчерпаемый источник энергии. Однако получение сверхвысоких температур и удержание плазмы, нагретой до миллиарда градусов, представляет собой труднейшую научно-техническую задачу на пути осуществления управляемого термоядерного синтеза. На данном этапе развития науки и техники удалось осуществить только неуправляемую реакцию синтеза в водородной бомбе.

Вопросы и задания для самоконтроля по разделу «Основы ядерной физики»

1. Из каких частиц состоит атомное ядро?
2. Что такое зарядовое и массовое числа?
3. Чему равна одна атомная единица массы?
4. Что такое дефект масс?
5. В чем заключается явление радиоактивности?
6. Какие виды радиоактивного распада Вы знаете?
7. Что такое ядерная реакция?
8. Какой процесс называют цепной реакцией?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 215 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Выполнение лабораторной работы включает самостоятельную теоретическую подготовку по теме лабораторной, изучение устройства и принципов работы лабораторной установки, метода и порядка выполнения измерений, проведение экспериментов и обработку их результатов, оформление отчета по выполненной работе и ее защиту входе собеседования с преподавателем. Отчеты студента по лабораторным работам оформляются в отдельной общей тетради. Они должны быть четкими, аккуратными и включать следующие разделы:

1. Название и цель работы.
2. Описание установки и метода измерений (общий вид или схема установки с обозначениями, расчетные формулы с пояснениями входящих в них физических величин).
3. Результаты измерений и их обработка (таблицы с заданными, измеренными и рассчитанными величинами и их погрешностями, а также порядок расчетов физических величин и их погрешностей с короткими пояснениями, графики полученных зависимостей).
4. Выводы по лабораторной работе.

Процесс выполнения лабораторной работы делится на три этапа.

Первый этап. Самоподготовка. Студент, используя методическое пособие, материалы конспекта лекций и рекомендованной литературы, изучает необходимый теоретический материал по работе, знакомится со схемой, устройством и принципом работы установки, а также последовательностью практического выполнения лабораторной. В начале занятий студент предъявляет преподавателю конспект двух первых разделов отчета, что является необходимым условием для его допуска к практическим измерениям. Студент не допускается ко второму этапу до тех пор, пока не будет выполнена работа на первом этапе.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 216 из 319

Назад

На весь экран

Закреть



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 217 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Второй этап. Выполнение измерений. Студенты, получившие допуск, приступают к выполнению лабораторной работы. Они работают звеньями, проводят измерения, а их результаты заносят в таблицу. Выполняется контрольный расчет, который должен подтвердить правильность измерений. Полученные результаты представляются преподавателю. Отчет у каждого студента должен быть индивидуальным.

Третий этап. Обработка результатов измерений, оформление отчета и сдача работы. Студент заканчивает работу над третьим и четвертым разделами отчета. Проводится расчет искомых физических величин, погрешностей измерений и т. д. Все этапы этих расчетов необходимо кратко отразить в отчете. Выводы отчета должны опираться на анализ выявленных в работе закономерностей, связей между различными физическими величинами, сравнение полученных результатов с теоретическими и табличными. Защита лабораторной работы проводится на следующем занятии и включает в себя: 1) собеседование по теоретической и экспериментальной частям работы; 2) обсуждение результатов выполнения работы; 3) ответы студентов на контрольные вопросы.

В лабораториях необходимо неукоснительно соблюдать правила техники безопасности!

Категорически запрещается:

- нарушать требования инструкции по технике безопасности;
- приносить и употреблять в лаборатории напитки и еду, разговаривать по мобильному телефону, производить зарядку батареи мобильных телефонов, работать в наушниках, находиться в лаборатории в верхней одежде, загромождать столы и проходы вещами и одеждой;
- заниматься посторонними делами, мешать выполнению работы другими студентами;
- пользоваться чужими отчетами либо их частями (таблицами с экспериментальными и расчетными данными, графиками).

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Классификация измерений и их погрешностей

Измерением называют процесс получения значения физической величины опытным путем. По существу, измерение представляет собой последовательность экспериментальных и вычислительных операций, проводимых с целью нахождения значения физической величины. По способу получения значения измеряемой величины различают прямые и косвенные измерения. Прямыми называют измерения, в результате которых значение измеряемой величины определяется непосредственно из опыта, с помощью прибора, шкала которого проградуирована в единицах измеряемой величины (измерение длины – линейкой, температуры – термометром и т. д.). Косвенные – это такие измерения, в которых физическая величина вычисляется по формуле, содержащей физические величины, определяемые путем прямых измерений (например, нахождение скорости v движения по пройденному расстоянию l и времени t движения, сопротивления резистора R по измерению силы тока I и напряжения U и т. д.). Физическую величину нельзя измерить абсолютно точно. Всегда имеется некоторая погрешность (ошибка) измерения, обусловленная ограниченной точностью измерительных приборов, а также несовершенством используемой методики измерения. Поэтому в задачу измерений входит не только нахождение значения физической величины, но и оценка допущенной при измерении погрешности.

Абсолютной погрешностью измерения называют разность между результатом измерения физической величины и ее истинным значением $x_{\text{ист}}$:

$$\Delta x = x - x_{\text{ист}}$$

Причем истинное значение, а следовательно, и абсолютная погрешность принципиально неизвестны и подлежат оценке по результатам измерений. Точность измерений величины характеризуют *относительной погрешностью*

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_{\text{ист}}},$$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 218 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

которая показывает, какую часть абсолютная погрешность составляет от истинного значения. По характеру проявления погрешности физических измерений принято подразделять на систематические, случайные и промахи. *Систематические погрешности* – это такие погрешности, у которых значения и знак остаются постоянными на протяжении одной серии измерений. Они вызываются постоянно действующими причинами, односторонне влияющими на результат измерений, и зависят от точности приборов и качества используемых методик измерений. Примеры причин возникновения систематической погрешности: неточная установка прибора на ноль перед измерением, секундомер отстает или спешит, не учитываются силы трения и сопротивления в методе измерения, сопротивления соединительных проводов и контактов и т. д. Систематические погрешности можно выявить, проводя измерения различными методами и приборами с последующим анализом результатов измерений. *Случайные погрешности* – это погрешности, которые изменяются от опыта к опыту непредсказуемым (случайным) образом. Причем с равной вероятностью они могут быть как положительными, так и отрицательными. Случайная погрешность возникает как результат совместного влияния различных случайных, меняющихся от измерения к измерению, и неконтролируемых экспериментатором факторов, оказывающих действие на процесс измерения. Одна из причин случайной погрешности – непостоянство физических условий, в которых производятся измерения. Например, небольшие колебания температуры воздуха и его давления, электрического напряжения в сети, механические колебания и т. п. Случайную погрешность значения измеряемой величины можно уменьшить многократным повторением измерения.

Промахи (грубые ошибки) – это большие по значению погрешности, сильно искажающие результат. Как правило, промахи вызываются невнимательностью экспериментатора (неправильный отсчет по шкале прибора или небрежная запись в таблице). Они могут возникать также вследствие неисправности приборов. Результаты измерений, содержащие промахи, отбрасываются, как не внушающие доверия.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 219 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

2. Обработка результатов прямых измерений

В случае прямых многократных измерений физической величины x получают набор из n ее значений: x_1, x_2, \dots, x_n . Наилучшей оценкой истинного значения измеряемой величины по выполненной серии измерений является среднее арифметическое $x_{\text{ср}}$ этих значений:

$$x_{\text{ист}} \approx x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n)$$

Погрешность среднего арифметического значения обусловлена случайными и систематическими составляющими.

2.1. Случайная погрешность

Случайная погрешность $\Delta x_{\text{сл}}$ среднего арифметического значения $x_{\text{ср}}$ вычисляется по формуле

$$\Delta x_{\text{сл}} = t_{p,n} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} ((x_1 - x_{\text{ср}})^2 + (x_2 - x_{\text{ср}})^2 + \dots + (x_n - x_{\text{ср}})^2)},$$

где $t_{p,n}$ – коэффициент Стьюдента, зависящий от числа измерений n и заданной доверительной вероятности p . Значения коэффициента Стьюдента при различных p и n приведены в таблице. Величина доверительной вероятности p выбирается экспериментатором самостоятельно и может принимать любые значения от нуля до единицы.

$n \backslash p$	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7
3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9
4	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8
5	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 220 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Чем больше p , тем более сильное утверждение делается о измеряемом значении x , к чему и надо стремиться. Обычно при выполнении учебных лабораторных работ выбирают $p = 0,95$.

2.2. Систематическая погрешность

Систематическая погрешность метода измерений может быть учтена в результате тщательного анализа модельных представлений, положенных в основу процесса измерений. Совершенствование метода измерений и введение уточнений в расчетную формулу позволяет уменьшить систематическую погрешность. Систематическая погрешность приборов и измерительных инструментов (приборная или инструментальная погрешность) вызвана неточностью градуировки шкалы, качества изготовления, сборки и подгонки отдельных деталей приборов и других причин технологического характера. При определении приборных погрешностей $\Delta x_{\text{пр}}$ необходимо учитывать следующее: а) для высокоточных (прецизионных) приборов в техническом паспорте на прибор приводятся погрешности для всех диапазонов измеряемой величины; б) для механических измерительных приборов (линейка, штангенциркуль, микрометр, секундомер и т. д.), не имеющих паспорта, можно считать, что абсолютная приборная погрешность $\Delta x_{\text{пр}} = \frac{\mu}{2}$, где μ – цена наименьшего деления шкалы прибора; в) для стрелочных электроизмерительных приборов абсолютная приборная погрешность определяется по их классу точности $E_{\text{пр}}$, который указан на шкале прибора (обычно в правом нижнем углу, цифры могут быть помещены в кружок или ромбик).

$$\Delta x_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{пр}} x_{\text{max}}}{100 \%},$$

где x_{max} – наибольшее значение шкалы прибора.

2.3. Полная погрешность прямого измерения

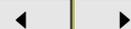
В предположении о независимости возникновения случайных и систематических



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 221 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

погрешностей полная (суммарная) погрешность прямого измерения определяется по формуле:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{сл}} + \Delta x_{\text{пр}}}$$

3. Обработка результатов косвенных измерений

Пусть измеряемая физическая величина y не измеряется непосредственно прибором, а выражается по некоторой формуле через другие величины x_1, x_2, \dots, x_n , значения которых получают в результате прямых измерений, т. е.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

а

$$y_{\text{ср}} = f(x_{1\text{ср}}, x_{2\text{ср}}, \dots, x_{n\text{ср}})$$

Абсолютная погрешность вычисляется по формуле:

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2},$$

где Δx_k – погрешности прямого измерения, $\frac{\partial y}{\partial x_k}$ – соответствующие частные производные, вычисленные при $x_k = x_{k\text{ср}}$. $\varepsilon = \frac{\Delta y}{y_{\text{ср}}}$ – относительная погрешность.

4. Представление результатов измерений

4.1. Численное представление

Результат прямого или косвенного измерения величины x представляет собой приближенное число, точность которого определяется погрешностью измерений. Поэтому результаты измерения принято приводить интервалом, в котором с установленной вероятностью может находиться измеряемая величина:

$$x = x_{\text{ср}} \pm \Delta x$$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 222 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

После того, как погрешность вычислена, значение результата должно быть округлено таким образом, чтобы его последняя значащая цифра была того же разряда, что и у погрешности. Примеры правильно записанных результатов измерений: $t = (1,67 \pm 0,14) \cdot 10^3$ с, $v = 12,48 \pm 0,04$ м/с.

4.2. Графическое представление физических зависимостей

Графики являются наиболее информативным и наглядным способом представления экспериментальных зависимостей. Они позволяют нагляднее проводить сравнение экспериментальных данных с теоретическими зависимостями. Основное требование к построению графиков – их аккуратное и четкое исполнение. Графики должны легко читаться, а для этого необходимо соблюдать правила:

1. Графики желательно строить на миллиметровой бумаге, на которую наносятся координатные оси. На концах осей указываются обозначения откладываемых физических величин и их единицы измерения. В случае очень больших или очень малых величин на осях указываются множители, определяющие порядок чисел.
2. На каждой из осей приводят только тот интервал изменения физической величины, в котором проводилось измерение. Поэтому точка пересечения осей не обязательно должна соответствовать нулю по каждой из осей. Начало отсчета по осям и масштабы следует выбирать так, чтобы кривые занимали практически все поле чертежа. За единицу масштаба разумно выбирать числа кратные 5, 10, 50, 100.
3. Экспериментальные точки наносят на чертеж в виде кружочков небольшого радиуса, квадратиков, крестиков и т. д.
4. Как правило, физические зависимости – это гладкие, плавные линии без резких изломов. Экспериментальные точки вследствие ошибок измерений не ложатся на кривую физической зависимости, а группируются вокруг нее случайным образом. Поэтому не следует соединять соседние экспериментальные точки на



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 223 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

графике отрезками прямой и получать таким образом некоторую ломаную линию. Сначала на основе теоретических сведений нужно выяснить, какая имеется зависимость между величинами (линейная, степенная, экспоненциальная и т. д.), а затем провести линию, соответствующую физическим зависимостям, так, чтобы она располагалась как можно ближе к экспериментальным точкам.

5. График должен быть наглядным и приемлемым с эстетической точки зрения (разные цвета для экспериментальных точек, кривых и т. д.). Если имеется несколько кривых, то каждой кривой присваивается номер, а на свободном поле чертежа указывают название, обозначение или параметр кривой, соответствующий этому номеру. Каждый график снабжается подписью, в которой отражается его основное содержание.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 224 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лабораторная работа № 1

Изучение закономерностей равномерного и равноускоренного движения

Цель: Изучение экспериментальных способов проверки законов равномерного и равноускоренного движения.

Принадлежности: прибор для изучения законов механики с принадлежностями, секундомер, оптоэлектрические датчики.

Описание установки и краткая теория

Равномерное движение это движение, при котором тело за любые равные сколь угодно малые промежутки времени Δt совершает одинаковые перемещения $\Delta \vec{r}$. Скорость \vec{v} тела при равномерном движении одинакова во всех точках траектории: $\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$. Модуль скорости $v = \frac{\Delta r}{\Delta t}$. При равномерном движении тела в одном направлении модуль перемещения и путь равны. Следовательно, модули скорости перемещения $v = \frac{\Delta r}{\Delta t}$ и скорости пути $v = \frac{s}{\Delta t}$ равны. *Равноускоренным прямолинейным движением* называют движение тела (материальной точки) по прямой с ускорением, модуль которого постоянен, т. е. такое прямолинейное движение, при котором за любые сколь угодно малые равные промежутки времени скорость движения материальной точки изменяется одинаково.

Ускорением \vec{a} называют физическую векторную величину, характеризующую быстроту изменения скорости тела (материальной точки) и численно равную отношению изменения скорости $\Delta \vec{v}$ к промежутку времени Δt , за который это изменение произошло. Направление вектора ускорения совпадает с направлением вектора изменения скорости. Единица ускорения в СИ – м/с². В случае равноускоренного прямолинейного движения скорость тела равномерно изменяется на протяжении любых равных промежутков времени. Поэтому ускорение $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ одинаково в любой момент времени.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 225 из 319

Назад

На весь экран

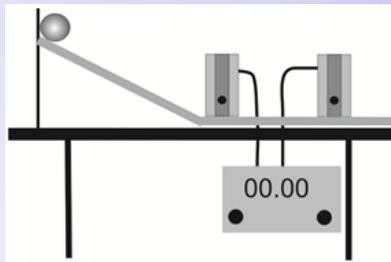
Закреть

При прямолинейном равноускоренном движении с ускорением \vec{a} , направление которого совпадает с направлением начальной скорости \vec{v}_0 , значения пути и модуля перемещения тела за один и тот же промежуток времени совпадают ($s = \Delta r$).

При выборе координатной оси, направленной вдоль желоба (по траектории движения шарика), путь $s = v_0 t + \frac{at^2}{2}$, а модуль скорости шарика $v = v_0 + at$.

Исключив из этих уравнений время, получим: $2as = v^2 - v_0^2$.

Установка для выполнения опытов схематически изображена на [рисунке](#).



Измерения и вычисления:

1. Перед началом опыта, установите правую половину основания прибора горизонтально. Приподнимите конец левой половины основания, на котором смонтировано пусковое устройство, на высоту 3–5 см.
2. Установите оптоэлектрические датчики на расстоянии 20 см друг от друга на горизонтальной части желоба.
3. Подключите датчики к гнездам **1** и **2** на задней панели цифрового секундомера. Включите секундомер и переключите прибор в режим (Г □). Убедитесь, что к гнезду **1** подключен датчик ближайший к пусковому устройству.
4. Установите шарик в пусковое устройство.
5. Освободите шарик и измерьте промежуток времени, в течение которого шарик двигался между оптическими датчиками.
6. Переместите пару оптодатчиков таким образом, чтобы они, не изменяя взаимного положения, располагались в других местах горизонтальной части желоба и повторите измерения.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 226 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

7. Измерьте промежутки времени, размещая датчики на расстояниях 15 см, 10 см и 5 см, друг от друга, в различных местах горизонтальной части желоба.
8. Вычислите модули скорости шарика во всех случаях. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

№ п/п	x_1	x_2	Δr	Δt	v

9. Используя результаты измерений и вычислений, постройте график зависимости модуля скорости шарика от времени
10. Установите первый оптический датчик на наклонной части желоба в пяти сантиметрах от нулевой отметки шкалы, а второй – на расстоянии $l = 10$ см от первого. На протяжении всего опыта положения обоих датчиков должны оставаться неизменными.
11. Подсоедините к гнезду **1** секундомера только первый оптический датчик, включите секундомер и установите прибор в режим (ONE).
12. Освободите шарик, установленный в пусковом устройстве, и измерьте промежуток времени Δt_1 , в течение которого он двигался в створе первого оптического датчика. По результатам измерений вычислите мгновенную скорость \vec{v}_1 шарика при прохождении створа первого датчика ($v_1 = \frac{D}{\Delta t_1}$, где $D = 22$ мм – диаметр шарика).
13. Отключив первый оптический датчик от секундомера, подсоедините к гнезду **1** прибора второй оптический датчик.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 227 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

14. Освободите шарик, установленный в пусковом устройстве, и измерьте промежуток времени Δt_2 , в течение которого шарик двигался в створе второго оптического датчика. По результатам измерений вычислите мгновенную скорость \vec{v}_2 шарика при прохождении створа второго датчика ($v_2 = \frac{D}{\Delta t_2}$).
15. Подключите оптические датчики к гнездам **1** и **2** секундомера. Установите прибор в режим (DOUBLE). Убедитесь, что датчик, который находится ближе к пусковому устройству, подсоединен к гнезду **1**.
16. Освободите шарик, установленный в пусковом устройстве, и измерьте промежуток времени Δt , в течение которого шарик прошел путь Δs , равный расстоянию между датчиками.
17. Используя рассчитанные значения \vec{v}_1 и \vec{v}_2 , результаты измерений промежутков времени и соответствующих им перемещений шарика вычислите модуль ускорения шарика по формулам $a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$ и $a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2\Delta s}$. Сравните результаты вычислений.
18. Установите датчики в другие точки желоба, повторите измерения и вычисления.
19. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу. Измерьте модули скорости шарика в различных точках наклонного участка желоба, используя только один датчик. Рассчитайте модули скорости шарика в этих точках.
20. Используя результаты измерений и вычислений, постройте график зависимости модуля скорости шарика от времени. Убедитесь, что графиком зависимости $v = f(t)$ является прямая линия.
21. Определите модуль ускорения шарика, вычислив тангенс угла наклона графика скорости к оси времени, и сравните полученное значение с результатами вычислений.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 228 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Контрольные вопросы

1. В чем разница между путем и перемещением?
2. Дайте определение средней и мгновенной скорости.
3. Что такое ускорение?
4. Какую скорость показывает спидометр автомобиля?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 229 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лабораторная работа № 2

Определение ускорения свободного падения

Цель: Экспериментально определить ускорение свободного падения.

