

Департамент образования и науки Курганской области
Государственное бюджетное профессиональное
образовательное учреждение
"Курганский государственный колледж"

08.01.24 Мастер
столярно-
плотничных
паркетных
и стекольных
работ

КУРС ЛЕКЦИЙ
по дисциплине
"Физика"



ФГОС
ТОП-50

УДК 37.853
ББК 22.3
Д 58

Довгий, А. Д. Краткий курс лекций по физике: Учебно-методическое пособие / А. Д. Довгий. – Курган: ГБПОУ Курганский государственный колледж, 2018. – 138 с.

Рекомендовано региональным учебно-методическим объединением по УГС 08.00.00 Техника и технология строительства.

Рецензенты:

Митрофанов А.П., к.т.н., заведующий техническим отделением ГБПОУ «Курганский государственный колледж»

Москвина Т.И., к.п.н., методист центра развития профессионального образования ГАОУ ДПО Институт развития образования и социальных технологий

Белошевская М.А., исполнительный директор КРОО «Союз строителей»

Организация-разработчик:

ГБПОУ «Курганский государственный колледж»

Материал учебной дисциплины Физика представлен в виде краткого курса лекций, который, тем не менее, охватывает широкий круг наиболее важных тем, предусмотренных федеральным государственным стандартом среднего общего образования. Краткий курс лекций адресован студентам, обучающимся по профессии СПО 08.01.24 Мастер столярно-плотничных, паркетных и стекольных работ.

©Довгий Анна Дмитриевна, ГБПОУ КГК

©Курган, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

| | |
|---|---|
| Лекция 1. Физика и естественно-научные методы познания..... | 4 |
|---|---|

Раздел 1. Механика

| | |
|---|----|
| Лекция 2. Относительность механического движения. Характеристика видов движения | 8 |
| Лекция 3. Взаимодействие тел. Законы динамики Ньютона..... | 12 |
| Лекция 4. Силы в природе. Закон Всемирного тяготения..... | 17 |
| Лекция 5. Закон сохранения в механике..... | 23 |
| Лекция 6. Механические колебания и волны..... | 29 |

Раздел 2. Молекулярная физика и термодинамика

| | |
|--|----|
| Лекция 7. Молекулярно кинетическая теория. Агрегатные состояния вещества | 37 |
| Лекция 8. Уравнение состояния идеального газа. Уравнение Менделеева – Клапейрона | 41 |
| Лекция 9. Основы термодинамики..... | 45 |

Раздел 3. Электродинамика

| | |
|---|-----|
| Лекция 10. Закон Кулона. Электрическое поле..... | 51 |
| Лекция 11. Проводники и диэлектрики в электрическом поле. Конденсаторы..... | 54 |
| Лекция 12. Постоянный электрический ток. Законы для полной цепи Ома..... | 58 |
| Лекция 13. Электрический ток в различных средах..... | 64 |
| Лекция 14. Магнитное поле. Свойства поля..... | 72 |
| Лекция 15. Сила и закон Ампера. Сила Лоренца..... | 74 |
| Лекция 16. Явление электромагнитной индукции. | 79 |
| Лекция 17. Правило Ленца..... | 85 |
| Лекция 18. Самоиндукция. Индуктивность..... | 89 |
| Лекция 19. Электромагнитные колебания и волны..... | 89 |
| Лекция 20. Переменный ток. Генератор. Трансформатор..... | 96 |
| Лекция 21. Волновые свойства света. Законы отражения и преломления..... | 101 |
| Лекция 22. Интерференция, дифракция, дисперсия света..... | 107 |

Раздел 4. Основы специальной теории относительности

| | |
|---|-----|
| Лекция 23. Основы специальной теории относительности..... | 111 |
|---|-----|

Раздел 5. Квантовая физика. Физика атома и атомного ядра

| | |
|--|-----|
| Лекция 24. Квантовая теория. Фотоэффект. Фотоны. Давление света..... | 114 |
| Лекция 25. Строение атома. Открытие радиоактивности..... | 118 |
| Лекция 26. Строение атомного ядра. Ядерные превращения..... | 122 |
| Лекция 27. Законы радиоактивного распада. Элементарные частицы. Фундаментальные взаимодействия | 126 |

| | |
|-------------------|------------|
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 131 |
|-------------------|------------|

| | |
|---|------------|
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ | 132 |
|---|------------|

ВВЕДЕНИЕ

Место физики в системе общеобразовательных предметов определяется особенностями физики как науки среди других наук. Современная физика является важнейшим источником знаний об окружающем мире, основой научно-технического прогресса и, вместе с тем, одним из важнейших компонентов человеческой культуры.

Физика является теоретической наукой, которая открывает фундаментальные законы природы. Физические теории и физические методы исследования все больше проникают в другие естественные науки (химию, астрономию, биологию и тому подобное) и дают важные результаты. Физику считают теоретической основой современной техники, много отраслей которой возникли на базе физических открытий. Это - электротехника, радиотехника, ядерная энергетика и т.д.

Физика изучает первичные структуры материи и соответствующие им самые простые формы ее движения. Этим она создает естественнонаучную базу для современного мировосприятия, которое является составной частью диалектико-материалистического мировоззрения.

Значение того или другого учебного предмета определяется через его специфические особенности и признаки. Физика как учебный предмет позволяет вооружить учеников основами науки о природе. Содержание, система и методология физики открывает большие возможности для формирования научного мировоззрения студентов, выработки практических умений и навыков, действенных навыков самостоятельной работы. При реализации этих заданий развиваются умственные способности, в частности логическое мышление, как отображение высшей логики - логики природы. Физика имеет огромный воспитательный потенциал.

Лекция 1. Физика и естественно-научные методы познания

1. Периоды развития знаний на различных этапах эволюции человечества

а) Первобытное общество

Человек получал знания об окружающем мире в строгой борьбе за существование. В этой борьбе отделились от животного мира ее далекие предки, развились его моторика и интеллект. От случайных и неосознанных действий с палками и камнями для защиты или для добывания пищи человек эволюционировала к изготовлению: оружия. Сначала это были грубо и примитивно обработанные куски камня. Затем орудия приобретало более совершенных форм: лук и стрелы, рыболовные снасти, охотничьи ловушки. Величайшим завоеванием человека было обнаружение и использования огня. В этой эволюции, которая длилась тысячи лет, формировалась сознание человека, развивалась речь, накапливались знания и представления о мире, возникали первые антропоморфные объяснения окружающих явлений, остатки которых сохранились и в нашем языке. Как и у первобытного человека, у нас солнце «ходит», месяц «смотрит» и т. п. Другого способа понять природу, кроме как уподобление ее к себе (живого существа), наделение ее чувством и сознанием, у человека не было. Именно это и стало источником развития и научных знаний, и религиозных представлений. одновременно с этими фантастическими представлениями о природе человек обогащалась реальными знаниями о небесных светилах, растениях и животных, о движении и силы, метеорологические явления и т. п. Накопленные знания и практические навыки, передаваясь от поколения к поколению, образовывали первичный фон будущей науки. В процессе развития общества и общественного труда накапливались предпосылки для создания устойчивой цивилизации.

б) Древние цивилизации Египта и Китая

Пирамиды Египта, которые сохранились до наших дней, свидетельствуют о том, что уже в III тысячелетии до н. е. государство могло организовать большие массы людей, вести учет материалов, рабочей силы, для чего нужны были специальные люди - работники умственного труда. Хозяйственные записи в Египте вели писцы, которым принадлежит заслуга в фиксации научных знаний своего времени. Известны памятники II тысячелетия - папирус Ринд, хранящейся в Британском музее, и Московский папирус - содержат решения различных задач, встречающихся в практике математических вычислений, вычислений площади и объемов.

В Московском папирусе выведена формула для вычисления объема усеченной пирамиды. Площадь круга египтяне вычисляли, поднимая в квадрат восемь девятых диаметра, что давало очень точное приближенное значение - 3,14.

Определение времени начала разлива Нила требовало тщательных астрономических наблюдений. Египтяне разработали календарь, состоящий из двенадцати месяцев 30 дней и пяти дополнительных дней в году. Месяц был разделен на три десятидневки, сутки - на двадцать четыре часа на двенадцать дневных и двенадцать ночных. Поскольку продолжительность дня и ночи изменялась в течение года, и время было не постоянно, а изменялась в соответствии со временем года.

Наиболее древним периодом китайской цивилизации считается эпоха существования первого государства Шан-Инь, рабовладельческой страны в долине реки Хуанхэ. Искусство бронзового литья позволяло изготавливать различные сосуды, украшенные сложными изображениями.

Уже в эпоху Шан была открыта идеографическая письменность, путем длительного усовершенствования превратилась в иероглифы и каллиграфию, был составлен лунный календарь.

Ранняя императорская эпоха Древнего Китая сделала вклад в развитие мировой культуры и цивилизации такими открытиями, как компас, спидометр и сейсмограф. Именно в Китае в сфере письменности и книгопечатания была создана бумага, а в военной технике – пушки.

в) Физика и астрономия в Древней Греции

Несмотря на огромные заслуги Древнего Востока перед наукой, настоящей родиной современной науки является Древняя Греция. Именно здесь возникла теоретическая наука, создавшая научные представления о мире.

Если египетский или Вавилонский писец, формулируя правило вычисления, писал: «делай так», не объясняя, почему следует «делать так», то греческий ученый требовал доказательств. Современная наука хорошо запомнила, кому она обязана своим рождением. Об этом свидетельствуют названия наук: математика, механика, физика, биология, география и др. Научные термины греческого происхождения (масса, атом, электрон, изотоп т.п.).

2. Начало новой эры в физике

В середине XV в. Европа меняет направления развития экономической, политической и культурной сферах. Строительство городов, отделение ремесленного производства от сельского хозяйства - все это стало толчком к разрушению натурального хозяйства, активного развития торговли, росту значения денег, появления новых общественных сил: купцы, банкиры, состоятельные ремесленники (буржуазия). Заинтересована в повышении производительности труда, буржуазия поощряла технические и организационные улучшения производства. Появились первые мануфактуры, начала развиваться промышленность и торговля.

Леонардо да Винчи является предшественником Галилея, Декарта, Кеплера, Ньютона и других основателей современного естествознания. Он один из первых провозгласил основы нового метода и начал применять его при решении конкретных задач, в частности при изучении движения. Леонардо писал: «Любое движение направляется к своему сохранению, иначе говоря: любое тело, движущееся двигается всегда, пока в нем сохраняется сила его двигателя».

Великий художник эпохи Возрождения Леонардо да Винчи хорошо понимал, что наука должна основываться на опыте и математическом расчете, и сам проводил эксперименты, результаты которых опережали более поздние выводы Галилея.

Опыты Галилея, собственно говоря, стали настоящим началом экспериментальной науки. Галилей изучал падение тел в лабораторных условиях, на наклонной плоскости, на маятнике; искал точное количественное соотношение между скоростью и временем падения, пройденным путем и временем падения и тому подобное. Результаты этих опытов и их теоретический анализ легли в основу механики, сделав бессмертным имя Галилея как основателя нового естествознания. Работы Галилея по механике, астрономии, сопротивлению материалов, акустики, оптики складываются в единое целое, подчиняются общей цели - утверждению новой науки и нового мировоззрения.

Достиженные исследовательским естествознанием результаты были завершены в работах великого английского ученого Исаака Ньютона. Важнейшим научным достижением Ньютона было создание теории движения планет и связанное с этим открытие закона всемирного тяготения. Три закона Ньютона завершают работы Галилея, Декарта, Гюйгенса и других ученых, работавших над созданием классической механики, готовя крепкий фундамент для плодотворного ее развития.

В то же время Ньютон доказал, что белый цвет является смесью семи цветов. Ученый исследовал также явление дифракции, достаточно точно описал радужные полосы на внешних границах тени волоса.

Следующий важный этап в развитии физики связан с учением о электрических и магнитных явлениях. В формировании современной науки об этих явлениях активное участие приняли: Шарль Кулон, Ганс Христиан Эрстед, Майкл Фарадей и Джеймс Максвелл.

3. Две революции в физике XX века

Начало XX в. ознаменовалось двумя революциями в физике. Одна из них связана с движением с большими скоростями. Стимулом для этой революции послужили эксперименты Майкельсона с измерением скорости света. Основной вклад в эту революцию внесли Эйнштейн, Лоренц и Пуанкаре. В результате к 1906-1910 гг. была создана специальная теория относительности.

Вторая революция связана с движением частиц малой массы (электронов, протонов, нейтронов, атомов). Эта революция была осуществлена в период с 1900 по 1930 гг. Она стала результатом усилий многих физиков, среди которых были Планк, Бор, Шредингер, Гейзенберг, Дирак, Борн, Паули.

Такие научные революции стали базой для реализации целого ряда физических открытий. Особенность открытий XX в. заключается в том, что буквально за несколько лет эти открытия получили широкое применение.

Так, в 1896 российский физик Александр Степанович Попов продемонстрировал первый радиоприемник, открывший возможность практического использования электромагнитных волн с целью беспроводной связи. Именно с помощью электромагнитных волн работают радио и телевидения, а также Интернет.

В 1947 г.. Американские физики Шокли, Бардин, Браттейноткрыли транзистор, который стал основным элементом всех радиоприборов на интегральных схемах.

Открытие лазерного излучения, сделанное Басовым, Пороховым и Таунсом, применяются в современной технике и медицине.

В 1896 Беккерель открыл радиоактивность Урана, а в 1938 Ганн и Штрассман открыли деление делением огромной энергии. И вскоре, в 1942 г., Ферми запустил в эксплуатацию первый ядерный реактор. В СССР реактор такого типа заработал под руководством Курчатова в 1946 г.. Сейчас в мире эксплуатируется более 400 реакторов, производящих приблизительно 6% мировой электроэнергии.

4. Теория и эксперимент

Процесс познания окружающего мира является неотъемлемой особенностью всех живых существ. Особое место в процессе познания занимает человек, который научился не только эффективно приобретать новые знания и использовать их, но и накапливать знания для передачи следующим поколениям. Существует два основных метода физических исследований: теоретический и экспериментальный.