Принадлежности: прибор для изучения законов механики с принадлежностями, секундомер, оптоэлектрические датчики.

Описание установки и краткая теория

*Сила тяготения (гравитационная сила (от латинского слова *gravitas* – тяжесть))* – сила с которыми притягиваются друг к другу все материальные тела во Вселенной. Данное взаимодействие тел осуществляется посредством гравитационного поля (поля тяготения). Гравитационная сила описывается *законом всемирного тяготения*, открытым Ньютоном в 1667 году. Согласно этому закону любые две материальные точки притягиваются друг к другу с силой $F_{гр}$, пропорциональной произведению их масс (m_1 и m_2) и обратно пропорциональной квадрату расстояния r между ними:

$$F_{гр} = \gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

Коэффициент пропорциональности γ называется гравитационной постоянной. На данный момент времени опытным путем установлено, что численное значение $\gamma \approx 6,67428 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$.

Вблизи поверхности планеты все тела падают с одинаковым ускорением, которое называют *ускорением свободного падения* и обозначают \vec{g} . Среднее значение ускорения свободного падения определяется выражением:

$$g = \gamma \frac{M_{п}}{R_{п}^2},$$

где $M_{п}$ – масса планеты, $R_{п}$ – радиус планеты. Для Земли $g \approx 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 230 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

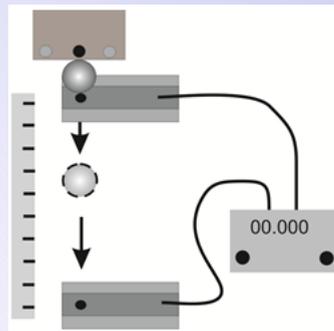
Таким образом, в системе отсчета связанной с Землей, на всякое тело действует сила:

$$\vec{F} = m\vec{g}.$$

Эта сила называется *силой тяжести*.

1. Установка для выполнения опыта схематически изображена на **рисунке**.

2. Для экспериментального исследования закономерностей свободного падения на металлической классной доске магнитную плату держателя, линейку и два оптоэлектрических датчика (см. **рис.**).



Измерения и вычисления:

1. Установите первый оптический датчик на нулевой отметке шкалы, а второй – на одной вертикали на $l = 40$ см ниже первого. На протяжении всего опыта положения обоих датчиков должны оставаться неизменными.
2. Подключите оптические датчики к гнездам **1** и **2** секундомера. Установите прибор в режим (DOUBLE). Убедитесь, что верхний датчик, подсоединен к гнезду **1**, а падающий шарик свободно проходит через створки обоих оптических датчиков.
3. Освободите шарик, и измерьте промежуток времени Δt , в течение которого шарик прошел путь Δs , равный расстоянию между датчиками.
4. Установите нижний датчик на другом расстоянии от верхнего, повторите измерения и вычисления.
5. Используя результаты измерений промежутков времени и соответствующих им перемещений шарика вычислите модуль ускорения шарика по формуле $g = \frac{2l}{\Delta t^2}$. Сравните результаты вычислений с табличным значением ускорения свободного падения.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 231 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

6. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу:

№ п/п	Δt	l	g	$\langle g \rangle$

Контрольные вопросы

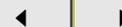
1. Сформулируйте закон всемирного тяготения.
2. Что такое ускорение свободного падения?
3. Дайте определение силы тяжести? В чем ее отличие от силы тяготения?
4. Дайте определение веса тела? Чем вес тела отличается от массы?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 232 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лабораторная работа № 3

Определение скорости звука в воздухе

Цель: Определение скорости звука в воздухе

Принадлежности: стеклянная труба, телефон, микрофон, звуковой генератор, осциллограф.

Описание установки и краткая теория

Если источник колебаний поместить в среду частицы, которой жестко связаны между собой, то процесс колебаний начнет передаваться от одной точки среды к другой. Такой процесс называется механической волной. Направление распространения волны называется лучом. Если частицы среды колеблются перпендикулярно лучу, то такая волна называется поперечной, если вдоль луча то продольной.

Волны, распространяющиеся в любой упругой среде и имеющие частоту в пределах от 20 до 20 000 Гц, называют *звуковыми волнами*, которые воспринимает человеческое ухо. Упругие волны с частотами, большими 20 000 Гц, называются ультразвуками, а волны с частотами, меньшими 20 Гц, называются инфразвуками.

Сила (или интенсивность) I звука оценивается той энергией E , которую звуковая волна переносит за время t через поверхность S волны, перпендикулярную направлению распространения звука:

$$I = \frac{E}{St}.$$

Из этой формулы определяется единица силы звука в СИ: Вт/м².

Установка состоит из стеклянной трубки, на одном конце которой помещен источник звука – телефон **Т**, другой конец закрыт плотной пластинкой **П** с отверстием, против которого помещается микрофон **М**. Колебания мембраны телефона возбуждаются переменным током звуковой частоты от звукового генератора **ЗГ**, а



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



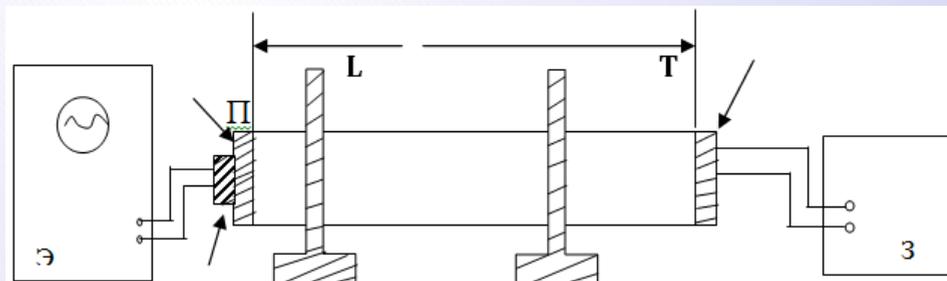
Страница 233 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

возникший в микрофоне электрический сигнал подаётся на вертикально отклоняющие пластины осциллографа ЭО. Звуковая волна, возбуждаемая мембраной телефона Т, отражается от пластинки П. Отражённая волна интерферирует с падающей, идущей от телефона, в результате в трубе образуется стоячая волна.



Интенсивность её зависит от расстояния L между пластинкой П и телефоном Т и от частоты ν звуковых колебаний. Если расстояние равно целому числу звуковых полуволин $L = n\lambda/2$, то в трубе устанавливается интенсивная стоячая волна (звуковой резонанс). Скорость звука рассчитывается по формуле

$$v = \lambda\nu,$$

где λ – длина волны, ν – её частота.

Скорость звука можно определить, наблюдая возникновение звукового резонанса.

При неизменной частоте ν звукового генератора можно изменять расстояние L . Возникновение резонанса легко наблюдать на осциллографе по резкому увеличению амплитуды колебаний. Для последовательных резонансов имеем:

$$L_n = n\frac{\lambda}{2}, L_{n+1} = (n+1)\frac{\lambda}{2} \text{ и } L_{n+1} - L_n = \frac{\lambda}{2},$$

т. е. $\frac{\lambda}{2}$ равно расстоянию между двумя последовательными положениями телефона.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 234 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Измерения и вычисления:

1. Включить питание осциллографа и генератора.
2. Задав частоту генератора **1000 ÷ 1500 Гц**, возбудить в трубе стоячую волну.
3. Передвигая телефон вдоль оси трубы, зафиксировать установление звукового резонанса для трёх положений **L_1, L_2, L_3** .
4. Измерения произвести с интервалом **100 Гц**.
5. Результаты скорости звука ν занести в таблицу:

№ п/п	ν (Гц)	L_1, L_2, L_3 (м)	λ (м)	ν (м/с)
1				
2				
3				
4				
5				

Контрольные вопросы

1. Что такое механическая волна?
2. Что такое звук?
3. Как ультразвук воздействует на биологические организмы?
4. Почему мы не воспринимаем как звук колебания воздуха, создаваемые крыльями птицы?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 235 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

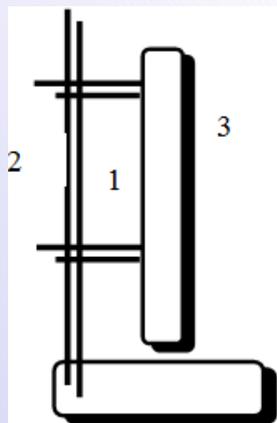
Лабораторная работа № 4

Определение вязкости жидкости методом Стокса

Цель: Определение коэффициента вязкости жидкости.

Принадлежности: длинный стеклянный цилиндр с маслом, штатив, металлическая дробь, микрометр, секундомер.

Описание установки и краткая теория



Внешний вид установки приведен на **рис.** Стеклянный цилиндр **1** с маслом укреплен вертикально с помощью штатива **2**. На цилиндре имеется шкала **3**, начало которой ниже уровня масла в сосуде.

Металлическая дробинка, опущенная в сосуд, тонет под действием силы:

$$F = mg - F_A = \frac{4}{3}\pi r^3 g (\rho - \rho_0), \quad (23.1)$$

где m – масса дробинки, g – ускорение силы тяжести, F_A – архимедова сила, r – радиус дробинки, ρ_0 – плотность масла, ρ – плотность материала дробинки.

Под действием силы F дробинка движется ускоренно до тех пор, пока сила сопротивления, определяемая формулой Стокса

$$F_C = 6\pi\eta r v \quad (23.2)$$

не уравновесит силу F . Дальнейшее движение дробинки равномерное. Из (23.1) и (23.2) коэффициент вязкости

$$\eta = \frac{2(\rho - \rho_0)}{9v} gr^2 = \frac{2}{9} r^2 g \frac{\rho - \rho_0}{v} \quad (23.3)$$



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 236 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Значения ρ и ρ_0 берутся из таблиц, скорость ϑ определяется экспериментально для равномерного движения, r измеряется микрометром.

Измерения и вычисления:

1. Измерить микрометром радиус дробинки.
2. Опустив дробинку в сосуд, измерить время t , в течение которого она опускается равномерно на расстояние L . Вычислить скорость $\vartheta = \frac{L}{t}$.
3. По формуле (23.3) вычислить η .
4. Измерения и вычисления повторить не менее трёх раз для различных дробинки и взять среднее значение.
5. Результаты представить в виде таблицы.
6. Сравнить результаты с табличными и сделать вывод.

$$\rho = 11,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \rho_0 = 0,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

Контрольные вопросы

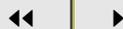
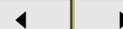
1. Записать выражение для силы внутреннего трения, возникающей между слоями жидкости (формула Ньютона).
2. В каких единицах измеряется динамический коэффициент вязкости?
3. Что такое плотность?
4. Для чего рыбы при быстром движении прижимают к себе плавники?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 237 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

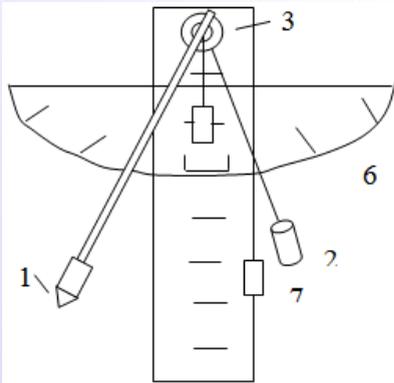
Лабораторная работа № 5

Изучение явления резонанса при вынужденных колебаниях

Цель: Построение амплитудной резонансной кривой.

Принадлежности: установка для изучения явления резонанса.

Описание установки



Внешний вид установки приведен на рис. Тяжёлый маятник **1** с постоянным периодом колебаний T_0 используется в качестве задающего вибратора. Лёгкий маятник **2** служит резонатором и раскачивается под действием толчков маятника-вибратора. Маятник **1** представляет собой металлическую трубку с тяжёлым грузом на конце. В верхней его части укреплен якорь – кольцо **3**, с помощью которого колебания передаются нити резонатора. Нить маятника **2** проходит через канал оси маятника **1** и имеет на другом конце противовес **4**, позволяющий, вместе с трением нити о стенки канала, обеспечивать заданную длину маятника **2** и изменять её по мере необходимости.

Периоды T колебаний маятника **2** при различной его длине указаны на вертикальной шкале **5**. Здесь же указаны величины T/T_0 . Отсчёты периодов производятся по положению черты на противовесе. Амплитуда (угловая) колебаний маятника **2** определяется по шкале **6**.

При проведении эксперимента маятник **1** необходимо отклонить до упора **7** и отпустить. Толчки его якоря раскачивают маятник **2**. Амплитуда последнего будет возрастать до некоторого определённого для данной длины маятника значения.

Во избежание ошибок за счёт параллакса, луч зрения в момент отсчёта амплитуды должен быть нормален к шкале **6**.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 238 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Измерения и вычисления:

1. Установить противовес **4** на одно из делений шкалы **5**. Привести в движение маятник – вибратор. Определить визуально по шкале **6** наибольшее отклонение маятника – резонатора.
2. Повторить измерения для всех делений шкалы **5**.
3. Построить амплитудную резонансную кривую, откладывая по оси абсцисс значения T/T_0 , а по оси ординат соответствующие значения амплитуды.
4. Сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение колебательного движения и приведите примеры колебательного движения в живой природе.
2. Дайте определение основных характеристик гармонических колебаний.
3. В чем заключается явление резонанса?
4. Приведите примеры резонанса в природе.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 239 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лабораторная работа № 6

Изучение законов сухого трения с помощью наклонной плоскости

Цель: экспериментальное определение коэффициентов трения покоя, скольжения и качения.

Принадлежности: установка для определения коэффициентов трения, набор исследуемых тел.

Описание установки и краткая теория

Внешним трением называется взаимодействие, возникающее между соприкасающимися поверхностями твердых тел. *Внутренним трением* называется взаимодействие, возникающее между поверхностью твердого тела и слоями жидкости или газа при их относительном движении.

Силами трения называют силы, характеризующие взаимодействие соприкасающихся поверхностей двух тел и препятствующие их взаимному перемещению. Силы трения приложены к телам вдоль поверхностей их соприкосновения и всегда направлены в сторону, противоположную относительной скорости движения тел.

Возникновение сухого трения обусловлено тем, что вследствие шероховатости поверхностей, соприкасающихся друг с другом, контакт между телами имеет место только на гребнях выступов ($d \sim 1-50$ мкм). В местах контакта поверхности внедряются одна в другую. При движении в местах контакта возникают микроскопические деформации (расстояния между частицами поверхностных слоев уменьшаются). Электромагнитные силы, возникающие при этом, макроскопически проявляются как силы трения.

Существуют три вида внешнего трения: *трение покоя*, *трение скольжения* и *трение качения*.

Если относительная скорость соприкасающихся поверхностей равна нулю, имеет место трение покоя, обусловленное в основном упругими деформациями микровыступов. Сила трения покоя направлена противоположно, приложенной вдоль линии



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 240 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

возможного движения «смещающей» силе, а ее модуль равен модулю «смещающей» силы, и может принимать значения от нуля до F_{max} . Максимальное значение модуля силы трения покоя пропорционально модулю силы N нормального давления, действующей на тело со стороны, соприкасающейся с ним поверхности другого тела, в момент начала скольжения, т. е. $F_{тр.пок} = \mu_0 N$, где μ_0 – коэффициент трения покоя.

Если относительная скорость поступательного движения соприкасающихся тел, не равна нулю, имеет место трение скольжения, возникающее в результате пластических деформаций микровыступов и их частичного разрушения. Силы трения скольжения зависят от природы вещества соприкасающихся поверхностей, степени их шероховатости, силы нормального давления и относительной скорости тел (незначительно).

Согласно экспериментально установленному закону Кулона–Амонтона модуль силы трения скольжения пропорционален модулю силы N нормального давления одного тела на другое, т. е. $F = \mu N$, где μ – коэффициент трения скольжения.

Модуль силы трения скольжения всегда меньше модуля максимальной силы трения покоя, т. е. $\mu_0 > \mu$. Однако если различие между этими двумя силами мало, то можно считать, что $\mu_0 = \mu$.

При движении тела массой m по наклонной плоскости, образующей угол α с горизонтом, модуль силы трения скольжения $F = \mu mg \cos \alpha$. По второму закону Ньютона $ma = mg \sin \alpha - \mu mg \cos \alpha$, т. е. модуль ускорения тела $a = g \sin \alpha - \mu g \cos \alpha$. Следовательно, коэффициент трения скольжения $\mu = \frac{g \sin \alpha - a}{g \cos \alpha}$. При равномерном движении тела по наклонной плоскости $\vec{a} = \vec{0}$. В этом случае коэффициент трения скольжения $\mu = \operatorname{tg} \alpha$.