Физическое исследование - это целенаправленное изучение того или иного явления способами физики. Первым этапом физического исследования является **наблюдение** - восприятие природы с целью получения исходных данных для последующего анализа. Если результаты наблюдений повторяются, наблюдатель природы делает вывод. Однако не всегда наблюдения дают правильный результат. Конечно, в основе всех наук лежит наблюдение, однако в 16-м веке физика выделилась среди других наук тем, что перешла от пассивного наблюдения к эксперименту. В отличие от наблюдения, в эксперименте исследуемый объект находится в контролируемых условиях, и подлежит активному воздействию, что значительно увеличивает

возможность его исследования. *Эксперимент* - это исследование физического явления в условиях, которые находятся под контролем ученого, с целью более углубленного изучения этого явления. Все эксперименты можно разделить условно на *качественные* и *количественные*. Самый простой эксперимент - качественный, в котором устанавливает наличие или отсутствие предполагаемого теорией явления. Количественное сравнение характеристик называется измерением. Все эксперименты можно разделить и по объектам, с которыми эксперимент выполняется: натурный, модельный, воображаемый и компьютерный.

5. Физические величины. Измерения физических величин

Физика выделяется систематическим использованием (для описания объектов, которые изучаются) таких характеристик, которые допускают количественное выражение. Именно эти характеристики называются физическими величинами.

➤ *Физическая величина* - это количественная характеристика объекта или явления в физике или результат измерения.

Путь, время, масса, плотность, сила, температура, давление, напряжения - это далеко не все примеры физических величин. Измерить величину - это значит сравнить ее с однородной величиной, принятой за единицу.

Существует всего семь *основных единиц физических величин*: метр, секунда, килограмм, кельвин, ампер, кандела, моль, а все остальные можно найти из них.

Для того, чтобы измерить физическую величину, нужно уметь пользоваться измерительными приборами. Устройства, с помощью которых измеряют физические величины, называют *измерительными приборами*. Измерения одной и той же физической величины, как правило, можно сделать по-разному, используя для этого различные приборы. Измерения разделяют на прямые и косвенные. Во время прямых измерений величину сравнивают с единицей измерения непосредственно или с помощью измерительного прибора, градуированного в соответствующих единицах.

В случае косвенных измерений искомую величину вычисляют по результатам прямых измерений других величин, связанных с измеряемой величиной определенной функциональной зависимости.

Например, для нахождения скорости мы измеряем расстояние, пройденное телом, и время, за которое это расстояние было пройдено. После этого находим скорость путем деления пути на время.

6. Современная научная картина мира

Основу для формирования современной картины мира обусловили серии открытий на рубеже XIX-XX веков: открытие сложной структуры атома, явление радиоактивности, дискретного характера электромагнитного излучения и т.д.

Фундаментальные основы новой картины мира:

а) общая и специальная теория относительности (новая теория пространства и времени привела к тому, что все системы отсчета стали равноправными, поэтому все наши представления имеют смысл только в определенной системе отсчета. Картина мира приобрела релятивный, относительный характер, видоизменились ключевые представления о пространстве, времени, причинности, непрерывности, отвергнуто однозначное противопоставление субъекта и объекта, восприятие оказалось зависимым от системы отсчета, в которую входят и субъект, и объект, способа наблюдения и т.д.)

б) квантовая механика (она выявила вероятностный характер законов микромира и неустранимый корпускулярно-волновой дуализм в самых основах материи). Стало ясно, что абсолютно полную и достоверную научную картину мира не удастся создать никогда, любая из них обладает лишь относительной истинностью.

Появление квантовой механики привело к огромной революции не только в физике, но и в смежных дисциплинах. Квантовая теория помогла развитию и техники полупроводников, без которой совершенно немыслима современная электроника, а также способствовала созданию квантовых генераторов излучения — лазеров, прочно вошедших в повседневную жизнь

человека. Важнейшее последствие открытий в квантовой физике, теории относительности и ядерной физике — овладение ядерной энергией.

Также стоит отметить появление новых революционных теорий. Например, **теория струн**, сочетающая в себе идеи квантовой механики теории относительности основанная на гипотезе, что все элементарные частицы и их фундаментальные взаимодействия возникают в результате колебаний и взаимодействий ультрамикроскопических квантовых струн масштабах порядка планковской длины 10^{-35} м.

В рамках новой картины мира произошли революции в частных науках и появление ряда новых междисциплинарных направлений (синергетика, астрофизика, генетики, кибернетика).

Раздел 1. Механика

Лекция 2. Относительность механического движения. Характеристика видов движения

1. Механическое движение,

- *Механическим движением* называют изменение с течением времени положения тела относительно других тел.

Мироздание по размерам материальных тел в механике можно разделить на три части: микромир, макромир и мегамир.

К *микромиру* принадлежат атомы, молекулы и частицы, из которых они состоят. Движение в микромире описывает квантовая механика; *макромир* - люди, животные, машины и механизмы, реки и водопады, а также, собственно, Земля. К *мегамиру* относятся планеты Солнечной системы, Солнце, звезды, галактики. Механическое движение - это движение объектов макро- и мегамиров.

Механическое движение условно можно разделить на два простейшие виды: поступательное движение и вращательное движение.

- *Поступательное движение* - это такое движение, когда все точки тела движения даются одинаково.

Во время поступательного движения любой отрезок, соединяющий две точки тела, остается параллельным самому себе.

- *Вращательное движение* - это такое движение, при котором все точки тела двигаются по окружностям, центры которых расположены на одной прямой лине, - оси вращения.

Суточное движение Земли, движение волчка, движение Земли вокруг Солнца - примеры вращательного движения.

2. Основная задача механики

Изучить движение тела - значит определить, как меняется его положение с течением времени. Если это известно, можно узнать положение тела в любой момент времени. Учитывая это, можно сформулировать основную задачу механики:

- *Основная задача механики* заключается в том, чтобы определить положение тела в любой момент времени.

Чтобы сформулировать законы механики и научиться их применять, сначала нужно научиться описывать положение тела и его движение. Описание движения составляет содержание первого раздела механики, называется кинематикой.

Для решения задач в кинематике очень часто не имеет значения, что именно движется, где движется, почему движется именно так. Главное - как движется.

3. Система отсчета

Выясним, как определить положение тела в пространстве. Положение тела в пространстве всегда определяют относительно какого-либо другого тела, называется *телом отсчета*.

- *Тело отсчета* - это тело, в условиях задачи считается неподвижным и в отношении которого рассматривается движение всех тел в этой задаче.

Тело отсчета «присутствует» в любой задаче о движении тел, даже тогда, когда оно явно не упоминается. Очень часто телом отсчета считается Земля.

С телом отсчета связывают *систему координат*.

Положение точки в пространстве задается тремя числами, которые называются координатами точки и обозначаются буквами x , y , z . Часто можно выбрать систему координат так, чтобы одна или две координаты тела оставались неизменными на протяжении всего движения. Тогда описать движение тела можно с помощью только одной или двух координат.