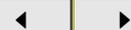
При движении по горизонтальной поверхности, тела массой m_2 связанного нитью перекинутой через неподвижный блок с грузом массой модуль ускорения системы тел согласно второму закону Ньютона, $(m_1 + m_2) a = m_1 g - F$, где F – модуль силы трения скольжения. При движении тела по горизонтальной поверхности $F = \mu m_2 g$,



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 241 из 319

Назад

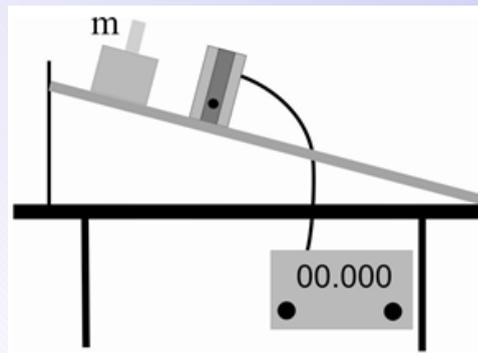
На весь экран

Заккрыть

где μ – коэффициент трения скольжения. Следовательно, $(m_1 + m_2) a = (m_1 \mu m_2) g$. Если тело движется равноускоренно, то $\mu = \frac{m_1}{m_2} - \frac{(m_1 + m_2) a}{m_2 g}$. При равномерном движении, $\mu = \frac{m_1}{m_2}$.

Установка для выполнения опыта схематически изображена на [рисунке](#).

Измерения и вычисления



1. Приподнимите подъемным механизмом конец основания прибора на максимально возможную высоту. Вторую половину основания прибора установите горизонтально.
2. Вставьте стержень с флажком в отверстие расположенное на боковой грани тела с различными поверхностями трения, а второй стержень – в отверстие на верхней грани тела.
3. Измерьте длину d флажка бокового стержня.
4. Взвешиванием определите массу m_2 тела вместе со стержнями и среднюю массу $\langle m_0 \rangle$ одной шайбы.
5. Установите тело на наклонной поверхности желоба и убедитесь, что оно может свободно перемещаться по направляющим желоба.
6. Положите на тело некоторое количество шайб, и освободите тело. Если тело не движется, уменьшите число шайб и вновь проверьте движение системы. Повторяйте это действие до тех пор, пока тело не начнет двигаться.
7. Установите оптический датчик на наклонной части основания таким образом, чтобы его основание (магнит) соприкасалось с металлической линейкой на верхней стороне основания прибора. Убедитесь, что флажок бокового стержня проходит через створ оптического датчика.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 242 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

8. Подсоедините оптический датчик к гнезду 1 секундомера, установите прибор в режим (ONE).
9. Устанавливая тело в одно и то же исходное положение, несколько раз измерьте промежуток времени, в течение которого флажок двигался в створе оптического датчика (прошел путь равный собственной длине), после освобождения тела (см. рис.).
10. Рассчитайте модуль скорости тела в тот момент, когда флажок проходит через створ датчика при различных положениях датчика и убедитесь в том, что тело движется равномерно. Если тело двигалось равноускоренно, и значения модулей скорости, полученные при различных положениях датчика значительно отличаются друг от друга, рассчитайте модуль ускорения тела ($a = \frac{2d}{\Delta t^2}$, где d – длина флажка, Δt – промежуток времени, в течение которого флажок двигался в створе оптического датчика).
11. Повторите измерения для других поверхностей трения и при других значениях массы m тела.
12. Используя результаты измерений и вычислений, рассчитайте коэффициент трения скольжения для различных поверхностей трения:
 - по формуле $\mu = \operatorname{tg} \alpha$, если движение было равномерным;
 - по формуле $\mu = \frac{g \sin \alpha - a}{g \cos \alpha}$, при равноускоренном движении тела.
13. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу:

d	m_2	$\langle m_0 \rangle$	m_1	$m_1 + m_2$	Δt	v	a	μ



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 243 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Контрольные вопросы

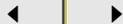
1. Дайте определение силы трения.
2. Чем отличаются друг от друга трение покоя, трение скольжения и трение качения?
3. Приведите примеры использования законов трения живыми организмами.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 244 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лабораторная работа № 7 Определение числа Авогадро

Цель работы: рассчитать на основе эксперимента число Авогадро.

Приборы и принадлежности: микроскоп биологический, микроскоп МПВ-1, эмульсия, осветитель.

Описание установки и краткая теория

За единицу количества вещества в системе СИ принят один моль. Моль – количество вещества системы, содержащее столько же структурных элементов (молекул, атомов, ионов, электронов, других частиц), сколько содержится атомов в 0,012 кг изотопа углерода C^{12} . Количество структурных элементов в одном моле называется числом Авогадро (N_A). Это число является одной из важнейших постоянных. Оно используется при определении многих величин (массы молекулы, заряда электрона, постоянной Больцмана и др.). Поэтому важно знать его точное значение. Известно более 20 методов определения числа Авогадро. Наиболее точные из них основаны на данных о плотности и строении кристаллов. Зная массу моля кристалла μ , его плотность ρ , объём элементарной ячейки V и число молекул в ней N , можно вычислить число Авогадро: $N_A = \frac{\mu N}{\rho V}$. В случае ячейки кубической формы $V = a^3$. Постоянная решетки a находится экспериментально по рентгенограммам, получаемым в результате дифракции рентгеновских лучей в кристалле.

Французский физик Х. Перрен в своих исследованиях пришел к выводу, что, так как броуновские частицы вовлекаются в тепловое движение, то они должны вести себя подобно гигантским молекулам, и на них должны распространяться закономерности кинетической теории. На этом основании к взвешенным в жидкости мелким твердым частицам он применил закон распределения молекул газа по высоте:

$$n_0 = n_{00} e^{-\frac{mg(h-h_0)}{kT}},$$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 245 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

где n_0 и n_{00} – число броуновских частиц в единице объема соответственно на высотах h и h_0 , m – масса этой частицы, k – постоянная Больцмана.

Учитывая выталкивающее действие жидкости на твердые частицы, закон запишется:

$$n_0 = n_{00} e^{-\frac{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) V g (h - h_0)}{kT}} = n_{00} e^{-\frac{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})^4 / 3 \pi \bar{r}^3 g (h - h_0)}{kT}},$$

где $\rho_{\text{ч}}$ и $\rho_{\text{ж}}$ – плотности частицы и жидкости, \bar{r} – средний радиус частиц. Отсюда можно выразить число Авогадро, если размер частиц найден независимым способом.

Заменим в последней формуле постоянную Больцмана отношением универсальной газовой постоянной к числу Авогадро и, выразив последнее, получим:

$$N_A = \frac{RT \ln \frac{n_{00}}{n_0}}{4/3 \pi \bar{r}^3 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) g (h - h_0)} \quad (26.1)$$

Измерения и вычисления

Для опыта приготавливается эмульсия из двухпроцентного раствора канифоли в спирте и дистиллированной воды. Плотность канифоли $\rho_{\text{ч}} = 1,08 \text{ г/см}^3$, плотность эмульсии $\rho_{\text{ж}} = 0,95 \text{ г/см}^3$.

Эмульсией заполняют углубление предметного стекла и сверху закрывают покровным стеклом. Предметное стекло помещают на столик микроскопа с объективом (x40) или (x100) и добиваются отчетливой видимости взвешенных частиц на одном из уровней. В окуляр микроскопа вставляют кусок фольги с отверстием для ограничения поля зрения. Наблюдают за броуновским движением взвешенных в жидкости частиц. В течение 10 секунд подсчитывают и записывают число частиц, появляющихся в поле зрения. Находят среднее значение \bar{z}_{00} . Если отверстие достаточно велико и в нем одновременно видно много частиц, то можно подсчитывать число частиц, видимых в отверстии. Измерения повторить 10 раз.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 246 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Опускают предметный столик на некоторую высоту и снова производят 10 измерений. Находят среднее значение \bar{z}_0 . Отношение концентрации частиц на двух различных уровнях \bar{z}_{00}/\bar{z}_0 можно принять равным n_{00}/n_0 .

Вычисляют расстояние $h_1 - h_0$ между слоями, в которых производились наблюдения. При этом нужно ввести поправку, учитывающую преломление света на границе жидкость-воздух.

Истинная разность $h_1 - h_0 = n_{\text{ж}} \cdot \Delta h$, где Δh – перемещение предметного столика, отсчитанное по шкале микрометрического винта. $\Delta h = \alpha x$, где α – цена деления микрометрического винта, равная $2,5 \cdot 10^{-3}$ мм, x – число делений винта, соответствующее перемещению, $n_{\text{ж}}$ – при расчетах можно принять равным 1,33.

Вычисляют средний радиус броуновских частиц. Для определения радиуса частицы используют микроскоп МПВ-1. Рассматривают в микроскоп при окуляре (x12,5) и объективе (x90) предметное стекло с той же самой, но подсохшей эмульсией. При высыхании частицы эмульсии, имеющие сферическую форму, соединяются в цепочки. Поскольку частицы эмульсии имеют несколько различные радиусы, то подобный подсчет производят до 10 раз для различных цепочек частиц. Такие подсчеты следует делать особенно тщательно, т. к. наибольшую ошибку в определении дает ошибка при определении среднего радиуса частицы. Находят средний радиус частицы эмульсии \bar{r} , имея в виду, что при объективе (x90) цена наименьшего деления на барабане отсчетного механизма 10^{-4} мм.

По термометру определяют комнатную температуру. Вычисляют число Авогадро по формуле (26.1)

Контрольные вопросы

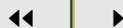
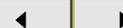
1. Причины броуновского движения.
2. Физический смысл числа Авогадро?
3. Основные положения молекулярно-кинетической теории.
4. Записать формулы, связывающие количество вещества: с числом Авогадро; с массой вещества.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 247 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лабораторная работа № 8

Определение универсальной газовой постоянной

Цель работы: рассчитать на основании экспериментальных данных универсальную газовую постоянную.

Приборы и принадлежности: стеклянная колба, насос, весы, манометр.

Описание установки и краткая теория

Используемый в этой работе метод определения газовой постоянной R основан на уравнении Менделеева-Клапейрона для идеального газа. В работе используют стеклянную колбу емкостью 2500 см^3 , соединенную шлангом с манометром и насосом.

Измерения и вычисления

1. Определяют массу колбы и содержащегося в ней воздуха.
2. Определяют температуру в лаборатории T . При атмосферном давлении в колбе $P_1 V = \frac{m_1 - m_0}{\mu} RT$, где P_1 – давление воздуха в колбе; m_1 – масса колбы с воздухом; m_0 – масса пустой колбы.
3. Колбу соединяют с манометром и насосом и откачивают до возможного малого давления P_2 .
4. Шланг пережимают зажимом, и на весах вновь определяется масса колбы и содержащегося в ней после откачки воздуха. В этом случае $P_2 V = \frac{m_2 - m_0}{\mu} RT$, где m_2 – масса колбы с воздухом после откачки.

Из двух последних уравнений непосредственно следует, что

$$R = \frac{\mu (P_1 - P_2) V}{(m_1 - m_2) T}.$$

Опыт повторить три раза, найти среднее значение R и её погрешность.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 248 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Контрольные вопросы

1. Какой газ можно считать идеальным?
2. Запишите уравнение Менделеева-Клапейрона. Какой физический смысл входящих в него величин?
3. Дать определение моля.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 249 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лабораторная работа № 9

Определение эффективного диаметра молекул воздуха

Цель работы: определить длину свободного пробега и эффективный диаметр молекул воздуха.

Приборы и принадлежности: установка, секундомер, термометр, барометр, стакан.

Описание установки и краткая теория

Для нахождения средней длины свободного пробега молекул газа λ используют формулу, выражающую зависимость коэффициента внутреннего трения (вязкости) η от λ и \bar{v} :

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{v} \lambda, \quad (28.1)$$

где ρ – плотность газа, \bar{v} – средняя арифметическая скорость молекул газа. Подставляя в формулу (28.1) значение ρ (из уравнения Менделеева-Клапейрона) и \bar{v} , получим:

$$\eta = \frac{1}{3} \frac{\mu P}{RT} \lambda \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}. \quad (28.2)$$

В данной работе используется зависимость объема газа, протекающего за время τ через трубку, от параметров трубки l, r (рис. 9.1), через которую проходит газ, и разности давлений ΔP , возникающей на концах этой трубки. Эта зависимость выражается формулой Пуазейля:

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta P \tau}{8 \eta l}, \quad (28.3)$$

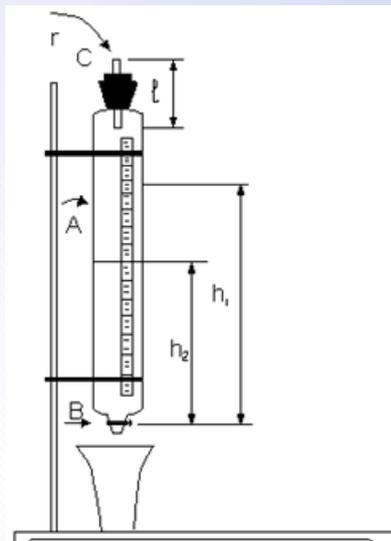


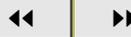
Рисунок 28.1 – Установка для определения длины свободного пробега молекул воздуха



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 250 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

где V – объем газа, в данном случае воздуха, проходящего через трубку C , длины l и радиуса r за время τ ; ΔP – разность давлений на концах трубки C . Из формул (28.2) и (28.3) средняя длина свободного пробега молекул воздуха равна:

$$\lambda = \frac{3\pi r^4 \Delta P \tau}{8lPV} \sqrt{\frac{\pi RT}{8\mu}}. \quad (28.4)$$

Измерения и вычисления

1. Открывают кран B и, дождавшись, когда вода начнет вытекать из баллона каплями, отмечают уровень воды h_1 , подставляют мерный стаканчик и засекают время, за которое в стаканчик вытечет 50-80 см³ воды. Отмечают новый уровень h_2 . Объем воды, вытекшей из баллона в стаканчик, равен объему воздуха, вошедшего в баллон A через трубку C .
2. По формуле (28.4) подсчитывают среднюю длину свободного пробега молекул воздуха. Разность давлений вычисляют по формуле:

$$\Delta P = \rho_1 g \frac{h_1 + h_2}{2},$$

где ρ_1 – плотность воды (считать равной 10³ кг/м³) и h_2 – уровни ее в баллоне A . Формулу (28.4) лучше записать в виде:

$$\lambda = const \frac{\Delta P \tau}{V}, \quad (28.5)$$

где $const = \frac{3\pi r^4}{8lP} \sqrt{\frac{\pi RT}{8\mu}}$ (для данного опыта). Опыт повторить три раза.

3. По формуле длины свободного пробега $\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n}$ подсчитывают эффективный диаметр молекулы воздуха, предварительно заменяя в формуле n выражением

$$n = n_0 \frac{PT_0}{P_0T}. \quad (28.6)$$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 251 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

После замены окончательно получим формулу для эффективного диаметра молекулы:

$$\sigma = \sqrt{\frac{TP_0}{\sqrt{2\pi n_0 PT_0 \bar{\lambda}}}}, \quad (28.7)$$

где n_0 – число Лошмидта, P_0 и T_0 – давление и температура при нормальных условиях, $\bar{\lambda}$ – средняя величина из трех значений, вычисленных по формуле (28.5), P и T – давление и температура, при которых протекает опыт, берут из показаний барометра и термометра, находящихся в лаборатории. Параметры капилляра указаны на установке.

Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу. Проводят расчет погрешности $\Delta\lambda$ величины λ .

№	τ	h_1	h_2	ΔP	V	λ	$\Delta\lambda$	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$	$\lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta\lambda$	σ
1										
2										
3										

Контрольные вопросы

1. Что такое средняя длина свободного пробега молекул газа?
2. Какой физический смысл эффективного диаметра молекулы?
3. Физический смысл числа Лошмидта.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 252 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лабораторная работа № 10

Определение удельного заряда электрона

Цель работы: ознакомление с одним из способов фокусировки слаборасходящегося электронного пучка в продольном магнитном поле и измерение микроскопического параметра электрона.

Приборы и принадлежности: установка для измерения удельного заряда электрона.

Описание установки и краткая теория

Удельный заряд является одним из параметров, характеризующих движение электрона в электромагнитных полях. Рассматриваемый метод определения удельного заряда электрона e/m важен тем, что позволяет уяснить физическую сущность магнитной фокусировки электронных пучков.

Рассмотрим движение заряженных частиц в однородном магнитном поле. При этом будем считать, что на частицы не действуют никакие электрические поля.

1. Простейший случай – движение заряженной частицы вдоль линий индукции магнитного поля. При таком движении частицы угол α между векторами её скорости и индукции равен 0 или π . Поэтому сила Лоренца равна нулю, т. е. магнитное поле не действует на частицу. Она будет двигаться по инерции – равномерно и прямолинейно.

2. Пусть электрон движется перпендикулярно к линиям магнитной индукции со скоростью V . Тогда сила Лоренца численно равна $F_{\text{л}} = |e|BV$. Следовательно, частица движется в плоскости, перпендикулярной к вектору магнитной индукции, причем сила Лоренца является центростремительной силой: $F_{\text{центр}} = mV^2/R$, где m – масса частицы, R – радиус кривизны её траектории. Тогда радиус кривизны траектории:

$$R = \frac{mV}{|e|B}.$$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 253 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Так как в однородном магнитном поле $B = const$, а численное значение скорости заряда в магнитном поле не изменяется, то радиус кривизны траектории этого заряда оказывается постоянным. Поэтому заряженная частица будет двигаться по окружности, плоскость которой перпендикулярна к магнитному полю, а радиус прямо пропорционален скорости частицы и обратно пропорционален её удельному заряду и индукции поля.

3. На движущийся электрический заряд в магнитном поле действует сила Лоренца $F = eVB \sin \alpha$. Эта сила перпендикулярна как к магнитному полю, так и к направлению движения электрона.

Если угол между направлением движения электрона и магнитным полем α , то скорость движения можно разложить на две составляющие, одна из которых перпендикулярна, а другая – параллельна магнитному полю.

$$V_1 = V \sin \alpha,$$

$$V_2 = V \cos \alpha.$$

Таким образом, на величину силы Лоренца помимо поля влияет только нормальная составляющая скорости. Справедливо и обратное утверждение – сила Лоренца влияет только на нормальную составляющую скорости.

Рассматривая движение электрона как сложное движение со скоростями V_1 и V_2 , можно утверждать, что сила Лоренца не влияет на движение вдоль поля (движение по прямой) и является причиной изменения нормальной составляющей скорости (движение по окружности). Результирующим движением будет движение по винтовой линии.

Для движения по окружности (в плоскости перпендикулярной индукции поля) сила Лоренца является центростремительной силой $eBV = \frac{mV^2}{R}$. Очевидно, что время одного оборота $T = \frac{2\pi R}{V}$. Тогда $T = \frac{2\pi m}{eB}$. За время одного оборота электрон, участвуя в равномерном и прямолинейном движении, сместится вдоль магнитного поля на расстояние, равное шагу винта $h = VT$, откуда следует, что $h = \frac{2\pi mV \cos \alpha}{eB}$.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 254 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Рассмотрим важный для практики случай, когда углы α невелики, т. е. $\cos \alpha \approx 1$. В таких условиях можно записать $h = \frac{2\pi mV}{eB}$.

Таким образом, путь h , который прошел электрон в магнитном поле за один оборот, не зависит от угла α (для малых углов). Из этого следует, что все электроны, вышедшие из одной точки под небольшими, но разными углами к магнитному полю, после одного оборота соберутся вновь в одной точке. В этом заключается принцип магнитной фокусировки электронов. Из последнего соотношения находим: $\frac{e}{m} = \frac{2\pi V}{hB}$.

Для осуществления эксперимента электроны разгоняются в электрическом поле с разностью потенциалов U и приобретают кинетическую энергию $\frac{mV^2}{2} = eU$. Тогда $\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U}{h^2 B^2}$.

Магнитная индукция соленоида $B = \mu\mu_0 In$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$, а n – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида, $\mu = 1$.

Поэтому $\frac{e}{m} = 8 \left(\frac{\pi}{h\mu_0 In} \right)^2 U$. По этой формуле вычисляется величина удельного заряда электрона.

Измерения и вычисления

Внимание! Установку включать не более чем на 5 минут.

1. Включить тумблер «сеть». На экране появится светящееся пятно.
2. Поворотом ручки I_c (ток соленоида) добиться того, чтобы размеры пятна на экране были наименьшими, что отвечает фокусировке электронов.
3. Замерить значение тока, соответствующее каждому фокусу.
4. Увеличивая ток, добейтесь следующей фокусировки электронов, размеры пятна при этом наименьшие.
5. С помощью тумблера «+/-» поменять полярность источника, питающего соленоид.
6. Зафиксировать первый и второй фокусы и измерить соответствующие им значения силы тока.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 255 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

7. Подставить полученные данные в расчётную формулу и определить удельный заряд электрона.

$$h_1 = 0,1 \text{ м}, n = 15000, h_2 = 0,05 \text{ м}, U = 1100 \text{ В}.$$

Контрольные вопросы

1. Каковы численные значения заряда электрона и его массы покоя?
2. Запишите формулу для силы Лоренца и раскройте физический смысл входящих в нее величин.
3. Приведите примеры действия силы Лоренца в природе.
4. Реагируют ли животные на магнитное поле?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 256 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лабораторная работа № 11

Определение неизвестного сопротивления проводников

Цель работы: Изучить и освоить методы измерения сопротивлений в цепях постоянного тока.

Приборы и принадлежности: Мост сопротивлений постоянного тока, магазин сопротивлений, нуль-гальванометр, реохорд на базе реостата, образцы неизвестных сопротивлений R_{1x} и R_{2x} , ключ, источник питания ИЭПП-1, набор соединительных проводов, омметр.

Описание установки и краткая теория

Из закона Ома для участка цепи следует, что сопротивление этого участка может быть определено, если известен ток этого участка и падение напряжения на этом участке:

$$R = \frac{U}{I} \quad (30.1)$$

Рассмотрим два варианта, которые позволяют измерить силу тока и напряжение (представлены на **рис. 11.1** и **11.2**).

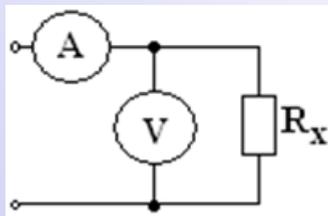


Рисунок 30.1

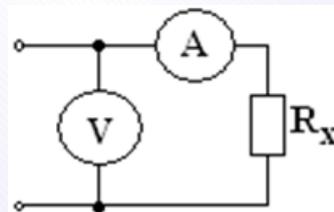


Рисунок 30.2



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 257 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Независимо от способа включения электроизмерительных приборов определить сопротивление участка R_x , прибегая к услугам (30.1), можно лишь чисто гипотетически. Другими словами, подстановка в (30.1) показаний амперметра и вольтметра приводила бы к более или менее объективным оценкам сопротивления R_x тогда и только тогда, когда бы амперметры и вольтметры, используемые в этих измерительных схемах, были идеальны. Идеальность амперметров, например, состояла бы в равенстве нулю их внутреннего сопротивления, а идеальность вольтметров, наоборот, в бесконечности их внутреннего сопротивления. Реальные амперметры обладают, хотя и малым, но не нулевым сопротивлением, а вольтметры – хотя и большим, но не бесконечным сопротивлением. В связи с этим, сопротивление участка R_x должно вычисляться по формуле:

$$R_x = \frac{U}{I - \frac{U}{r_V}}, \quad (30.2)$$

где U и I – показания вольтметра и амперметра соответственно, r_V – внутреннее сопротивление вольтметра.

По аналогичным причинам из схемы рис. 11.2 следует, что

$$R_x = \frac{U - I r_A}{I}, \quad (30.3)$$

где r_A – сопротивление амперметра.

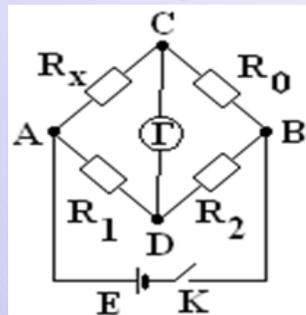


Рисунок 30.3

Из (30.2) и (30.3) следует, что чем дальше используемые приборы отстоят от идеальных ($r_A \neq 0$ и $r_V \rightarrow \infty$), тем острее необходимость в учете этой неидеальности. Легко убедиться, что в идеальных ситуациях (30.2) и (30.3) переходят в (30.1). В реальной ситуации необходимость определить сопротивление участка цепи R_x сопряжена с обязательным наличием информации об r_V или r_A , что не всегда является доступным. Однако существует способ измерения сопротивлений на постоянном токе, лишенный рассмотренных выше недостатков.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 258 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Если включить сопротивление R_x , величину которого необходимо измерить, в схему **рис. 11.3**, которую называют мостовой, то при определенном соотношении величин неизвестного R_x и известных R_0 , R_1 и R_2 , при которых ток через гальванометр оказывается равным нулю, R_x связано с остальными известными сопротивлениями плеч моста простым соотношением:

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2} \quad (30.4)$$

Если при прочих равных условиях еще и $R_1 = R_2$, то по (30.4) $R_x = R_0$, что ведет не только к упрощению методики измерения, но и к повышению точности в определении R_x .

Чтобы практически ощутить ценность мостового метода измерения сопротивлений, предлагается сначала собрать модель мостовой схемы, произвести на ней измерение предлагаемых образцов неизвестных сопротивлений, а затем сравнить эти результаты с теми, которые будут получены при измерении этих же сопротивлений на «настоящем» (заводском) мосту сопротивлений. Если в схеме **рис. 11.3** сопротивления R_1 и R_2 в совокупности заменить отрезком толстой проволоки, выполненной из материала с высоким удельным сопротивлением, то сумму R_1 и R_2 можно представить в виде: $R_1 + R_2 = \rho \frac{l}{S}$, где ρ – удельное сопротивление проволоки, а l и S – её длина и сечение соответственно.

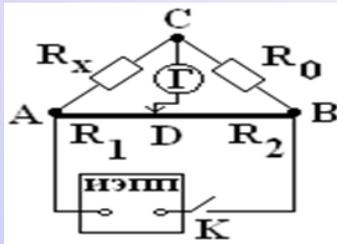


Рисунок 30.4

Если включить такой отрезок в схему **рис. 11.4** вместо $R_1 + R_2$, подключая гальванометр к проволоке через подвижный контакт (в нашем случае это движок реостата и сам реостат), то полученная структура также будет мостовой. В качестве R_0 включить следует магазин сопротивлений. Такая измерительная схема получила название **моста Уитстона**.

Скользящий контакт в зависимости от его положения делит сопротивление проволоки реохорда на части $R_1 = \rho l_1 / S$ и $R_2 = \rho l_2 / S$. Подбирая величину R_0



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 259 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

и положение движка D так, чтобы ток гальванометра равнялся нулю, по (30.4) находим, что

$$R_x = \frac{l_1}{l_2} R_0. \quad (30.5)$$

Измерения и вычисления

1. Соберите схему по рис. 11.4. Прежде чем включить источник питания ИЭПП-1, ручку регулировки выходного напряжения установите против часовой стрелки до упора. Включите источник. Ползунком реохорда установите D на середину шкалы. Магазином сопротивлений R_0 установите $R \approx (700 \dots 800)$ Ом. Ручкой регулирования входного напряжения ИЭПП-1 подайте на входную диагональ моста напряжение не более $(1 \dots 2)$ В. Кратковременно замыкая ключ K , измените в большую или меньшую сторону сопротивление R_0 до тех пор и таким образом, чтобы добиться отсутствия тока через гальванометр. Мост будет сбалансирован: $R_1 = R_2$, $l_1 = l_2$ и $R_x = R_0$.
2. Сдвиньте ползунок реохорда в левую или правую сторону и добейтесь изменением R_0 баланса моста. Искомое значение R_x теперь следует искать из соотношения $R_x = R_0 \frac{l_1}{l_2}$. Сравните это значение R_x с тем, которое было получено при $l_1 = l_2$.

Аналогично произведите измерения второго сопротивления, а затем при последовательном и параллельном соединениях двух сопротивлений.

Результаты измерений и расчетов удобно вносить в следующую таблицу:

№ п/п	l_1 , мм	l_2 , мм	R_0 , Ом	$R_{\text{изм}}$, Ом	ΔR , Ом	$R_{\text{эксп}}$, Ом
1*						
2**						
3***						

* – Случай, когда $l_1 = l_2$.

** – Случай, когда $l_1 > l_2$.

*** – Случай, когда $l_1 < l_2$.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 260 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Контрольные вопросы

1. Что такое электрический ток?
2. Как определяется сопротивление линейных проводников? От чего оно зависит и в каких единицах измеряется? Каково сопротивление тела человека?
3. Сформулируйте закон Ома для однородного участка цепи.
4. От чего зависит биологическое действие тока?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 261 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лабораторная работа № 12

Изучение электроизмерительных приборов

Цель работы: 1. Уяснить принцип измерения токов и напряжений
2. Приобрести навыки в использовании одного и того же измерительного механизма для измерения токов и напряжений в широких пределах.

Приборы и принадлежности: измерительный механизм – микроамперметр, контрольный вольтметр, контрольный миллиамперметр, магазин сопротивлений, реостат, источник напряжения ИЭПП-1, набор соединительных проводов, омметр.

Описание установки и краткая теория

Для измерения токов и напряжений может быть использован один и тот же измерительный механизм. При включении такого механизма в электрическую схему через него течет ток. Величина электрического тока, протекающего через измерительный механизм и вызывающего отклонение стрелки прибора на всю шкалу (последнее деление шкалы), называется номинальным током прибора I_n . Так как любой электроизмерительный прибор обладает внутренним сопротивлением $R_{пр}$, то при протекании тока через него создается падение напряжения $I \cdot R_{пр}$. Очевидно, что при $I = I_n$ падение напряжения на внутреннем сопротивлении прибора равно $U_n = I_n \cdot R_{пр}$. Это напряжение называется номинальным напряжением прибора (измерительного механизма).

Для измерения величины тока какой-либо ветви электрической схемы в неё последовательно с другими приборами включается измерительный механизм – прибор

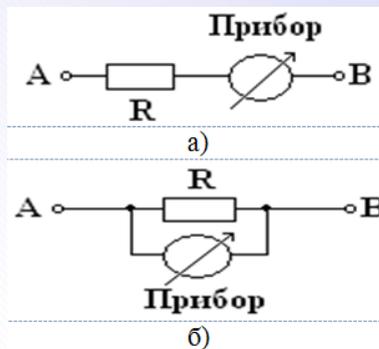


Рисунок 31.1



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 262 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

(рис. 12.1а). Для измерения падения напряжения на каком-либо участке цепи прибор подключается параллельно этому участку (рис. 12.1б). В первом случае прибор называют амперметром (милли-, микро-), а во втором – вольтметром (милли-, микро-).

Поскольку данный измерительный механизм в чистом виде рассчитан на максимальную силу тока $I_{max} = I_n$, то, очевидно, этот же механизм может быть использован для измерения напряжения, величина которого не может принимать значений больших, чем $U_n = I_n \cdot R_{пр}$.

Для расширения пределов измерения данным прибором **токов** его снабжают **шунтом**. Это определенным образом выбранное сопротивление, включаемое **параллельно** измерительному механизму (рис. 12.2).

Шунт отводит через себя ту часть измеряемого тока, которая превышает номинальный ток прибора, а именно $I_{ш} = I_{изм} - I_n$. Сопротивление шунта может быть рассчитано по формуле:

$$R_{ш} = \frac{R_{пр}}{n - 1}, \quad (31.1)$$

где $R_{ш}$ – сопротивление шунта, $R_{пр}$ – сопротивление прибора, $n = I_{изм}/I_n$.

Рассмотренный выше способ расширения пределов измеряемых прибором токов применим только к приборам магнитоэлектрической системы, которые могут работать в цепях постоянного тока. Расширение пределов измерений токов и напряжений у приборов других систем осуществляется другими методами. В данной работе требуется расширить пределы измерения токов и напряжений измерительным механизмом (прибором) до значений, указанных преподавателем.

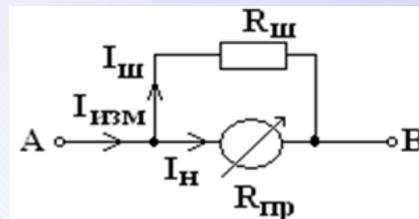


Рисунок 31.2



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 263 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Измерения и вычисления

1. Измерение сопротивления измерительного механизма (прибора).
 - а) Получите задание у преподавателя, на какой ток и какое напряжение следует производить расчет шунта и добавочного сопротивления.
 - б) Выпишите все данные измерительного механизма исходного прибора (номинальный ток, цена деления, класс точности).
2. С помощью моста сопротивлений постоянного тока (или омметра) произведите измерения внутреннего сопротивления исходного прибора. Измерив несколько раз сопротивление измерительного механизма $R_{\text{ип}}$ и найдя среднее, рассчитайте сопротивление шунта по (31.1), взяв n в соответствии с указанным преподавателем значением тока, на который рассчитывается шунт.
3. Проверьте, удовлетворяет шунт основному условию – увеличивать предел измерения прибора по току в n раз. Эту проверку можно осуществить с помощью схемы **рис. 12.3**.

В качестве шунта используйте магазин сопротивлений, с помощью которого набирается необходимое значение $R_{\text{ш}}$. Установите подвижный контакт реостата в среднее положение. Включите источник питания ИЭПП-1. Изменением величины выходного напряжения ИЭПП-1 и положения ползунка реостата установите стрелку испытуемого прибора на максимальное деление шкалы. Контрольный прибор измеряет тот же ток.

Разделив его показания на показания испытуемого прибора, найдите, во сколько раз в действительности оказался увеличенным предел измерения прибора. Сравните расчетное значение n с действительным при различных (меньших) показаниях

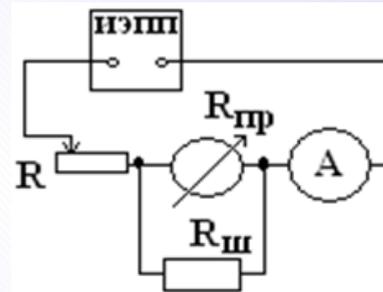


Рисунок 31.3



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 264 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

испытываемого и контрольного приборов. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

№ п/п	Показания шунтируемого прибора	Показания контрольного прибора	Экспериментальное значение n	Расчетное значение n
1				
2				
3				
4				
5				

Контрольные вопросы

1. Что такое сила тока? Напряжение?
2. Какой ток называется постоянным?
3. Что такое цена деления прибора?
4. Какие изменения вызывает ток в теле человека?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 265 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лабораторная работа № 13

Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

Цель работы: Ознакомиться с одним из способов измерения индукции магнитного поля.

Приборы и принадлежности: тангенс-гальванометр, реостат, источник питания ИЭПП-1, ключ, соединительные провода.

Описание установки и краткая теория

Земля, в целом, представляет собой огромный шаровой магнит. В любой точке пространства, окружающего Землю, и на её поверхности обнаруживается действие магнитных сил. Иными словами, в пространстве, окружающем Землю, создаётся магнитное поле, существование которого можно обнаружить с помощью магнитной стрелки. Это поле в каждой точке пространства характеризуется вектором индукции B , величина и направление которого определяется тремя взаимно перпендикулярными составляющими x, y, z (северной, восточной и вертикальной) или тремя элементами земного магнетизма. Горизонтальная составляющая B_0 даёт возможность определить величину и направление полной индукции магнитного поля в данной точке. Если магнитная стрелка может свободно вращаться вокруг вертикальной оси, то она будет устанавливаться под действием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли и плоскости магнитного меридиана.

Для определения горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли поступают следующим образом: в центре кругового проводника из N витков, прилегающих достаточно плотно друг к другу, плоскость которых должна быть расположенной в плоскости магнитного меридиана, помещают магнитную стрелку, которая может вращаться около вертикальной оси. Под действием магнитного поля Земли она устанавливается вдоль B_0 . Если по катушке пропустить ток I , то возникает магнитное поле с индукцией B .



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 266 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Таким образом, на магнитную стрелку, помещенную в центр катушки, будут действовать при пропускании тока два магнитных поля: магнитное поле Земли и магнитное поле тока. Индукции обоих полей взаимно перпендикулярны.

На **рисунке 13.1** изображено сечение катушки горизонтальной плоскостью. Здесь B – вектор индукции поля, создаваемый круговым током, B_0 – горизонтальная составляющая магнитного поля Земли. Стрелка установится по направлению равнодействующей B_1 , т. е. по диагонали параллелограмма, сторонами которого будут векторы магнитного поля B и B_0 . Из рисунка видно, что

$$B = B_0 \operatorname{tg} \beta \text{ и } B_0 = \frac{\mu \mu_0 N}{2R} \times \frac{I}{\operatorname{tg} \beta},$$

где N – количество витков, R – средний радиус катушки, I – ток, протекающей по катушке, β – угол отклонения магнитной стрелки.

$$R = 12,5 \text{ см}, \mu = 1, \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}.$$

Работа выполняется на установке, которая носит название тангенс-гальванометра. В центре кругового проводника из N витков расположена магнитная стрелка, которая может вращаться вокруг вертикальной оси. Поворот магнитной стрелки фиксируется по шкале, шайба служит для арретирования магнитной стрелки. Вся установка собрана на подставке и может вращаться вокруг вертикальной оси. На основании подставки выведены 4 клеммы. Число, стоящее возле клеммы, указывает на количество витков кругового проводника. Поворачивая подставку тангенс-гальванометра, устанавливая витки его катушки в плоскости магнитного меридиана, т. е. добиваясь того, чтобы катушка и магнитная стрелка при разомкнутом ключе находились в одной плоскости. Поворачивая верхнюю часть барабана, в которой смонтирована магнитная стрелка, подводят нулевые деления шкалы под концы стрелки.