Связана с телом отсчета система координат и выбранный способ измерения времени образуют *систему отсчета*.

Итак, система отсчета состоит из следующих компонентов:

- 1) тела отсчета
- 2) связанной с ним системы координат;

3) Способа отсчета времени.

4. Материальная точка

Материальное тело в механике описывают его размерами (объемом, формой) и массой. Например, планета Земля имеет форму, приближенную к шару с радиусом 6400 км, а масса Земли приблизительно равна $6 \cdot 10^{24}$ кг. Лодка же имеет гораздо более сложную форму. Размеры лодки (длина, ширина и высота) составляют от 0,5 м до 2 м, а масса - около 100 кг.

Для того, чтобы определять изменение положения тела в пространстве, нужно, прежде всего, уметь определять это положение. Возникает вопрос: всегда ли необходимо знать объем, форму и размеры тела?

К счастью, для решения многих задач размерами тела можно пренебречь, рассматривая тело как одну точку. При этом описание движения тела намного упрощается.

➤ **Материальная точка** - это физическая модель, применяемая для упрощения описания движения тела, и отвечает телу, размерами которого в условиях определенной задачи можно пренебречь.

С помощью модели «материальная точка» удобно описывать движение многих тел, например, движение поезда между двумя станциями. Если же поезд остановился у перрона станции, то эта модель уже не применяется.

Движение Земли вокруг Солнца можно описывать, используя модель «материальная точка», а описывать суточное вращение Земли с помощью этой модели уже нельзя.

Итак, мы видим, что модель «материальная точка» имеет определённые ограничения для использования при решении конкретных задач

5. Траектория движения

В процессе движения материальная точка занимает различные положения в пространстве относительно выбранной системы отсчета. При этом точка, которая движется, «описывает» в пространстве определенную линию. Иногда эта линия видна, например, самолет, который высоко летит, может оставлять за собой в небе след или следы мела на доске

➤ **Траектория движения частицы** - это линия ее движения в пространстве.

Очень часто траектория является невидимой линией. Траектория точки, которая движется, может быть прямой или кривой линии. Соответственно форме траектории, движение бывает прямолинейным и криволинейным.

6. Путь и перемещение

С понятием траектории тесно связано понятие пути.

➤ **Путь** - это физическая величина, которая численно равна длине участка траектории, пройденной материальной точкой за определенный промежуток времени.

Путь, как правило, обозначают символом l . Единицей пути в СИ метр (м).

Путь увеличивается, если тело движется и остается неизменным, если тело находится в состоянии покоя. Итак, путь не может уменьшаться с течением времени.

Путь, пройденный телом, позволяет определить положение тела в любой момент времени только в том случае, когда известна траектория движения. Для этого достаточно отложить пройден путь от положения тела вдоль траектории в направлении движения.

Однако, если траектория движения тела не известна (или не известно направление движения), то положение тела, движущегося в любой момент времени определить невозможно.

Чтобы определить положение тела, движущегося в любой момент времени, вводят физическую величину «перемещение».

➤ **Перемещением** называют вектор, проведенный от начального положения тела в его положение в определенный момент времени.

Итак, перемещение одновременно указывает и на направление движения, и на расстояние между начальным и конечным положениями движущегося тела

Перемещение обозначают символом s . Единицей модуля перемещения в СИ, как и пути, является метр.

Длину перемещения, взятую со знаком «+» или «-», называют проекцией вектора перемещения на координатную ось,

Если точка А - исходное положение тела, обусловленное координатой x_0 , а точка В - его конечное положение, обусловленное координатой x , то в общем случае можно записать:

$$x = x_0 + s_x$$

Итак, по известному вектору перемещения тела и его начальной координате можно определить его конечную координату, то есть найти положение тела относительно выбранной системы отсчета в любой момент времени.

7. Скорость прямолинейного равномерного движения

Самый простой вид механического движения - это равномерное прямолинейное движение. С этим видом движения ученики уже знакомы из курса физики и математики предыдущих классов.

➤ *Прямолинейное равномерное движение - это такое движение, когда материальная точка за любые равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения.*

Одной из основных кинематических характеристик движения является скорость:

$$v = \frac{s}{t}$$

➤ *Скорость v прямолинейного равномерного движения - это физическая величина, равная отношению перемещения к промежутку времени t , за который произошло это перемещение.*

Как видно из определения, скорость является векторной величиной: направление скорости совпадает с направлением перемещения. В случае прямолинейного равномерного движения модуль перемещения s совпадает с путем l , поэтому в этом случае можно записать, что

$$v = \frac{l}{t}$$

Единица скорости в СИ - 1 м/с.

➤ *1 м/с это скорость такого прямолинейного равномерного движения, при котором материальная точка за 1 с перемещается на расстояние 1 м.*

8. Перемещение в случае прямолинейного равномерного движения

Воспользовавшись формулой для скорости $v=s/t$, можно вычислить перемещение тела за любой промежуток времени: $s = vt$.

Если известны скорость тела и время равномерного движения, то можно вычислить пройденный телом путь: $l = vt$, а также можно вычислить и время движения:

$$t = \frac{l}{v}$$

9. Уравнение для координаты в случае прямолинейного равномерного движения

Основная задача механики заключается в умении определять положение тела, движущегося в любой момент времени. Воспользуемся уравнением для координаты движущегося тела: $x = x_0 + s_x$. Поскольку для прямолинейного равномерного движения $s_x = v_x t$, то в этом случае уравнение для координаты имеет вид:

$$x = x_0 + v_x t.$$

С помощью этой формулы, зная исходное положение тела (x_0), скорость и направление движения тела (проекцию скорости v_x), можно определить положение тела в любой момент времени, то есть решить основную задачу механики.

Если начальная координата тела равна нулю ($x_0 = 0$), то уравнение для координаты имеет следующий вид:

$$x = v_x t$$

10. Относительность движения

Напомним ученикам, что система отсчета в механике избирается произвольно. Тогда положение того же тела в определенный момент времени в отношении различных тел отсчета будет разным. Поэтому и траектория движущегося тела, в одной системе отсчета будет иметь

одну форму, а в другой - другую, то есть форма траектории зависит от выбора системы отсчета. Это означает, что движение того же тела для одного наблюдателя может быть прямолинейным, а для другого - криволинейным. Например, точка на ободе колеса велосипеда относительно велосипедиста описывает круг, а для прохожего - циклоиду. Следовательно, говорить о форме траектории можно только в заданной системе отсчета. В этом аспекте говорят, что траектория относительная.

Вопросы для студентов:

1. *Какие еще кинематические характеристики движения являются относительными?*
2. *Пловец переплывает реку с одного берега на другой, двигаясь перпендикулярно к берегам; пассажир идет по вагону, что движется, выясняем относительность перемещения и скорости.*

11. Добавление перемещений и скоростей

Назовем условно одну систему отсчета «неподвижной», а другую - «подвижной». Тогда правило сложения перемещений можно сформулировать так:

- *Перемещения s тела в «неподвижной» системе отсчета равна векторной сумме перемещения s_1 тела в «подвижной» системе отсчета и перемещения s_2 «подвижной» системы отсчета относительно «неподвижной»*

$$\mathbf{s} = \mathbf{s}_1 + \mathbf{s}_2$$

Разделив соотношение $\mathbf{s} = \mathbf{s}_1 + \mathbf{s}_2$ на время движения t , получим закон сложения скоростей : $\mathbf{v} = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2$. Это означает, что

- *скорость \mathbf{v} тела в «неподвижной» системе отсчета равна векторной сумме скорости \mathbf{v}_1 тела в «подвижной» системе отсчета и скорости \mathbf{v}_2 «подвижной» системы отсчета относительно «неподвижной».*

Важно отметить, что движение тела происходит в обеих системах отсчета одновременно. В отношении же каждой системы тело выполняет в любой момент времени только одно движение.

12. Ускорение. Равноускоренное движение

В случае неравномерного движения мгновенная скорость тела непрерывно меняется от точки к точке, от одного момента времени к другому. Например, при падении камня его скорость увеличивается, а скорость шайбы, скользит по льду, со временем уменьшается до ее окончательной остановки.

Изменение скорости тела может происходить очень быстро (движение пули в канале ствола при выстреле из винтовки) и сравнительно медленно (движение поезда во время его отправления с вокзала).

Для характеристики скорости изменения скорости вводится физическая величина - ускорение.

- ***Ускорение** - это векторная величина, характеризующая изменение скорости тела и равна отношению изменения скорости ко времени, за который это изменение произошло.*

Пусть $\mathbf{v}_0 > 0$ - начальная скорость материальной точки, \mathbf{v} - мгновенная скорость точки за промежуток времени Δt . Тогда изменение мгновенной скорости равен $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0$. Отсюда следует, что

$$\mathbf{a} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{v} - \mathbf{v}_0}{\Delta t}$$

Ускорение имеет такой же направление, как и изменение скорости.

Если тело движется так, что его скорость за любые равные промежутки времени изменяется одинаково, то такое движение называют равноускоренным.

- ***Равноускоренное движение** - это такое прямолинейное движение, когда скорость тела за любые равные промежутки времени изменяется на одну и ту же векторную величину.*

Иначе говоря, равноускоренное движение - это движение с постоянным ускорением. Ускорение во время равноускоренного движения показывает, насколько меняется мгновенная скорость за единицу времени.

Запишем формулу для ускорения в проекциях на ось Ox :

$$a_x = \frac{v_x - v_{x0}}{t}$$

За единицу ускорения в Международной системе единиц принимают такое ускорение прямолинейно равноускоренного подвижной точки, когда за 1 с ее скорость меняется на 1 м / с.

$$[a] = \frac{м}{с^2}$$

Закрепление изученного материала по теме «Кинематика»

1. Материальная точка, это ...
2. Физическая величина, равная отношению изменения координаты ко времени, за которое это изменение произошло, называется...
3. Тело за 4 секунды изменило свою координату с 2 до 18 метров. Какова скорость тела?
4. Два автомобиля двигаются навстречу друг другу по параллельным дорогам со скоростями 36 км/ч и 12 м/с. Чему равна скорость одного автомобиля относительно другого?
5. По данному уравнению $U = 5 + 6t$ определите, чему равно ускорение тела?
6. Как направлено ускорение тела при движении по окружности?
7. Автомобиль едет со скоростью 20 м/с по закруглению дороги радиусом 50 метров. Чему равно центростремительное ускорение автомобиля?
8. Как направлено ускорение, действующее на тело, брошенное под углом к горизонту?
9. Тело брошено вертикально вверх со скоростью 60 м/с. Через какое время его скорость будет равна 10 м/с?
10. Чему равен радиус окружности, по которой двигается тело совершая 12 оборотов за 3 секунды, если на это тело действует центростремительное ускорение $4 м/с^2$.
11. Зависимость скорости от времени имеет вид: $U = 80 - 5t$. Постройте график скорости и определите перемещение тела через 8 секунд.

Лекция 3. Взаимодействие тел. Законы динамики Ньютона.

1. Что изучает динамика?

Как известно, вид механического движения того или иного тела зависит от ускорения, с которым движется это тело. Почему же движение происходит с различными ускорениями? Ответить на этот вопрос можно, лишь изучив причины, обуславливающие ускорение тела.

- *Раздел механики, в котором изучаются причины, которые обуславливают ускорение, называют динамикой.*
- **Основная задача динамики** - изучить взаимодействие тел, выяснить законы, благодаря которым происходит движение тел, и на основании этих законов уметь определять положение данного тела в любой момент времени.

2. При каких условиях тело сохраняет свою скорость постоянной?

Как известно, тело меняет свою скорость только в результате воздействия на него другого тела. Например, если поднести магнит к неподвижной стальной тележке, то тележка начнет двигаться. А поскольку тело изменяет свою скорость, следовательно, оно получило ускорение.

- *Причина ускорения тела - воздействие на него другого тела.*

Итак, если на тело не действует другое тело, то первое тело или находится в состоянии покоя или движется равномерно и прямолинейно.

Но в природе нет тел, которые не подвергались воздействию других. Все тела, находящиеся у поверхности Земли, взаимодействуют с ними (притягиваются). Например, брусок, лежащий на столе, привлекается Землей, но остается в состоянии покоя, так как действие со стороны Земли скомпенсировано действием со стороны стола. Таким образом, можно сделать вывод:

- *тело находится в состоянии покоя, если действие других тел на это тело скомпенсировано.*

После раскрытия парашюта движение парашютиста будет равномерным, несмотря на привлечение Земли. Притяжения парашютиста к Земле компенсируется взаимодействием парашюта с воздухом.

- *Тело движется прямолинейно и равномерно, если действие других тел на это тело скомпенсировано.*

Явление сохранения скорости тела постоянной (в частности, скорость, которая равной нулю) называют **инерцией**.

3. Какое движение называют движением по инерции?

Почти 2500 лет назад древнегреческий ученый Аристотель утверждал: чтобы тело двигалось, его необходимо все время «двигать», причем, чем больше скорость тела, тем больше усилий нужно приложить. Именно влияние одного тела на другое Аристотель назвал силой.

- *По Аристотелю, **сила - причина движения**.*

Великий итальянский ученый Галилео Галилей первым из ученых перешел от наблюдений к опытам. Изучая движение тел в условиях максимального уменьшения силы трения (Галилей экспериментировал с шарами, которые скатывались из наклонного желоба), ученый сформулировал закон, названный «законом инерции»:

- *Если на тело не действуют другие тела, то оно сохраняет состояние покоя или движется прямолинейно и равномерно.*

Способность тел сохранять свою скорость неизменной, если на них не действуют другие тела, называют явлением инерции.

Движением по инерции можно считать движение шайбы после удара клюшкой, движение шара по дорожке во время игры в боулинг. По инерции через голову лошади летит всадник, если лошадь споткнулась; по инерции перелетает через руль велосипеда спортсмен, который по неосторожности наехав на препятствие.

4. Первый закон Ньютона

Как должен вести себя тело, на которое не влияют другие тела?