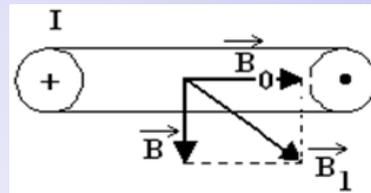


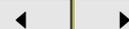
Рисунок 32.1



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



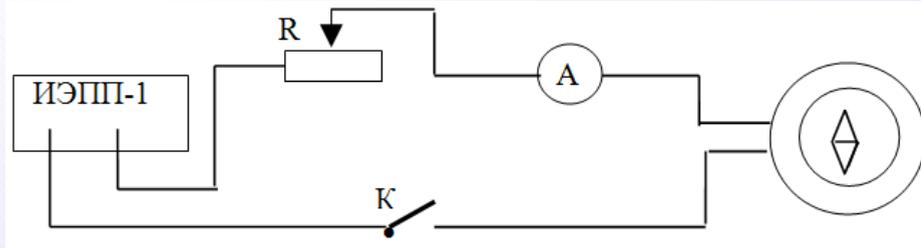
Страница 267 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Измерения и вычисления



Собрать схему.

1. Включить катушку из **10** витков и установить токи $I = 0,15; 0,25; 0,4$ А.
2. Зафиксировать углы β поворота стрелки. Значение тангенса угла β можно посмотреть в таблице.
3. Вычислить по формуле величину B_0 для 3-х значений тока.
4. Аналогичные операции проделать с катушкой из **40** витков.
5. Вычислить среднее значение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.
6. Результаты измерений занести в таблицу.

N	I, A	β	$\text{tg } \beta$	$B_0, \text{Тл}$	$B_{0\text{ср}}, \text{Тл}$	$B'_{0\text{ср}}, \text{Тл}$
10	0,15					
	0,25					
	0,4					
40	0,15					
	0,25					
	0,4					

7. Оценить погрешность измерений.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 268 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Контрольные вопросы

1. Что является источником магнитного поля?
2. Почему у Земли есть магнитное поле?
3. Что такое вектор магнитной индукции?
4. Какие органы человека создают вокруг себя магнитное поле?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 269 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лабораторная работа № 14

Изучение контактных явлений в проводниках

Цель работы: экспериментально изучить закономерности, характерные для контактов двух различных проводников.

Приборы и принадлежности: два сосуда – один с водой, другой – с тающим льдом, электроплитка, термометр, термопара, микровольтметр, соединительные проводники.

Описание установки и краткая теория

При контакте двух различных проводников по обе стороны от границы их раздела возникает обмен электронами, что приводит к возникновению внутренней контактной разности потенциалов ε :

$$\varepsilon = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}, \quad (33.1)$$

где k – постоянная Больцмана, e – заряд электрона, T – абсолютная температура, n_{01} и n_{02} – концентрации свободных электронов контактирующих проводников.

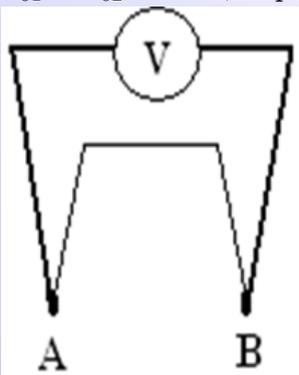


Рисунок 33.1

Рассмотрим цепь (рис. 14.1), состоящую из спаянных между собой проводников, изготовленных из различных материалов. Пока температура спаев одинакова, контактные разности потенциалов, возникающие в спаях **А** и **В**, равны между собой. Иная ситуация наблюдается при нарушении температурного равновесия спаев. Возникающие в спаях разности потенциалов по (33.1) становятся неодинаковыми. В такой цепи результирующая ЭДС становится отличной от нуля и равной

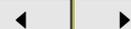
$$\Delta E = |E_1 - E_2| = \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}, \quad (33.2)$$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 270 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

что вызывает появление тока в цепи. Эта ЭДС получила название термоэлектродвижущей силы – термо-ЭДС. Рассмотренный эффект нашел широкое применение на практике. Это явление широко используется в металлургии для измерения температуры расплавленных металлов, причем это измерение может осуществляться на расстоянии (телеметрия). Используется это явление и при создании термобатарей для питания маломощных потребителей электрической энергии.

Интересен эффект, наблюдаемый при пропускании тока в цепи **рис. 14.1**. Если в эту цепь включить внешний источник, то при одном направлении тока в этом контуре один из контактов будет нагреваться, а другой – охлаждаться. При изменении направления тока холодный контакт станет горячим, а горячий – холодным. Описанный эффект был открыт Пельтье и назван его именем. Объяснить его несложно, если рассмотреть работу, которую совершает внешний источник над контактным полем одного и другого спаев. Для одного из спаев эта работа при данном направлении тока от внешнего источника будет положительной, а для другого – отрицательной. Этот эффект также широко используется в науке и медицине (для термостатирования при положительных и отрицательных температурах), в мобильных и стационарных холодильных установках и кондиционерах и пр. КПД таких систем в настоящее время достигает (15...20) %.

Измерения и вычисления

В данной работе предлагается экспериментально изучить зависимость термо-ЭДС от разности температур двух спаев, образованных медной и константановой проволокой. Это устройство называют термопарой. Измерение зависимости термо-ЭДС термопары от разности температур, по существу, является градуировкой термопары.

Обычно для градуировки термопар используют некоторые заранее известные с достаточной степенью точности точки температуры, например, температура таяния льда, температура кипения воды, температура плавления чистых металлов и т. д. В



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 271 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

процессе градуировки один спай термостатируется (в сосуде с тающим льдом, например), а второй спай погружают в среду, в которой создается известная температура (например, нагреваемая вода, температура которой контролируется термометром).

В работе термо-ЭДС измеряется микровольтметром. Один спай погружают в сосуд с тающим льдом, а другой – в сосуд с водой, разогреваемый электронагревателем. В сосуд с нагреваемой водой помещается термометр. По мере нагревания воды во втором сосуде через каждые $(10 \dots 15)^\circ\text{C}$ следует фиксировать термо-ЭДС до тех пор, пока вода не закипит. Рекомендуется измерять термо-ЭДС и при остывании воды.

По данным измерений построить зависимость $E = f(\Delta T)$, а также произвести оценку погрешности измерения термо-ЭДС и отразить это на градуировочном графике.

Контрольные вопросы

1. Какие силы называют сторонними?
2. Что такое разность потенциалов? Что такое ЭДС?
3. Объясните причину возникновения контактной разности потенциалов при соединении двух различных проводников.
4. Почему в организме возникают биопотенциалы?
5. Объясните опыты Гальвани.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 272 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лабораторная работа № 15

Изучение тонких линз

Цель работы: измерить фокусное расстояние тонкой собирающей линзы, зависимость расстояние линза – изображение от расстояния линза – предмет и зависимость поперечного увеличения, даваемого линзой, от расстояния линза – предмет.

Приборы и принадлежности: оптическая скамья, лампа накаливания в кожухе, экран, исследуемая линза, красный светофильтр, диафрагма.

Описание установки и краткая теория

Тонкими называются такие линзы, толщиной которых можно пренебречь (по сравнению с радиусами кривизны из поверхностей).

Линзы бывают собирающими (положительная оптическая сила) и рассеивающими (отрицательная оптическая сила).

Как показывают расчеты, оптическая сила тонкой линзы

$$\Phi = \frac{1}{f} = \left(\frac{n}{n_{\text{ср}}} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (34.1)$$

где f – фокусное расстояние линзы, n и $n_{\text{ср}}$ – показатели преломления вещества линзы и среды, в которой находится линза, соответственно, r_1 и r_2 – радиусы кривизны поверхностей линзы (без учета их знаков).

Оптическая сила линз измеряется в диоптриях. 1 дп – это оптическая сила тонкой линзы, фокусное расстояние которой в воздухе равно 1 м.

Знаки всех отрезков (радиусы, расстояния) определяются по следующему правилу: начало отсчета отрезка – оптический центр линзы. Если направление отсчета **совпадает** с направлением световых лучей – отрезок **положительный**. Если не совпадает – отрезок отрицательный.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



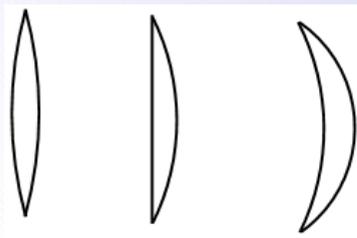
Страница 273 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Используя правило знаков, можно убедиться, что линзы



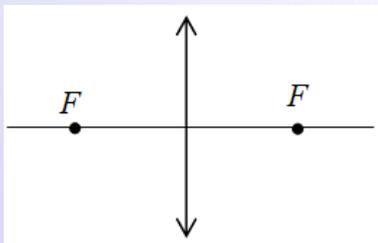
будут все положительными (кстати, у всех середина толще краев).

А линзы с сечением

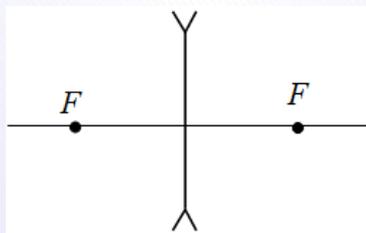


будут отрицательными (у них центр тоньше краев).

Схематически тонкие линзы обозначаются



собирающая



рассеивающая



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 274 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

У собирающей линзы фокус (точка, где собираются лучи, идущие параллельно главной оптической оси) действительный, фокусное расстояние $f > 0$.

У рассеивающей линзы фокус мнимый, фокусное расстояние $f < 0$.

Одна из основных задач оптики – при заданных параметрах оптической системы, положении предмета относительно нее рассчитать положение изображения, его свойства: действительное или мнимое, увеличение, прямое или перевернутое.

Для тонкой линзы это можно делать, опираясь на формулу тонкой линзы

$$\frac{1}{b} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f}, \quad (34.2)$$

где a и b – расстояния линза–предмет и линза–изображение (без учета знаков), f – фокусное расстояние (без учета знака).

Из формулы (34.2) получим

$$b = \frac{af}{a + f} \quad (\text{без учета знаков}) \quad (34.3)$$

Для собирающей линзы $a < 0$, $f > 0$, получим с учетом знаков

$$b = \frac{af}{a - f} \quad (34.4)$$

Видно, что знак b , а, значит, будет ли полученное изображение действительным или мнимым, зависит от соотношения между a и f . Если $|a| > f$ – изображение действительное ($b > 0$). Если $|a| < f$ – изображение мнимое ($b < 0$).

Для рассеивающей линзы $a < 0$, $f < 0$, получим с учетом этих знаков

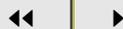
$$b = -\frac{af}{a + f} \quad (34.5)$$



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



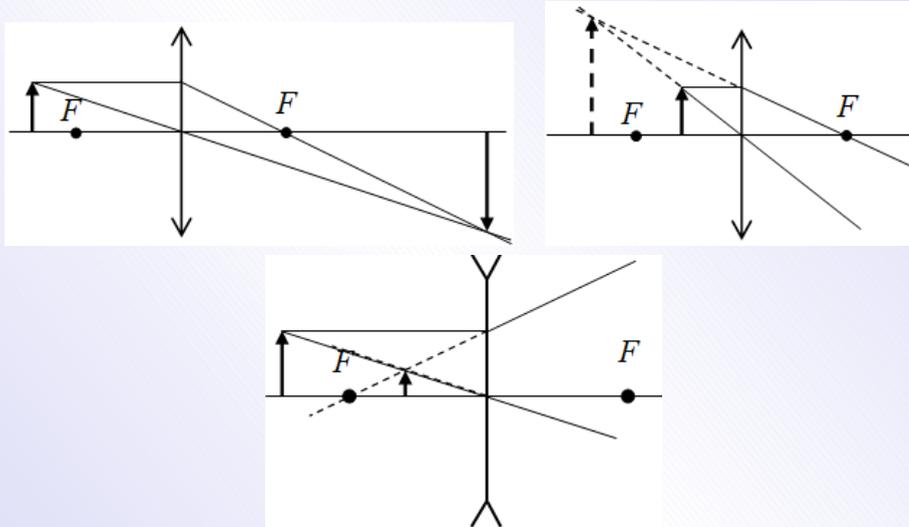
Страница 275 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Видно, что рассеивающая линза **всегда** дает только мнимое изображение (b всегда < 0). Можно показать, что оно всегда будет уменьшенное и прямое. Основную задачу оплотехники можно решать и графическим способом. При этом используются особые точки линзы – фокус (через эту точку проходит любой луч, идущий параллельно главной оптической оси, либо продолжение луча), и оптический центр линзы – через него проходит луч, не меняя своего направления.



У линзы существует еще одна интересная точка – двойной фокус. Это точка, которая лежит на главной оптической оси на расстоянии $2f$ от линзы. Можно легко убедиться, что если $|a| = 2f$, то $b = 2f$, а увеличение изображения $N = \frac{b}{a} = 1$.

Для собирающей линзы для случая, когда формируется действительное изображение, формулу (34.2) можно записать:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (34.6)$$



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 276 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Из нее, измерив на оптической скамье a и b , можно рассчитать f . Но реальные линзы не совсем тонкие, для них вершины сферических поверхностей не совпадают с оптическим центром линзы. А отсчет расстояний нужно вести именно от оптического центра. Для того, чтобы избежать этой трудности, можно вывести формулу для расчета f , в которой бы присутствовали перемещения линзы, которые можно измерять по перемещению любой точки на линзе.

Зафиксируем расстояние d предмет – экран (которое фактически равно $a + b$), получив на нем увеличенное изображение предмета (нить лампы). Затем, переместив линзу на расстояние l , получим на экране четкое уменьшенное изображение предмета. Величину f можно рассчитать по формуле

$$f = \frac{d^2 - l^2}{4d} \quad (34.7)$$

(формулу (34.7) нужно вывести).

Измерения и вычисления

1. Измерение фокусного расстояния собирающей линзы.

- Для устранения отрицательного влияния aberrаций вставить в выемку кожуха лампы красный светофильтр, а на линзу наложить диафрагму с круглым отверстием в центре.
- Установить линзу примерно на расстоянии 30 см от лампочки (предмет – это лампа). Записать это положение a_1 . Перемещая экран, получить на нем четкое увеличенное изображение нити. Сделать отсчет d расстояния предмет – экран. Повторить это пять раз, найти среднее.
- Не меняя положения экрана, только перемещением линзы найти ее новое положение a_2 , когда на экране получается четкое уменьшенное изображение нити. Прodelать это пять раз, каждый раз записывая a_2 . Найти среднее.
- Найдя $l = a_2 - a_1$, по формуле (34.7) вычислить f .



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 277 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

2. Измерение зависимости b от a , а также зависимости увеличения N от a .

- а) Установить начальное значение a примерно 27 см.
- б) Изменяя дискретно расстояние a (увеличивая его каждый раз на 2 см), находим положение экрана с четким изображением нити. Записываем каждый раз положение экрана d_i и размер изображения нити. Измерения проводить вплоть до значения $a = 80$ см.
- в) Построить график зависимости $b = d_i - a_i$ от a .
- г) Построить график зависимости увеличения $N = \frac{y'}{y}$ от a , где y' – размер изображения нити, y – ее истинный размер, равный 1,6 см.
- д) Провести анализ полученных графиков. Предложить способ оценки f из этих графиков.

Контрольные вопросы

1. Формула тонкой линзы, ее параметры, особые точки.
2. Оптическая сила тонкой линзы, в чем измеряется.
3. Человеческий глаз как оптическая система.
4. В чем заключается близорукость и дальнозоркость?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 278 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Лабораторная работа № 16

Измерение длины световой волны с помощью колец Ньютона

Цель работы: изучить один из способов наблюдения интерференционных полос равной толщины и измерить длину волны для зеленого и синего светофильтров и величину деформации линзы и пластинки.

Приборы и принадлежности: Измерительный микроскоп, плосковыпуклая линза с плоской пластинкой, светофильтр.

Описание установки и краткая теория

Классическим примером интерференционной картины являются кольца Ньютона. Изучение интерференционной картины в виде колец Ньютона является наиболее простым методом исследования этого явления и определения длины волны света. Этот метод может быть использован для измерения углов тонких стеклянных клиньев и радиуса кривизны линз, определения профилей несферических поверхностей, а также величины деформации изделий из любого прозрачного материала.

Кольца Ньютона наблюдаются в случае, когда выпуклая поверхность линзы малой кривизны соприкасается с плоской поверхностью хорошо отполированной пластины (рис. 16.1), при этом остающаяся между ними воздушная прослойка постепенно утолщается от центра к краям. Кольца Ньютона можно наблюдать как в отраженном (рис. 16.1, а), так и в проходящем (рис. 16.1, б) свете. Пусть наблюдение ведется со стороны линзы. С этой же стороны на линзу падает пучок монохроматического света (см. рис. 16.1, а). Тогда световые волны, отраженные от верхней и нижней границ воздушной прослойки, будут интерферировать между собой.

В результате получится следующая картина: в центре расположено темное пятно, окруженное рядом концентрических светлых и темных колец убывающей ширины. При малых размерах интерференционной картины (порядка нескольких миллиметров) наблюдение ведется через микроскоп



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 279 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

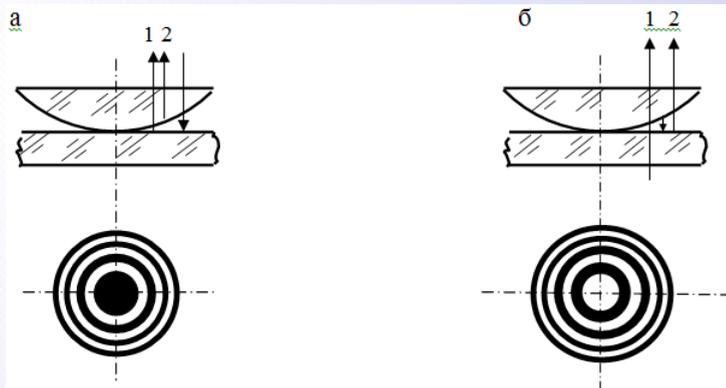


Рисунок 35.1

(в целях наглядности на рисунке отраженные от воздушного клина лучи несколько смещены в сторону от падающего луча).