Как утверждал Аристотель, такое тело должно находиться в состоянии покоя, скорость его должна равняться нулю.

По Ньютону, ускорение такого тела должна равняться нулю.

- *По учению Ньютона, **сила - причина изменения движения тел**.*

Это означает, что в определенной системе отсчета тело, на которое не влияют другие тела, может либо находиться в состоянии покоя, или двигаться прямолинейно и равномерно. В этом и заключается первый закон Ньютона:

- *любое тело продолжает находиться в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока его не заставят изменить это состояние приложенные к нему силы.*

Однако впоследствии выяснилось, что первый закон Ньютона реализуется не во всех системах отсчета. Так, он с необычайной точностью сработал в системе отсчета, связанной с Землей, а вот в системе отсчета, связанной с автомобилем, который едет по мосту, первый закон Ньютона не срабатывает, если автомобиль начинает ускоряться или тормозить.

- *Те системы отсчета, в которых закон инерции реализуется, называются **инерциальными**, а те, у которых не реализуется, - **неинерциальными**.*

Согласно современным представлениям, первый закон Ньютона формулируется так:

- *Существуют такие системы отсчета, относительно которых тела сохраняют свою скорость постоянной, если на них не действуют другие тела, или действия других тел скомпенсированы.*

Итак, существуют системы отсчета, в которых закон инерции работает. С любым свободным телом можно связать систему отсчета, называется инерциальной. Таким образом, инерциальных систем отсчета бесконечно много. Во многих задачах инерциальной системой отсчета с большой степенью точности можно считать систему отсчета, связанную с Землей.

5. Инертность

О теле, в результате взаимодействия получает меньшее ускорение, то есть за время взаимодействия меньше меняет свою скорость, говорят, что оно более инертное, чем второе из двух тел, которые взаимодействуют. Менее инертным является то тело, что за время взаимодействия больше меняет свою скорость, то есть получает большее ускорение. Но любому телу для изменения скорости требуется определенное время. Ни у одного тела, при одной взаимодействия скорость не может измениться мгновенно. Это свойство тел называется инертностью.

➤ ***Инертность** - это свойство, которое характерно для всех тел и заключается в том, что для изменения скорости тела требуется время*

Необходимо обратить внимание учащихся на то, что инертность - это способность тела.

Мгновенное увеличение или уменьшение скорости тела является нереальными. Так, скорость движения автомобилей и поездов, отправляются с места, нарастает постепенно. Скорость ракеты-носителя при старте с Земли меняется не рывком, а постепенно. Постепенно растет и скорость лыжника при спуске с горы. Так же постепенно меняется и скорость тел при торможении: не могут остановиться мгновенно спортсмен на финише, автомобиль на углу, поезд перед семафором.

6. Масса тела

Свойство тела - инертность - характеризуется физической величиной - массой.

Два тела взаимодействуют. И то будет более инертным и иметь большую массу, которое получит меньше модулем ускорения. Второе тело, менее инертное, имеет меньшую массу. Поэтому говорят, что

➤ ***Масса тела** - это мера его инертности.*

Например, во время выстрела винтовка получает меньшее ускорение, чем пуля. И так, винтовка более инертна, чем шар, то есть масса винтовки больше массы шара.

Обозначим массы тел, взаимодействующих через m_1 и m_2 , а ускорение, которое они получают, - через a_1 и a_2 , тогда можно записать:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

➤ *Отношение модулей ускорений двух тел, взаимодействующих обратно пропорционально отношению их масс.*

Единицей массы в системе СИ является килограмм (1 кг).

Эталоном массы служит платиново-иридиевый цилиндр, хранящийся в Международном бюро мер и весов во Франции.

Основные свойства массы:

1. Масса тела - величина инвариантная, то есть не зависит от выбора системы отсчета.
2. Масса тела не зависит от скорости движения тела.
3. Масса тела - величина аддитивная, то есть масса тела равна сумме масс всех частиц, из которых тело состоит, а масса системы тел равна сумме масс тел, образующих систему.
4. В классической механике срабатывает закон сохранения массы: при любых процессах, протекающих в системе тел, общая масса системы остается неизменной; масса тела не меняется в результате его взаимодействия с другими телами.

7. Измерение массы

Одним из самых распространенных способов прямого измерения массы является взвешивания: тела, имеющих одинаковую массу, с одинаковой силой притягиваются к Земле. Для такого измерения массы используют различные весы.

Взвешивания - один из самых удобных способов измерения массы, однако отнюдь не универсальный.

Как, например, измерить массу молекулы или массу Луны? Положить эти объекты на чашу весов невозможно. В этом случае необходимо принять во внимание тот факт, что масса - это мера инертности.

Проводя опыты, в которых тело с неизвестной массой определенным образом взаимодействует с телом известной массы, и измерив ускорения, которые они получают, мы сможем записать равенство:

$$\frac{a_x}{a_T} = \frac{m_T}{m_x}$$

где m_T - масса тела известной массы; m_x - масса тела неизвестной массы; a_T и a_x - модули ускорений соответственно тела известной и неизвестной масс.

Отсюда получаем:

$$m_x = \frac{a_x}{a_T} m_T$$

8. Виды взаимодействий в механике

Чтобы какое-либо тело приобрело ускорение, необходимо, чтобы на него действовало другое тело. Так, тела, падающие на Землю, двигаются с ускорением, благодаря взаимодействию с Землей. Если к стальному шарик, который лежит на столе, поднести сильный магнит, то шарик начнет двигаться в результате действия магнита.

➤ *Действие тел или частиц (друг на друга) называют взаимодействием.*

Взаимодействие тел - одно из фундаментальных понятий в физике. Именно взаимодействия является причиной каких-либо изменений, происходящих с телами вокруг нас. Все взаимодействия в современной физике можно разделить на четыре вида: гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое.

Гравитационные взаимодействия (притяжения): привлечение тел к Земле, существование Солнечной системы, звездных систем (галактик) обусловлены действием сил притяжения.

Электромагнитные взаимодействия: обусловленные связями в атомах, молекулах и обычных макротелах.

Сильные (ядерные) взаимодействия: наличие в ядрах одинаково заряженных протонов и нейтральных частиц свидетельствует о том, что должны существовать взаимодействия, гораздо более интенсивнее, чем электромагнитные, иначе ядро не могло бы образоваться. Эти взаимодействия проявляются только в пределах ядра.

Слабые взаимодействия: под влиянием «внутренних причин» нестабильные свободные частицы за то или другое характерное время преобразуются на другие частицы (распадаются).

Процессы, обусловленные сильным и слабым взаимодействиями, подчиняются законам квантовой механики. Эти взаимодействия проявляются в микромире, и, изучая курс механики, мы их рассмотрим.

Все механические явления можно объяснить с помощью только трех видов сил: силы всемирного тяготения, силы упругости, силы трения.

9. Что такое сила?

Действия тел друг на друга описывают с помощью сил. Силы, которые характеризуют взаимодействия, приводящие к изменению или скорости тела, или его формы и размеров. Кроме того, результат действия одного тела на другое зависит также от направления этого действия.