Если световой пучок падает со стороны пластины, а наблюдение по-прежнему ведется со стороны линзы (см. [рис. 16.1, б](#)), то в интерференционной картине пятно в центре будет светлым, все светлые кольца заменятся темными, а темные – светлыми. Сама интерференционная картина станет менее контрастной по сравнению с картиной, наблюдаемой в отраженном свете.

Рассмотрим подробнее образование колец Ньютона в отраженном свете. Обычно приходится прижимать линзу к пластинке, что вызывает деформацию их в месте соприкосновения. Определим диаметр темных колец. Пусть R – радиус кривизны линзы ([рис. 16.2](#)), r_m – радиус m -го темного кольца, δ_m – толщина воздушного клина, Δx – деформация. Предположим, что деформируются лишь небольшие участки линзы и пластинки вблизи центра интерференционной картины, в остальной области поверхность линзы остается сферической, а поверхность пластинки – плоской. Это подтверждается тем, что интерференционные полосы имеют вид концентрических окружностей с центром в месте соприкосновения линзы с пластинкой. Если это не



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 280 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

так, то деформация симметризуется с помощью трех винтов, регулирующих степень прижатия линзы и пластинки.

Оптическая разность хода в месте наблюдения m -го темного кольца удовлетворяет условию

$$2\delta_m + \lambda/2 = (2m + 1)\lambda/2. \quad (35.1)$$

Здесь слагаемое $\lambda/2$ обусловлено изменением фазы колебаний электрического вектора световой волны на π при отражении от границы воздух – стекло.

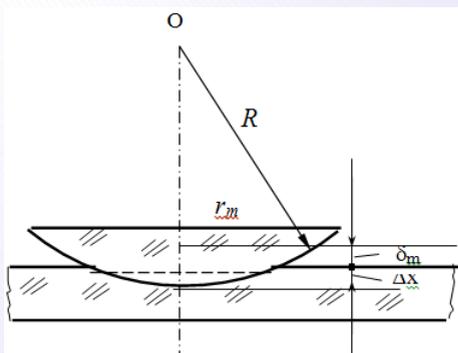


Рисунок 35.2

Из **рис. 16.2** следует, что

$$r_m^2 + [R - (\delta_m + \Delta x)]^2 = R^2. \quad (35.2)$$

Отсюда, если пренебречь слагаемым второго порядка малости, найдем

$$r_m^2 = 2R(\delta_m + \Delta x). \quad (35.3)$$

Тогда с учетом (1) квадрат диаметра m -го темного кольца

$$d_m^2 = 4R\lambda m + 8R\Delta x. \quad (35.4)$$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 281 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Если построить график $d_m^2 = f(m)$, откладывая по оси абсцисс номера m темных колец, а по оси ординат – квадраты их диаметров d_m^2 , то в соответствии с формулой (35.4) должна получиться прямая линия, продолжение которой отсечет на оси ординат отрезок

$$d_0^2 = 8R\Delta x. \quad (35.5)$$

Отсюда по найденной с помощью графика величине d_0^2 и известному радиусу кривизны линзы R определяется деформация

$$\Delta x = \frac{d_0^2}{8R}. \quad (35.6)$$

По наклону прямой рассчитывается длина волны света

$$\lambda = \frac{\Delta d_m^2}{4R\Delta m}, \quad (35.7)$$

где Δm – разность двух любых значений m , Δd_m^2 – разность соответствующих этим значениям m ординат.

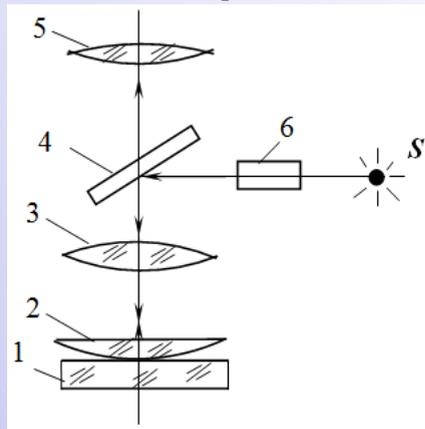


Рисунок 35.3

Экспериментальная установка состоит из микроскопа, оптическая схема которого приведена на рис. 16.3. На предметном столике микроскопа укреплена толстая стеклянная пластинка 1 с прижатой к ней линзе 2. Источником света S служит лампа, отдельные компоненты излучения которой выделяются светофильтром 6 и направляются на наклонную стеклянную пластинку 4. Отражившись от пластинки, свет через объектив 3 падает на линзу 2. Интерференционная картина наблюдается в поле зрения окулярного микрометра 5, при помощи которого измеряются диаметры интерференционных колец.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 282 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Измерения и вычисления

1. Фокусируя микроскоп, добиться четкой видимости периферийных колец интерференционной картины
2. Измерить диаметры нескольких (не менее 5) темных колец при освещении зеленым светом. Отсчеты удобно производить, начиная с наименьшего кольца, отмечая сначала координаты левых концов диаметров, а затем правых.
3. Результаты измерений свести в таблицу:

номер кольца m	координаты концов диаметров колец, в делениях микро- метрического винта		диаметр кольца		$d^2,$ м^2	длина волны $\lambda,$ м
	$n_{\text{лев}}$	$n_{\text{прав}}$	$\Delta n = n_{\text{прав}} - n_{\text{лев}},$ дел.микро.винта	$d = \Delta n \cdot 2 \cdot 10^{-6},$ м		
1						
2						
3						
4						
5						

4. Такие же измерения произвести с синим светофильтром, результаты свести в таблицу.
5. Построить графики $d_m^2 = f(m)$ для зеленого и синего света на одной и той же координатной сетке.
6. Используя графики и формулы (35.6) и (35.7), определить деформацию Δx и длину волны λ для зеленого и синего света (радиус кривизны линзы указан на обратной стороне металлической оправы).



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 283 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление интерференции света?
2. Какие волны называют когерентными?
3. Какой свет называют монохроматическим?
4. Приведите примеры интерференции света в природе.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 284 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лабораторная работа № 17

Определение показателя преломления стекла микроскопом

Цель работы: освоить один из методов определения показателя преломления стекла.

Приборы и принадлежности: Измерительный микроскоп с микрометрическим винтом, микрометр, измеряемые пластинки со штрихами на обеих поверхностях, осветитель.

Описание установки и краткая теория

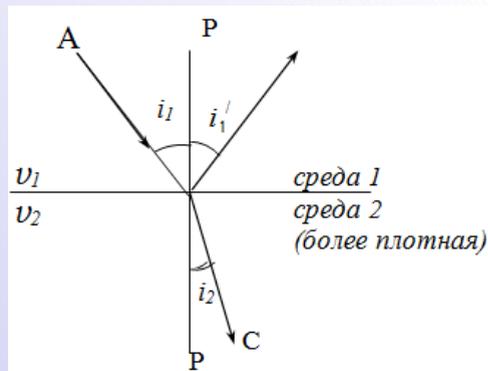


Рисунок 36.1

При прохождении света через плоскую границу раздела двух прозрачных веществ неодинаковой оптической плотности падающий луч света АО разделяется на два луча – отраженный луч ОВ и преломленный ОС (рис. 17.1). Направления этих лучей определяются следующими законами отражения и преломления света:

1. Падающий луч i_1 , отраженный луч i_2 перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Угол падения равен углу отражения.
2. Падающий луч i_1 , преломленный луч i_2 и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Синус угла падения i_1 относится к синусу угла преломления i_2 как скорость света в первой среде ν_1 относится к скорости света во второй среде ν_2 :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{\nu_1}{\nu_2}$$



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание

⏪ ⏩

Страница 285 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Последний закон говорит о том, что свет распространяется в различных средах с различной скоростью.

Для двух данных сред и для луча данной длины волны отношение скорости света в среде 1 к скорости света в среде 2 или отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная, называемая *относительным показателем (коэффициентом) преломления второй среды относительно первой*.

$$\frac{\nu_1}{\nu_2} = \text{const} = n_{21}$$

$$n_{21} = \frac{\sin i_1}{\sin i_2}$$

Если одна из сред, например, 1, – вакуум или воздух, то показатель преломления данной среды 2 по отношению к вакууму называется *абсолютным показателем (коэффициентом) преломления*.

Абсолютный показатель преломления среды 2 (рис. 17.1)

$$n_2 = \frac{c}{\nu_2}, n_2 = \frac{\sin i_1}{\sin i_2}$$

где c – скорость света в вакууме ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с), ν_2 – скорость света в данной среде 2, т. е. показатель преломления среды есть отношение скорости света в вакууме к скорости света в данной среде:

$$n = \frac{c}{\nu}$$

Показатель преломления зависит от длины волны света и от свойств среды. Абсолютные показатели преломления больше единицы. Это означает, что скорость распространения света в данной среде всегда меньше, чем в вакууме.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 286 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Относительный показатель преломления двух сред n_{21} связан с абсолютными показателями преломления сред n_1 и n_2 следующими соотношениями

$$n_{21} = \frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{cn_2}{cn_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

В основе нашего метода лежит явление кажущегося уменьшения толщины стеклянной пластинки вследствие преломления световых лучей, проходящих в стекле при рассматривании пластинки нормально к ее поверхности. Схема прохождения лучей через стеклянную пластинку дана на **рис. 17.2**.

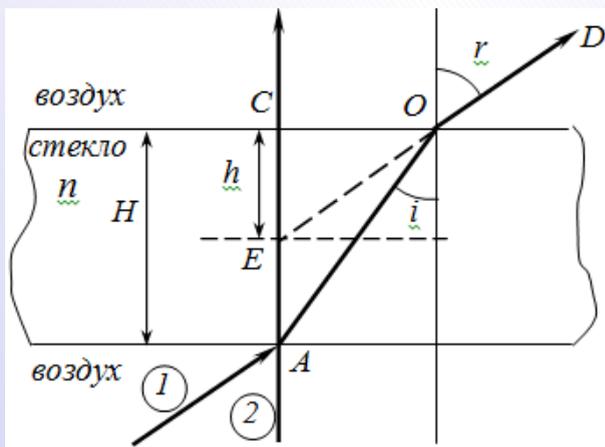


Рисунок 36.2

AC не в точке A , а в точке E , т. е. толщина пластинки будет казаться равной CE .

Из **рисунка 17.2** видно, что кажущаяся толщина пластинки $CE = h$ меньше истинной, т. е. толщина $CA = H$.

Для лучей, близких к нормали, углы падения и преломления малы. В этом случае синусы можно заменить тангенсами, тогда

$$n_{\text{стекла}} = \frac{\sin r}{\sin i} = \frac{\text{tg } r}{\text{tg } i}$$

В точку A , находящуюся на нижней поверхности стекла, падают два луча света 1 и 2. Луч 2 падает на пластинку нормально и поэтому проходит сквозь пластинку и выходит в точке C , не испытывая преломления. Луч 1 преломляется и выходит из пластинки в точке O по направлению к точке D . При выходе из пластинки луч OD образует угол преломления r больший, чем угол падения i . Если смотреть из точки D по направлению DO , то наблюдатель будет видеть точку пересечения лучей OD и



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 287 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

При рассмотрении рисунка и после соответствующих преобразований имеем:

$$n_{\text{стекла}} = \frac{CO \cdot H}{h \cdot CO}, \text{ или } n = \frac{H}{h}$$

Следовательно, показатель преломления стекла можно найти из отношения истинной толщины стеклянной пластинки к кажущейся. Истинная толщина пластинки измеряется микрометром, кажущаяся – микроскопом.

Измерения и вычисления

Измерить микрометром истинную толщину пластинки H в том месте, где нанесены штрихи, и записать ее значение в миллиметрах.

Определить кажущуюся толщину пластинки h . Для этого:

- вращать рукоятку микрометрического винта от себя до упора. При этом тубус микроскопа опускается, а микрометрический винт установится на нулевое деление.
- с помощью рукоятки перемещения тубуса (находится ниже микрометрического винта) добиться четкого изображения видимого в микроскоп штриха, нанесенного на нижнюю поверхность стеклянной пластинки.
- вращением микрометрического винта навести на резкое изображение штриха, нанесенного на верхнюю поверхность пластинки. Если теперь опускать тубус микроскопа, вращая микрометрический винт до упора, то мы опять увидим четкое изображение штриха на нижней поверхности стеклянной пластинки. При этом необходимо отсчитать число m делений в неполном обороте барабана (при вращении от начального положения до нуля) и число полных оборотов до упора N .

Очевидно

$$h = (NZ + 0,002m) \text{ мм,}$$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 288 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

где N – число полных оборотов барабана винта; $Z = 0,002 \cdot 50$ – шаг винта; 50 – число делений в одном полном обороте винта; 0,002 – цена одного деления барабана винта; m – число делений в неполном обороте барабана.

Как видно, за один полный оборот барабана микрометрического винта тубус микроскопа перемещается на $Z = 0,1$ мм.

Вычислить показатель преломления стекла по формуле

$$n = \frac{H}{h}$$

Измерения истинной и кажущейся толщины пластинки произвести 5 раз. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу

№ п/п	H , мм	Отсчет микро- метрич. винта		$h = (NZ + 0,002m)$, мм	Показатель преломления n	$\langle n \rangle$	$\langle n \rangle \approx S$	$n_{\text{ист}} = \langle n \rangle \pm \Delta n$
		N	m					
1								
2								
3								
4								
5								

Контрольные вопросы

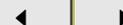
1. Сформулировать законы отражения и преломления света.
2. Что такое абсолютный и относительный показатель преломления?
3. Микроскоп, его значение для биологии. Ход лучей в микроскопе.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 289 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

Лабораторная работа № 18

Проверка законов геометрической оптики с помощью диоптриметра

Цель работы: измерить оптическую силу линз и проверить формулы сложения оптических сил для тонких линз.

Приборы и принадлежности: диоптриметр, набор тонких очковых линз, описание диоптриметра.

Описание установки и краткая теория

Можно показать, что сферическая граница раздела двух сред в пределах параксиальной оптики (когда в формировании изображений принимают участие только лучи, идущие под малыми углами к главной оптической оси) дает стигматическое изображение точек – точка изображается в виде точки. При этом справедлива формула

$$\frac{n_1}{a_1} - \frac{n_2}{a_2} = \frac{n_1 - n_2}{R}, \quad (37.1)$$

где n_1, n_2 – показатели преломления сред слева и справа от границы раздела, a_1, a_2 – расстояние предмет–граница и граница–изображение, R – радиус кривизны границы раздела.

Величину $\frac{n_1 - n_2}{R} = \Phi$ называют *оптической силой* сферической границы раздела, а $f_1 = \frac{n_1 R}{n_2 - n_1} = -\frac{n_1}{\Phi}$ и $f_2 = \frac{n_2 R}{n_1 - n_2} = \frac{n_2}{\Phi}$ называют *передним и задним фокусными расстояниями*.

Большинство реальных преломляющих систем содержат, по крайней мере, две преломляющие поверхности (линза) или большее их число.

Система сферических поверхностей называется *центрированной*, если центры всех поверхностей лежат на одной прямой, которая называется *главной оптической осью*.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 290 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Линза называется *тонкой*, если обе ее вершины можно считать совпадающими, то есть если толщина линзы мала по сравнению с радиусами кривизны ограничивающих поверхностей. Для тонкой линзы можно получить формулу

$$\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (37.2)$$

где a_1 , a_2 – расстояние предмет–линза и линза–изображение, n – относительный показатель преломления вещества линзы, R_1 и R_2 – радиусы кривизны сферических границ разделов.

Формула (37.2) справедлива для линз выпуклых (когда центральная часть толще периферийной) и вогнутых (на краях линза толще, чем в центре).

Величина $(n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \Phi$ есть оптическая сила линзы, $\frac{1}{\Phi} = f$ – фокусное расстояние. Если по обе стороны от линзы лежит одинаковая среда, то величины обоих фокусных расстояний равны.

Оптическая сила Φ измеряется в диоптриях (дп). **1 диоптрия** – это оптическая сила такой линзы, фокусное расстояние которой в воздухе равно 1 м.

Величины a_1 , a_2 , R_1 , f_1 и f_2 являются алгебраическими величинами, т. е. характеризуются еще и знаками. Начало отсчета всех отрезков лежит в вершине линзы. Если направление отрезка совпадает с направлением лучей света, то отрезок считается положительным. Если направление противоположно ходу лучей – отрезок отрицательный.

Для выпуклых линз (собирающих) $f > 0$, следовательно, оптическая сила тоже положительна. Для вогнутых (рассеивающих) линз $f < 0$, фокус является мнимым, оптическая сила отрицательная.

Для двух тонких линз с оптическими силами Φ_1 и Φ_2 , образующих центрированную систему и расположенных в воздухе на расстоянии d друг от друга, справедлива формула

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2 \quad (37.3)$$



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 291 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Если $d \rightarrow 0$, то

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (37.4)$$

Пользуясь формулами (37.3) и (37.4), нужно учитывать знаки Φ_1 и Φ_2 .

Измерения и вычисления

1. По техническому описанию диоптриметра изучить устройство, принцип действия диоптриметра, методику измерения оптической силы линзы.
2. Провести измерение оптической силы для каждой из двух линз.
3. Измерить оптическую силу системы, состоящей из двух ранее измеренных линз.
4. Рассчитать оптическую силу системы, сравнить с измеренным значением.
5. Рассчитать доверительный интервал Δ для $\Phi_{\text{изм}}$ и $\Phi_{\text{расч}}$.
6. Результаты оформить в виде таблицы.

№ изм.	Φ_1 , дп	Φ_2 , дп	$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi$ измеренное	$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi$ расчетное	$\Delta\Phi_{\text{изм}}$	$\Delta\Phi_{\text{расч}}$
1						
2						
3						
4						
5						
средн.						

Контрольные вопросы

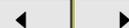
1. Область применения линз и их систем.
2. Тонкая линза, ее основные параметры. Формула линзы, область ее применения.
3. Основные виды линз, их отличия.
4. Оптическая сила системы двух линз в воздухе.
5. В чем заключаются явления близорукости и дальнозоркости?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 292 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Лабораторная работа № 19

Измерение длины волны света методом дифракции на бесконечно узкой щели

Цель работы: измеряя параметры дифракционной картины от плоской квази-монохроматической световой волны на бесконечно узкой щели, рассчитать длину волны λ .