➤ *Сила - это векторная величина, являющаяся мерой воздействия на тело других тел, в результате которой тело получает ускорение или изменяет форму и размеры.*

В системе СИ сила измеряется в ньютонах (1 Н).

➤ *1 Н - это сила, которая телу массой 1 кг оказывает ускорение 1 м / с².*

Каждая сила характеризуется числовым значением (модулем), направлением и точкой приложения.

Во время построения силы, как и другие векторные величины, обозначают стрелками. Начало стрелки совпадает с точкой приложения силы, направление стрелки указывает направление силы, а длина стрелки пропорциональна модулю силы.

10. Соотношение между силой и ускорением

Итак, в результате взаимодействия тело меняет свою скорость - достигает ускорения, а ускорение зависит от массы тела (как меры его инертности). А физической величиной, которая характеризует взаимодействие, это сила. Теперь выясним, зависимостью связаны сила, ускорение и масса тела.

Проведем несколько опытов с тележкой, которая может двигаться по горизонтальному столу практически без трения. Измеряя путь, который проходит тележка за разные промежутки времени, можно заметить, что путь пропорционален квадрату времени движения, то есть тележка движется равноускорено. Это означает, что

- *Направление ускорения тела совпадает с направлением силы, действующей на это тело: $a \sim F$.*

Изменим условия опыта: будем менять массу тележки, оставляя неизменной силу. Проведение опыта с тележкой, на который кладут дополнительные грузики, показывает, что при неизменной силе ускорения уменьшается во столько раз, во сколько увеличивается масса тележки с грузом. Итак,

- *Ускорение, которое получает тело под действием силы, обратно пропорционально массе этого тела:*

$$a \sim \frac{1}{m}$$

Таким образом, ускорение, которого сила F придает телу массой m , рассчитывается по формуле:

$$a = \frac{F}{m}$$

12. Второй закон Ньютона

Соотношение между равнодействующей всех сил, действующих на тело, массой тела и его ускорением были сформулированы Ньютоном как второй из трех основных законов динамики:

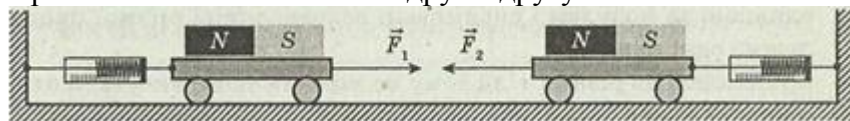
- *Равнодействующая F всех сил, приложенных к телу, равна произведению массы тела на его ускорение:*

$$F = ma$$

13. Третий закон Ньютона

В природе не бывает так, чтобы только одно тело действовало на другое, а другое тело при этом не действовало на первое. Тела всегда взаимно действуют друг на друга.

Обратимся к опыту. Поставим на горизонтальную поверхность две легкие тележки и с помощью двух динамометров прикрепим их к вертикальным стойкам. Положим на тележки два магнита разноименными полюсами друг к другу.



Через притяжения магнитов тележки придут в движение, растягивая при этом пружины динамометров. Только сила упругости пружины динамометра уравновесит силу притяжения со стороны магнита, тележка остановится. Опыт показывает, что после остановки тележек показания обоих динамометров одинаковы. Это означает, что с какой силой левый магнит притягивает правый магнит, с такой же силой прав магнит притягивает левый. Кроме того, анализируя опыт, видим, что эти силы направлены противоположно. Итак,

$$F_1 = -F_2$$

С другой стороны, опыты показывают, что при всех видах взаимодействий ускорения тел, которые взаимодействуют, обратно пропорциональны массам этих тел:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

Из этого соотношения с учетом того, что ускорение, которые получают тела вследствие взаимодействия, направленные в противоположные стороны, можно записать: $m_1 a_1 = -m_2 a_2$

Согласно второму закону Ньютона, $m_1 a_1 = F_1$ и $m_2 a_2 = F_2$, где F_1 - сила, действующая на первое тело, а F_2 - на второе.

Поэтому $F_1 = -F_2$. Это равенство выражает третий закон Ньютона:

➤ *два тела взаимодействуют друг с другом с силами, направленными вдоль одной прямой, одинаковыми по модулю и противоположными по направлению.*

Третий закон Ньютона утверждает, что силы всегда «возникают» парами. Такие силы иногда называют силами действия и противодействия. При этом безразлично какую из двух сил назвать силой действия, а какую - силой противодействия.

Лекция 4. Силы в природе. Закон всемирного тяготения.

1. Деформация

Деформации возникают потому, что разные части тела движутся по-разному. Если бы все части тела двигались одинаково, тело всегда сохраняло бы свою первоначальную форму и размеры, то есть оставалось бы недеформированным

➤ *Деформация - это изменение формы и размеров тела под действием внешних сил.*

Рассмотрим несколько примеров.

1. Возьмем мягкий ластик для карандаша и нажмем на нее пальцем. Палец, нажимает на ластик, перемещает верхние слои резинки; нижний слой, находящийся на столе, остается неподвижным, так как сталкивается с более твердой чем ластик поверхностью стола. Разные части ластика смещаются по-разному, и ластик изменяет свою форму: возникает деформация.

Деформированный ластик действует на осязательные с ней тела с определенной силой. Палец четко чувствует давление ластика. Если палец убрать, резинка обретет былую форму.

2. Возьмем мягкую цилиндрическую пружину и медленно опустим ее одним краем на стол. Пружина окажется сжатой. Происходит эта деформация так: после того, как нижний виток пружины коснулся поверхности стола, этот виток прекращает двигаться, верхние же витки пружины продолжают опускаться и приближаться к нижним виткам; пружина сжимается, и появляются силы упругости; движение верхних витков прекращается только тогда, когда сила упругости, возникшая в результате сжатия, в любом месте пружины действует на высшие витки с силой, равной их весу. Но до этого витки пружины должны быть сжаты тем сильнее, чем ниже они расположены, так как сила упругости, действующая с их стороны, должно уравновешивать вес большого числа витков.

7 Деформации растяжения и сжатия

По характеру смещения частиц тела относительно друг друга различают такие виды деформаций: *растяжение, сжатие, сдвиг, кручение, изгиб.*

Наиболее простым видом деформации является деформация растяжения и деформация сжатия.

Если до однородного, закрепленного с одного конца стержня приложить силу вдоль его оси в направлении от стержня, то он потерпит деформацию растяжения. Деформации растяжения испытывают тросы, канаты, цепи в подъемных устройствах, стяжки между вагонами и тому подобное. Если на закрепленный стержень подействовать силой вдоль его оси в направлении стержня, то он испытывает сжатия. Деформации сжатия испытывают столбы, колонны, стены, фундаменты домов и др. Вследствие растяжения или сжатия изменяется площадь поперечного сечения тела.

Деформации растяжения и сжатия характеризуются абсолютным и относительным удлинением.

➤ *Абсолютное удлинение - это физическая величина, равная изменению длины тела вследствие деформации растяжения или сжатия.*

Абсолютное удлинение обозначают Δl и вычисляют по формуле: $\Delta l = l - l_0$, где l_0 начальная длина тела, а l - длина деформированного тела.