Приборы и принадлежности: установка для измерений, содержащая источник плоской квазимонохроматической волны, набор щелей разной ширины, матовый экран, линейка.

Описание установки и краткая теория

Установка состоит из полупроводникового лазера 1, излучающего квазимонохроматический свет (мощность пучка ~ 1 мВт), блока питания лазера, диска с шестью отверстиями, в которых смонтированы пять щелей разной ширины и поляроидный ослабитель светового пучка, матового экрана, работающего на просвет.

Параметры щелей, их ширина b приведены в [таблице 1](#).

Таблица 1

№№ щелей	1	2	3	4	5	6
b , мкм	44	34	66	79	37	фильтр

Расстояние a от щелей до экрана равно $a = 305$ мм.

Ширина главного максимума на матовом стекле измеряется линейкой с миллиметровыми делениями.

Бесконечно узкой называется такая щель, у которой ее ширина намного меньше длины. В нашем случае ширина щелей имеет величину порядка 10^{-2} мм, а ее высота составляет ~ 10 мм.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 293 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

Если на такую щель падает узкий параллельный пучок света (плоская волна), то на достаточно большом расстоянии от нее (в дальней зоне) наблюдается дифракция Фраунгофера. Характерные особенности дифракционной картины: в центре всегда находится максимум, на формирование которого расходуется основная доля световой энергии; дополнительные максимумы слабые; дифрагированные лучи всегда расположены в плоскости, перпендикулярной щели.

Соотношение интенсивностей нулевого максимума и дополнительных максимумов 1-го, 2-го и т. д. порядков как $I_0 : I_1 : I_2 : \dots = 1 : 0,045 : 0,016 : \dots$

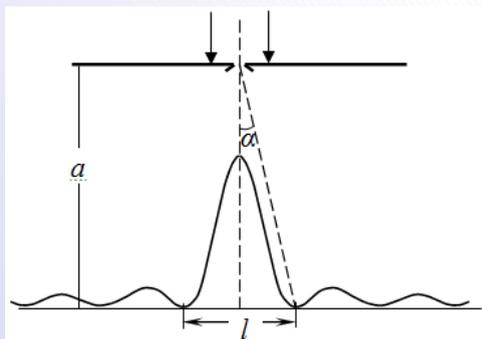


Рисунок 38.1

Распределение интенсивности в дифракционной картине схематически показана на **рис. 19.1**. Ширина главного максимума l определяется положением первых минимумов, направления на которые определяются из условия:

$$b \sin \alpha = \lambda \quad (38.1)$$

Углы дифракции α обычно очень малые, поэтому (**38.1**) можно переписать в виде:

$$b \cdot \alpha = \lambda \quad (38.2)$$

Угол α можно рассчитать, измерив l и a

$$\alpha = \frac{l}{2a} \quad (38.3)$$

откуда

$$\lambda = b \frac{l}{2a} \quad (38.4)$$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 294 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

Измерения и вычисления

1. Вращая диск, подвести под лазерный пучок первую щель, измерить линейкой ширину главного максимума l (как расстояние между первыми минимумами).
2. Повторить п. 1 для всех остальных щелей.
3. Рассчитать по формуле (38.4) значения λ для каждого измерения. Значения b брать из **таблицы 1**, $a = 305$ мм.
4. Рассчитать среднее значение λ и величину погрешности.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление дифракции?
2. Приведите примеры дифракции в природе?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 295 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

1. Виды механического движения. Путь, перемещение.
2. Скорость и ускорение.
3. Линейная и угловая скорость.
4. Законы Ньютона. Масса и сила.
5. Импульс. Закон сохранения импульса.
6. Сила упругости. Сила трения.
7. Сила тяготения. Вес. Сила тяжести. Невесомость.
8. Силы инерции.
9. Работа и мощность.
10. Энергия. Потенциальная и кинетическая энергия.
11. Закон сохранения энергии.
12. Гармонические колебания и их характеристики.
13. Образование волн. Звук.
14. Основные положения МКТ.
15. Параметры состояния.
16. Понятие идеального газа. Изопроцессы.
17. Уравнение состояния идеального газа.
18. Основное уравнение МКТ. Физический смысл температуры.
19. Барометрическая формула.
20. Средняя длина свободного пробега. Эффективный диаметр молекул.
21. Явления переноса.
22. Внутренняя энергия термодинамической системы. Теплота, теплоемкость.
23. Первый закон термодинамики.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 296 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

24. Работа газа при постоянном давлении. Уравнение Майера.
25. Адиабатический процесс. Обратимые и необратимые процессы.
26. Цикл Карно. Второй закон термодинамики.
27. Понятие энтропии.
28. Электризация. Электрический заряд.
29. Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона.
30. Электрическое поле и его напряженность.
31. Работа перемещения заряда в электрическом поле. Потенциал.
32. Емкость. Конденсаторы. Электростатическая защита.
33. Сила тока. ЭДС. Напряжение.
34. Ток в металлах.
35. Ток в жидкостях. Ток в газах.
36. Магнитное поле и его характеристики.
37. Закон Био-Савара-Лапласа. Закон Ампера.
38. Движение заряженных частиц в магнитном поле.
39. Магнитные свойства вещества. Природа магнетизма.
40. Явление электромагнитной индукции.
41. Взаимная индукция и самоиндукция.
42. Переменный ток.
43. Понятие об электромагнитном поле. Электромагнитные волны.
44. О природе света.
45. Отражение и преломление света.
46. Тонкие линзы.
47. Интерференция световых волн. Дифракция света.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 297 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

48. Поляризация света. Явление дисперсии.
49. Поглощение и рассеяние света.
50. Представление о свойствах пространства и времени в классической механике.
51. Постулаты СТО. Преобразования Лоренца.
52. Элементы релятивистской динамики.
53. Фотон. Корпускулярно-волновой дуализм.
54. Постулаты Бора. Спектры атомов. Рентгеновское излучение.
55. Гипотеза де Бройля. Волновая функция.
56. Строение атомного ядра. Радиоактивность. Ядерные и термоядерные реакции.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 298 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

ОСНОВНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ДАННОМ КУРСЕ ФИЗИКИ

В данном курсе физики используются некоторые математические символы и понятия.

1. Знаки малости, неравенства и приближенного равенства

Для обозначения малых величин (или малых изменений величин) принято ставить перед этими величинами знак Δ (буква греческого алфавита «дельта»). Например, Δm – элементарная масса, Δt – малый промежуток времени и т. д. Кроме того знаком Δ обозначают изменение (приращение) физической величины, то есть разность между конечным и начальным значениями физической величины. Например, $\Delta v = v_2 - v_1$. Помимо общеизвестных знаков неравенства $>$ и $<$ употребляются знаки \neq (не равно), \gg (много больше) и \ll (много меньше). Для обозначения приближенного равенства применяется знак \approx . Например, ускорение свободного падения $g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$.

2. Абсолютное значение физической величины

Абсолютным значением величины называется ее значение, взятое с положительным знаком; условно обозначается посредством заключения величины в прямые скобки. Если, например, заряд тела $q = -10 \text{ Кл}$, то абсолютное значение заряда $|q| = 10 \text{ Кл}$.

3. Символическая запись суммы

Сумму большого числа однородных величин $a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n$ принято записывать сокращенно с помощью буквы греческого алфавита \sum (сигма) следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n a_i.$$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 299 из 319

Назад

На весь экран

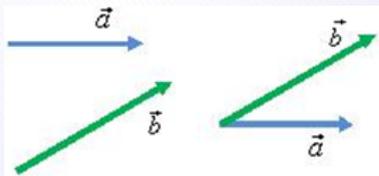
Закрыть

4. Векторные физические величины

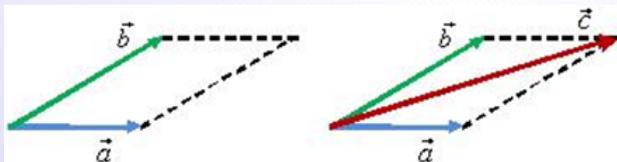
Все физические величины подразделяются на скалярные и векторные. Скалярные физические величины полностью определяются численным значением. К ним, например, относятся: m (масса), S (площадь), V (объем). Векторная физическая величина полностью определяется численным значением и направлением. В отличие от скаляров векторы обозначаются буквами со стрелкой сверху. Например \vec{v} – вектор скорости.

а) Сложение векторов

Сложение векторов производится по правилу параллелограмма. Чтобы сложить два вектора \vec{a} и \vec{b} необходимо путем параллельного переноса совместить их начала



Затем построить параллелограмм, сторонами которого будут эти вектора



Тогда суммой будет вектор \vec{c} , начало которого совпадает с общим началом векторов, а конец – с противоположной вершиной параллелограмма

$$\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}.$$



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



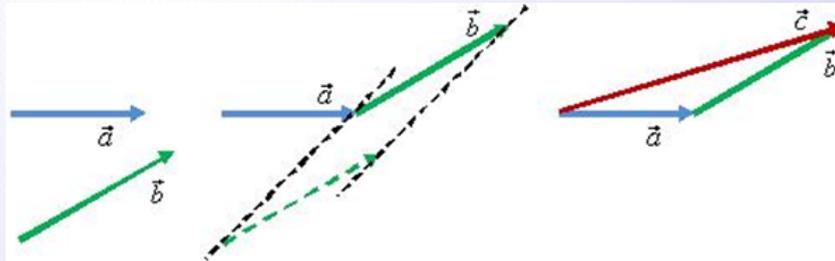
Страница 300 из 319

Назад

На весь экран

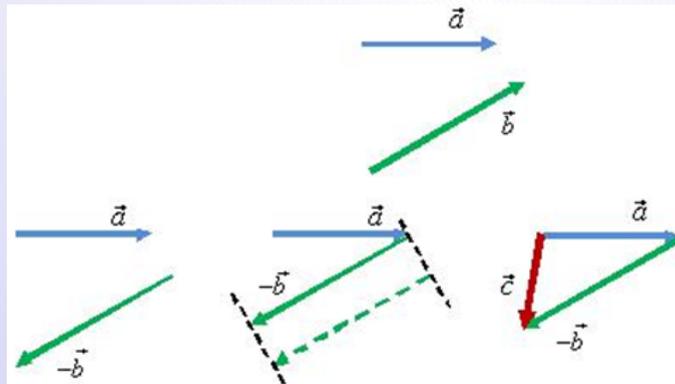
Закрыть

Сложение векторов можно осуществлять и по правилу треугольника. Для того чтобы сложить два вектора \vec{a} и \vec{b} нужно переместить вектор \vec{b} параллельно самому себе так, чтобы его начало совпадало с концом вектора \vec{a} . Тогда их суммой будет вектор \vec{c} , начало которого совпадает с началом вектора \vec{a} , а конец – с концом вектора \vec{b} .



б) Вычитание векторов

Для того чтобы найти разность двух векторов \vec{a} и \vec{b} нужно найти вектор $\vec{c} = \vec{a} + (-\vec{b})$.



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 301 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

в) *Скалярное произведение векторов*

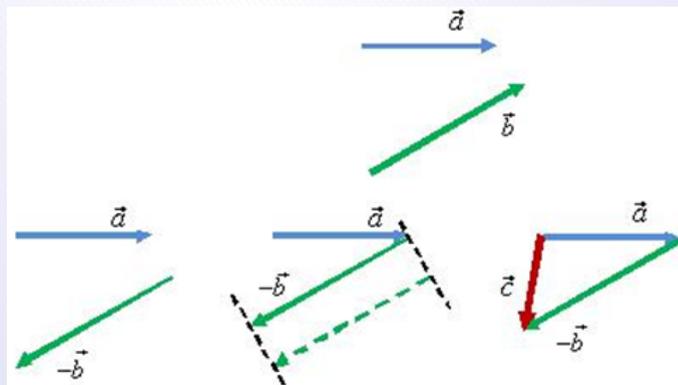
Скалярное произведение векторов есть число

$$(\vec{a}, \vec{b}) = ab \cos \varphi,$$

где φ – угол между \vec{a} и \vec{b} .

г) *Векторное произведение*

Под векторным произведением векторов \vec{a} и \vec{b} понимают вектор \vec{c} , имеющий длину $c = ab \sin \varphi$



(площадь параллелограмма, построенного на \vec{a} и \vec{b} как сторонах) и направленный перпендикулярно к \vec{a} и \vec{b} , причем так, что векторы \vec{a} , \vec{b} и \vec{c} , и образуют правую тройку векторов. Обозначение $\vec{c} = [\vec{a}, \vec{b}]$.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 302 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

5. Понятие производной функции

Функция f называется дифференцируемой в точке x_0 , если существует предел разностного отношения функции f в точке x_0

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \phi(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$$

Этот предел называется производной функции f в точке x_0 и обозначается: $f'(x)$,

$\frac{df}{dx}$. Операция нахождения производной называется дифференцированием.

6. Производные некоторых элементарных функций

- | | |
|---|---|
| 1. $c' = 0, c = const$ | 11. $(ctg x)' = -\frac{1}{\sin^2 x}$ |
| 2. $(x^n)' = nx^{n-1}$ | 12. $(\arcsin x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$ |
| 3. $(a^x)' = a^x \cdot \ln a$ | 13. $(\arccos x)' = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$ |
| 4. $(e^x)' = e^x$ | 14. $(\operatorname{arctg} x)' = \frac{1}{1+x^2}$ |
| 5. $(\log_a x)' = \frac{1}{x \ln a}$ | 15. $(\operatorname{arctg} x)' = -\frac{1}{1+x^2}$ |
| 6. $(\ln x)' = \frac{1}{x}$ | 16. $(\operatorname{sh} x)' = \operatorname{ch} x$ |
| 7. $(\sin x)' = \cos x$ | 17. $(\operatorname{ch} x)' = \operatorname{sh} x$ |
| 8. $(\cos x)' = -\sin x$ | 18. $(\operatorname{th} x)' = \frac{1}{\operatorname{ch}^2 x}$ |
| 9. $(\sqrt{x})' = \frac{1}{2\sqrt{x}}$ | 19. $(\operatorname{th} x)' = -\frac{1}{\operatorname{sh}^2 x}$ |
| 10. $(\operatorname{tg} x)' = \frac{1}{\cos^2 x}$ | |

7. Частная производная

Частная производная – одно из обобщений понятий производной на случай функции нескольких переменных. Частная производная – это предел отношения при-



**Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин**

Начало

Содержание



Страница 303 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

ращения функции по выбранной переменной к приращению этой переменной, при стремлении этого приращения к нулю.

$$\frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_k} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_1, \dots, x_k + \Delta x, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_k, \dots, x_n)}{\Delta x}$$

8. Интеграл

Интеграл – одно из важнейших понятий математического анализа возникает при решении задач о нахождении площади под кривой, пройденного пути при неравномерном движении, массы неоднородного тела, и т. п. Упрощённо интеграл можно представить как аналог суммы для бесконечного числа бесконечно малых слагаемых. В зависимости от пространства, на котором задана подынтегральная функция, интеграл может быть – *неопределённым, определённым, двойным, тройным, криволинейным, поверхностным* и т. д.

Неопределённым интегралом функции $f(x)$, или её первообразной называется такая функция $F(x)$, производная которой равна $f(x)$, то есть $F'(x) = f(x)$. Обозначается это так: $F(x) = \int f(x)dx$. Первообразная существует не для каждой функции. Операция нахождения первообразной называется интегрированием. Операции дифференцирования и интегрирования обратны друг другу.

9. Скалярное и векторное поле

Если каждой точке M пространства ставится в соответствие скалярная величина U , то существует *скалярное поле* $U(M)$ (например, поле температуры неравномерно нагретого тела, поле электростатического потенциала и т. п.). Если M имеет декартовы координаты (x, y, z) то пишут $U = U(x, y, z)$.

Если каждой точке M пространства ставится в соответствие векторная величина \vec{A} , то существует *векторное поле* $\vec{A}(M)$ (например, гравитационное поле Земли, поле электрической напряжённости, поле магнитной напряжённости и т. п.).



Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин

Начало

Содержание



Страница 304 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

10. Градиент

Градиент (от лат. *gradiens*, «шагающий, растущий») – вектор своим направлением указывающий направление наибольшего возрастания некоторой величины, значение которой меняется от одной точки пространства к другой (скалярного поля) по величине (модулю) равный скорости роста этой величины в этом направлении. Представьте себе комнату, в которой температура задана с помощью скалярного поля T таким образом, что в каждой точке, заданной координатами (x, y, z) температура равняется $T(x, y, z)$. (Предположим, что температура не изменяется с течением времени.) В каждой точке комнаты градиент функции T будет показывать направление, в котором температура возрастает быстрее всего. Величина градиента определяет насколько быстро температура возрастает в данном направлении. Градиент некоего поля U определяется соотношением:

$$\text{grad } U = \frac{dU}{dx} \vec{i} + \frac{dU}{dy} \vec{j} + \frac{dU}{dz} \vec{k}$$

11. Греческий алфавит

Α	α	альфа	Ν	ν	ню
Β	β	бета	Ξ	ξ	кси
Γ	γ	гамма	Ο	ο	омикрон
Δ	δ	дельта	Π	π	пи
Ε	ε	эпсилон	Ρ	ρ	ро
Ζ	ζ	дзета	Σ	σ	сигма
Η	η	эта	Τ	τ	тау
Θ	θ	тета	Υ	υ	ипсилон
Ι	ι	йота	Φ	φ	фи
Κ	κ	кашпа	Χ	χ	хи
Λ	λ	лямбда	Ψ	ψ	пси
Μ	μ	мю	Ω	ω	омега



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 305 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

12. Основные физические постоянные

Гравитационная постоянная	$\gamma = 6,6731 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,31447 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$
Атомная единица массы	$u = 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Планка	$h = 6,62607 \cdot 10^{-34} \text{ Дж/с}$
Элементарный заряд	$e = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Молярный объем идеального газа при нормальных условиях ($P_0 = 10132 \text{ Па}$, $T_0 = 273,15 \text{ К}$)	$V_0 = 22,4138 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$
Число Авогадро	$N_A = 6,02214 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = \frac{R}{N_A} = 1,38065 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{К}^4}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} = 8,854188 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$
Скорость света в вакууме	$c = 2,99792 \cdot 10^8 \text{ м/с}$



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 306 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАНИКИ

1. Почему человек перед прыжком приседает?
2. При выходе из воды животные встряхиваются. Какой закон физики при этом используется?
3. Почему при полете крыло бабочки движется медленнее, чем у пчелы?
4. Почему мелкие животные более подвижны, чем крупные?
5. Почему насекомые, падая на землю с большой высоты, остаются невредимыми, а крупные животные гибнут?
6. Как рыбы используют третий закон Ньютона?
7. Приведите пример животных использующих реактивное движение?
8. Для чего рыбы при быстром движении прижимают к себе плавники?
9. Зачем плавательные перепонки утке?
10. Почему вытянутой рукой тяжелее удерживать такой же груз, чем согнутой?
11. Почему при ходьбе люди размахивают руками?
12. Почему черепахи, опрокинутые на спину, не могут перевернуться?
13. Когда у лиственного дерева положение центра тяжести выше: летом или осенью?
14. Какое давление может создать оса, вонзая жало?
15. Каким образом врачи измеряют кровяное давление?
16. Рассчитайте силу давления атмосферы на человека поверхность тела которого равна 2 м^2 ?
17. Как работает дыхательный аппарат человека?
18. Какую роль для рыбы играет плавательный пузырь?
19. Что является источником звука у человека?
20. Почему летучие мыши даже в полной темноте не налетают на препятствия?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 307 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

1. Объясните явление Броуновского движения.
2. Почему аромат цветов чувствуется на расстоянии?
3. Рассчитайте удельную теплоемкость человеческого тела.
4. Почему в холодных помещениях зябнут, прежде всего, ноги?
5. Почему даже в тихую погоду листва немного дрожит?
6. Почему мелкие организмы нуждаются в более совершенной защите от потери тепла?
7. Что приносит вред растениям: обильный снег или бесснежная зима?
8. Почему в сильный мороз птицы замерзают на лету?
9. Почему глаза не ощущают холода?
10. Почему у пустынных растений вместо листьев колючки и шипы?
11. Почему в сильные морозы деревья трещат?
12. Почему в сильную жару собака высовывает язык?
13. Почему если человеку холодно он начинает дрожать?
14. Почему в холодную погоду собаки спят, свернувшись в клубок?
15. Почему роса на листьях растений собирается в капли?
16. Почему перед дождем ласточки летают низко?

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

1. Почему при поглаживании в темноте кошки возникают небольшие искры?
2. Оцените электроемкость человека.
3. Какова величина биопотенциалов в организме человека?
4. Почему сердце во время работы создает электрическое поле?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 308 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

5. Каких представителей рыб называют живыми электростанциями?
6. От чего зависит биологическое действие тока и какой величины сила тока может вызвать смертельный исход?
7. Какие изменения вызывает ток в теле человека?
8. Почему из всех деревьев чаще всего молнией поражается дуб?
9. Почему птицы безнаказанно сидят на высоковольтных проводах?
10. Какие органы человека создают магнитное поле?
11. Чем объясняется действие магнитного поля на организм человека?
12. Почему в сырых помещениях возрастает возможность поражения человека электрическим током?

ОПТИКА

1. Почему у кошки в темноте светятся глаза?
2. Почему если смотреть с берега на плавающую рыбу можно ошибиться в ее названии?
3. Почему растения не следует поливать в то время, когда на них падают солнечные лучи?
4. Объясните принцип работы человеческого глаза с точки зрения оптики.
5. Объясните причину близорукости и дальнозоркости.
6. Почему близорукие люди щурят глаза?
7. Почему ночью зрачки расширяются, а днем суживаются?
8. Почему зрачок нашего глаза кажется черным?
9. Каким образом достигается аккомодация глаза у рыб?
10. Почему у кошек зрачки расположены вертикально, а лошадей горизонтально?
11. Как устроен глаз насекомых?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 309 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

12. Почему кошки видят в темноте?
13. Почему орел видит на большом расстоянии?
14. Почему большинство северных животных имеют белую окраску?
15. Чем объяснить зеленый цвет травы?
16. Почему в процессе созревания растения меняют цвет?
17. Каково происхождение радужных оттенков крыльев некоторых насекомых?
18. На каких физических принципах основана рентгеноскопия?
19. Можно ли видеть тепловое излучение?



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 310 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

ГЛОССАРИЙ

1. **Абсолютный показатель преломления** – показывает во сколько раз скорость света в данной среде меньше скорости света в вакууме.
2. **Адиабатический процесс** – процесс, происходящий при отсутствии теплообмена между системой и окружающей средой.
3. **Альфа-распад** – самопроизвольное испускание атомными ядрами α -частиц.
4. **Бета-распад** – самопроизвольное испускание атомными ядрами β -частиц.
5. **Близорукость** – заболевание глаз, для которого характерна фокусировка изображения не на сетчатке, а перед ней.
6. **Биопотенциал** – разность потенциалов между двумя точками живой ткани, отражающая ее биоэлектрическую активность.
7. **Вес** – сила, с которой тело действует на опору (или подвес, или другой вид крепления), препятствующую падению, возникающая в поле сил тяжести.
8. **Внутренняя энергия** – это энергия всех видов движения микрочастиц, составляющих систему, и энергия их взаимодействия между собой.
9. **Газовый разряд** – процесс прохождения электрического тока через газ.
10. **Гармонические колебания** – колебания, при которых физическая величина изменяется с течением времени по гармоническому (синусоидальному, косинусоидальному) закону.
11. **Гипертермия** – перегревание, накопление избыточного тепла в организме человека и животных с повышением температуры тела.
12. **Давление** – физическая величина, численно равная силе, действующей на единицу площади поверхности перпендикулярно этой поверхности.
13. **Дальнозоркость** – это нарушение зрения, при котором изображение окружающих предметов фокусируется за сетчаткой, а не на ее поверхности, как у здорового глаза.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 311 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

14. **Диаманетики** – вещества, намагничивающиеся против направления внешнего магнитного поля. В отсутствие внешнего магнитного поля диаманетики немагнитны.
15. **Дисперсия света** – явление, обусловленное зависимостью абсолютного показателя преломления вещества от частоты (или длины волны).
16. **Дифракция** – в узком, но наиболее употребительном смысле – огибание лучами света границы непрозрачных тел (экранов), проникновение света в область геометрической тени.
17. **Диффузия** – процесс взаимного проникновения молекул или атомов одного вещества между молекулами или атомами другого, приводящий к самопроизвольному выравниванию их концентраций по всему занимаемому объёму.
18. **Диэлектрик** (изолятор) (от греч. dia – через и англ. electric – электрический) – вещество (материал), относительно плохо проводящее электрический ток.
19. **Длина волны** – расстояние между двумя ближайшими друг к другу точками в пространстве, в которых колебания происходят в одинаковой фазе.
20. **Домен** (от франц. domaine – владение; область, сфера) – области однородной среды, отличающиеся магнитными, электрическими или упругими свойствами либо упорядоченностью в расположении или ориентации частиц.
21. **Звук** – физическое явление, представляющее собой распространение в виде упругих волн механических колебаний в твёрдой, жидкой или газообразной среде с частотой от 20 до 20000 Гц.
22. **Изобарный процесс** (др.-греч. ἴσος «равный» + $\beta\acute{\alpha}\rho\omicron\varsigma$ «тяжесть») – термодинамический процесс, происходящий в системе при постоянных давлении и массе газа.
23. **Изотермический процесс** (от др.-греч. ἴσος «равный» и $\theta\acute{\alpha}\rho\mu\eta$ «жар») – термодинамический процесс, происходящий в физической системе при постоянной температуре и массе газа.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 312 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

24. **Изотопы** – это такие вещества, которые имеют одинаковое число протонов в ядре атома, но разное число нейтронов.
25. **Изохорный процесс** (от др.-греч. *ἴσος* «равный» и *ῥῶρος* «место, объем») – термодинамический процесс, который происходит при постоянном объеме и массе газа.
26. **Импульс** (количество движения) – векторная физическая величина, являющаяся мерой механического движения тела. В классической механике импульс тела равен произведению массы этого тела на его скорость.
27. **Индуктивность** (или коэффициент самоиндукции) – коэффициент пропорциональности между электрическим током, текущим в каком-либо замкнутом контуре, и полным магнитным потоком.
28. **Инертность** (от лат. *iners*, род. падеж *inertis* – бездеятельный) – это физическое *свойство* тел, характеризующее их способность сохранять скорость по модулю и по направлению.
29. **Инерция** – это физическое *явление* сохранения скорости тела постоянной, если на него не действуют другие тела или их действие скомпенсировано.
30. **Интерференция** – взаимное увеличение или уменьшение результирующей амплитуды двух или нескольких когерентных волн при их наложении друг на друга.
31. **Инфразвук** (от лат. *infra* – ниже, под) – звуковые волны, имеющие частоту ниже воспринимаемой человеческим ухом.
32. **Испарение** – процесс фазового перехода вещества из жидкого состояния в парообразное или газообразное, происходящий на поверхности вещества.
33. **Кандела** (от лат. *candela* – свеча) – единица силы света Международной системы единиц СИ.
34. **Квант** (от лат. *quantum* – сколько) – неделимая часть какой-либо величины в физике; общее название определённых порций энергии (квант энергии).



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 313 из 319

Назад

На весь экран

Закрыть

35. **Кинетическая энергия** – скалярная функция, являющаяся мерой движения материальных точек, образующих рассматриваемую механическую систему, и зависящая только от масс и модулей скоростей этих точек.
36. **Кипение** – процесс интенсивного парообразования, который происходит в жидкости, как на свободной её поверхности, так и внутри её структуры. При этом в объёме жидкости возникают границы разделения фаз, то есть на стенках сосуда образуются пузырьки, которые содержат воздух и насыщенный пар.
37. **Колебательное движение** – это движение, точно или приблизительно повторяющееся через одинаковые промежутки времени, при котором тело многократно и в разных направлениях проходит положение равновесия.
38. **Конвекция** (от лат. convectio – перенесение) – вид теплообмена (теплопередачи), при котором внутренняя энергия передается струями и потоками.
39. **Конденсатор** – двухполюсник с постоянным или переменным значением ёмкости и малой проводимостью; устройство для накопления заряда и энергии электрического поля.
40. **Конденсация** (от лат. condensatio – уплотнение, сгущение) – переход вещества вследствие его охлаждения или сжатия из газообразного состояния в конденсированное (жидкое или твёрдое).
41. **Лазер** – это устройство, преобразующее энергию накачки (световую, электрическую, тепловую, химическую и др.) в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения.
42. **Линза** (нем. linse, от лат. lens – чечевица) – прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями или сферической поверхностью и плоскостью.
43. **Лупа** (от франц. loupe) – оптическая система, состоящая из линзы или нескольких линз, предназначенная для увеличения и наблюдения мелких предметов.
44. **Магнитная индукция** – векторная величина, являющаяся силовой характеристикой магнитного поля (его действия на заряженные частицы) в данной точке пространства.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 314 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

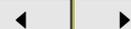
45. **Магнитный момент** – физическая величина, характеризующая магнитные свойства замкнутого контура, обтекаемого электрическим током, или другого, эквивалентного ему физического объекта (напр., атома или др. системы движущихся зарядов).
46. **Магнитный поток** – число линий магнитной индукции, пронизывающих данную площадку.
47. **Масса** (от др.-греч. *μάζα*, кусок теста) – физическая величина, одна из основных характеристик материи, определяющая её инерционные и гравитационные свойства.
48. **Материальная точка** – обладающее массой тело, размерами, формой, вращением и внутренней структурой которого можно пренебречь в условиях исследуемой задачи.
49. **Механическая волна** – это явление распространения возмущений, сопровождающееся передачей энергии колеблющегося тела от одной точки к другой без транспортировки вещества, в некоторой упругой среде.
50. **Механическое движение** – это изменение положения тела или его частей относительно других тел с течением времени.
51. **Микроскоп** (др.-греч. *μικρός*, маленький + *σκοπέω*, смотрю) – прибор, предназначенный для получения увеличенных изображений объектов (или деталей их структуры), невидимых невооружённым глазом.
52. **Мощность** – скалярная физическая величина, равная в общем случае скорости изменения, преобразования, передачи или потребления энергии системы.
53. **Невесомость** – состояние, в котором отсутствует сила взаимодействия тела с опорой или подвесом (вес тела), возникающая в связи с гравитационным притяжением.
54. **Нуклон** – (от лат. *nucleus*, ядро) – общее название для составляющих атомное ядро протонов и нейтронов.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 315 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

55. **Оптическая сила** – величина, характеризующая преломляющую способность осесимметричных линз и центрированных оптических систем из таких линз.
56. **Оптический центр линзы** – точка, сквозь которую световые лучи проходят не преломляясь в линзе.
57. **Парамагнетики** – вещества, которые намагничиваются во внешнем магнитном поле в направлении внешнего магнитного поля.
58. **Перемещение** – вектор, проведенный из начальной в конечную точку движения.
59. **Период колебаний** – наименьший промежуток времени, за который система совершает одно полное колебание.
60. **Плазма** (от греч. *πλάσμα*, вылепленное, оформленное) – ионизированный газ, одно из основных агрегатных состояний вещества.
61. **Поляризация** – наличие у световой волны преимущественного направления колебаний векторов напряженностей электрического и магнитного полей.
62. **Потенциал** – скалярная энергетическая характеристика электростатического поля, характеризующая потенциальную энергию, которой обладает единичный положительный пробный заряд, помещенный в данную точку поля.
63. **Потенциальная энергия** – энергия взаимодействия тел. Потенциальной энергией тело само по себе не может обладать.
64. **Путь** – скалярная физическая величина, равная длине участка траектории материальной точки, пройденного ею за определенное время.
65. **Работа** – скалярная физическая величина, количественная мера действия силы (равнодействующей сил) на тело или сил на систему тел. Зависит от численной величины и направления силы (сил) и от перемещения тела.
66. **Радиоактивность** (от лат. *radius*, луч и *activus*, действенный) – спонтанное изменение состава (заряда Z , массового числа A) или внутреннего строения нестабильных атомных ядер путём испускания элементарных частиц, гамма-квантов и/или ядерных фрагментов.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 316 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

67. **Резонанс** (фр. resonance, от лат. resonare, откликаюсь) – частотно-избирательный отклик колебательной системы на периодическое внешнее воздействие, который проявляется в резком увеличении амплитуды стационарных колебаний.
68. **Рентгеновское излучение** – электромагнитные волны, энергия фотонов которых лежит на шкале электромагнитных волн между ультрафиолетовым излучением и гамма-излучением.
69. **Свет** – в физической оптике электромагнитное излучение, воспринимаемое человеческим глазом.
70. **Сила тока** – это физическая величина, характеризующая электрический ток и численно равная заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за единицу времени.
71. **Система отсчета** – это совокупность неподвижных относительно друг друга тел (тело отсчёта), по отношению к которым рассматривается движение (в связанной с ними системе координат), и отсчитывающих время часов.
72. **Теплоемкость** – количество теплоты, поглощаемой (выделяемой) телом в процессе нагревания (остывания) на 1 градус.
73. **Теплопроводность** – способность материальных тел проводить энергию (теплоту) от более нагретых частей тела к менее нагретым частям тела путём хаотического движения частиц тела.
74. **Термодинамическая система** – макроскопическое тело (тело, состоящее из большого числа частиц) или группа макроскопических тел, которой свойственны процессы, сопровождающиеся переходом теплоты в другие виды энергии и наоборот.
75. **Термоядерная реакция** – разновидность ядерной реакции, при которой лёгкие атомные ядра объединяются в более тяжёлые за счёт кинетической энергии их теплового движения.
76. **Траектория** – это воображаемая линия, вдоль которой движется тело.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 317 из 319

Назад

На весь экран

Заккрыть

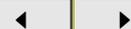
77. **Ультразвук** – звуковые волны, имеющие частоту выше воспринимаемых человеческим ухом, обычно, под ультразвуком понимают частоты выше 20 000 герц.
78. **Ферромагнетики** – вещества (твердые), которые могут обладать спонтанной намагниченностью, т. е. намагничены уже при отсутствии внешнего магнитного поля.
79. **Фотон** (от др.-греч. $\phi\acute{\omega}\varsigma$, род. пад. $\phi\omega\tau\acute{o}\varsigma$, свет) – элементарная частица, квант электромагнитного излучения (в узком смысле – света) в виде поперечных электромагнитных волн и переносчик электромагнитного взаимодействия.
80. **Электризация** – явление, при котором на поверхности и в объёме диэлектриков, проводников и полупроводников возникает и накапливается свободный электрический заряд.
81. **Электрический диполь** – система, состоящая из двух равных, но противоположных по знаку точечных электрических зарядов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга.
82. **Электрический ток** – направленное (упорядоченное) движение частиц или квазичастиц – носителей электрического заряда.
83. **Емкость** – величина, равная отношению заряда переданного проводнику к потенциалу этого проводника.
84. **Энергия** (др.-греч. $\epsilon\nu\acute{\epsilon}\rho\gamma\epsilon\iota\alpha$ – действие, деятельность, сила, мощь) – скалярная физическая величина, являющаяся единой мерой различных форм движения и взаимодействия материи, мерой перехода движения материи из одних форм в другие.
85. **Энтропия** (от греч. entropia – поворот, превращение) – понятие, впервые введенное в термодинамике для определения меры необратимого рассеяния энергии.
86. **Ядерная реакция** – процесс сильного взаимодействия атомного ядра с элементарной частицей или с другим ядром, приводящий к преобразованию ядра.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 318 из 319

Назад

На весь экран

Закреть

ЛИТЕРАТУРА

Основная:

1. Грабовский, Р. И. Курс физики. СПб.: Лань. – 2009.
2. Дмитриева, В. Ф., Прокофьев, В. Л. Основы физики. М.: Высшая школа. – 2001.
3. Сидоренко, А. В., Янукович, Т. П. Физика. Мн.: БГУ. – 2004.
4. Ремизов, А. Н. Медицинская и биологическая физика. М.: Высшая школа. – 2002.

Дополнительная:

1. Трофимова, Т. И. Курс физики. М.: Высшая школа. – 2003.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики. В четырех томах. М.: Кнорус. – 2008.
3. Ливенцев, Н. М. Курс физики М., «Высшая школа». – 1974.
4. Мэрион, Д. Б. Общая физика с биологическими примерами. М., «Высшая школа». – 1986.
5. Мэрион, Д. Б. Физика и физический мир. М., Мир. – 1975.
6. Детлаф, А. А., Яворский Б. М. Курс физики. М.: АСДЕМА. – 2008.
7. Яворский, Б. М., Детлаф, А. А. Справочник по физике. М.: Наука – 1996.



*Кафедра
методики
преподавания
физико-
математических
дисциплин*

Начало

Содержание



Страница 319 из 319

Назад

На весь экран

Закреть