Очевидно, что в случае деформации растяжения $\Delta l > 0$, а в случае деформации сжатия $\Delta l < 0$.

- **Относительное удлинение** - это физическая величина, равная отношению абсолютного удлинения к исходной длине тела.

Относительное удлинение обозначается ϵ и вычисляется по формуле: $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$

В случае деформации растяжения $\epsilon > 0$, а в случае деформации сжатия $\epsilon < 0$.

3. Упругие и неупругие деформации

Растянем пружину, а затем отпустим ее. Если пружина после деформации вполне восстановит свои размеры и форму, то такая деформация является упругой.

- **Деформации, которые полностью исчезают после прекращения действия на тело внешних сил, называют упругими.**

Если взять в руки пластилиновый брусок и сжать его, пластилин так и останется деформированным после прекращения действия силы. Такие деформации называют неупругими.

- **Деформации, которые сохраняются и после того, как внешние силы перестают действовать на тело, называются неупругими.**

Вещества, в которых упругая деформация заметно переходит в неупругую только в течение длительного времени (годы!), называют упругими веществами.

Примерами упругих веществ является сталь, стекло. Вещества, в которых упругая деформация заметно переходит в неупругую на протяжении некоторого времени (секунды, доли секунды), называют неупругими веществами. Примеры: свинец, воск и т.п.

4. Природа силы упругости

Вследствие каких-либо деформаций тела всегда возникают силы, препятствующие деформациям; эти силы направлены в сторону восстановления прежних форм и размеров тела, то есть, направлены противоположно деформации их называют силами упругости.

- **Сила упругости** - это сила, возникающая в результате деформации тела и направленная противоположно направлению смещения частиц в процессе деформации.

Любое тело состоит из частиц (атомов или молекул), а те, в свою очередь, состоят из положительного ядра и отрицательных электронов. Между заряженными частицами существуют силы электромагнитного притяжения и отталкивания. Если частицы находятся в состоянии равновесия, то силы притяжения и отталкивания уравновешивают друг друга.

В случае деформации тела происходят изменения во взаимном расположении частиц. Если расстояние между частицами увеличивается, то электромагнитные силы притяжения превышают силы отталкивания. Если же частицы сближаются, то преобладают силы отталкивания.

Силы, возникающие в результате изменения положения частиц, очень малы. Но в результате деформации меняется расположения очень большого количества частиц, поэтому равнодействующая всех сил уже является значительным. Это и есть сила упругости. Итак, сила упругости по своему происхождению - электромагнитная сила.

5. Механическое напряжение

Состояние упруго деформированного тела характеризует физической величиной, что называется механическим напряжением.

Растягивая с определенной силой металлический стержень. В любом сечении S деформированного стержня возникают силы упругости, препятствующие его разрыва.

- **Механическое напряжение** - это физическая величина, характеризующая деформированное тело и равна отношению модуля силы упругости $F_{упр}$ к площади поперечного сечения тела S :

$$\sigma = \frac{F_{упр}}{S}$$

Единица механического напряжения в СИ - Паскаль (Па).

Опыты показывают, что:

- При незначительных упругих деформаций механические напряжения пропорциональна относительному удлинению:

$$\sigma = E|\epsilon|$$

Коэффициент пропорциональности E называется модулем упругости, или модулем Юнга.

- **Модуль Юнга** - это физическая величина, характеризующая сопротивляемость материала упругой деформации растяжения или сжатия.

Поскольку относительное удлинение есть - безразмерная величина, то единица модуля Юнга в СИ - Паскаль (Па).

6. Закон Гука

В 8 классе мы изучали закон Гука:

- В пределах упругой деформации сила упругости прямо пропорциональна абсолютному удлинению пружины: $F_{\text{упр}} = k|\Delta l|$

Жесткость пружины определяется по формуле: $k = \frac{F_{\text{упр}}}{|\Delta l|}$

- Коэффициент жесткости зависит от упругих свойств материала, из которого изготовлено тело, и его геометрических размеров.

Прямую пропорциональную зависимость между силой упругости и удлинением используют в динамометр. Сила упругости часто работает в технике и природе: в часовых механизмах, в амортизаторах на транспорте, в канатах, тросах, в человеческих костях и мышцах и тому подобное.

7. Природа силы трения

Силы трения сопровождают любое движение или попытки причинить его, поэтому их нельзя не изучать.

- **Сила трения** - это сила, возникающая при движении или при попытке вызвать движение одного тела по поверхности другого и направлена вдоль осевательных поверхностей против движения.

Причиной возникновения сил трения служат шероховатости соприкасаемых поверхностей тел и взаимное притяжение молекул этих тел. Взаимодействие неровностей поверхностей приводит к деформации тел и появления сил упругости, которые так же, как и взаимное притяжение молекул, имеют электромагнитную природу. Итак, силы трения имеют электромагнитную природу.

8. Сила трения покоя

Положим брусок на доску и поднимем ее за один конец. Брусок при этом не соскальзывает, то есть находится в состоянии равновесия. Поскольку две силы, действующие на брусок (сила притяжения и сила реакции опоры), не уравновешивают друг друга, то очевидно, есть еще одна сила, которая уравновешивает равнодействующую силы притяжения и силы упругости. Это и есть сила трения покоя.

- **Сила трения покоя** - это сила, возникающая между соприкасающимися поверхностями тел, неподвижных относительно друг друга.

Если несильно подействовать на брусок, лежащий на столе, силой F_1 направленной горизонтально, то брусок останется лежать на месте. Поскольку брусок не двигается с места, значит, появилась сила трения покоя $F_{\text{тр.пок}}$, которая уравновешивает силу F_1 .

Потянем брусок с большей силой, увеличится и сила трения покоя. Если эти опыты продолжить, мы сможем задействовать такую силу, при которой брусок сдвинется с места. В этот момент мы достигнем максимальной силы трения покоя.

Экспериментально установлено, что максимальная сила трения покоя пропорциональна силе реакции опоры:

$$F_{\text{тр.пок.max}} = \mu_0 N$$

Здесь μ_0 - максимальный коэффициент трения покоя, N - модуль силы реакции опоры.

Коэффициент трения - величина безгранична, зависящая от материалов осевательных тел и качества их обработки. Обычно коэффициент трения меньше единицы.

Причина возникновения сил трения покоя - это преимущественно сцепление неровностей осязательных тел.

Можно привести немало примеров полезного действия силы трения покоя. Благодаря этой силе, пальцы рук удерживают ручку и карандаш, а на болтах держатся гайки; стул не выскальзывает из-под нас вследствие наименьшего движения, а завязанный шнурок на обуви не развязывается.

Хотя сила трения покоя и препятствует относительному движению тел, но именно поэтому она часто «передает» механическое движение от одних тел к другим.

Действительно, делая шаг, человек толкает почву назад. При этом между подошвой и поверхностью дороги действует сила трения покоя. Сила трения покоя может разгонять и автомобили. Колесо автомобиля, вращаясь, толкает дорожное полотно назад, действуя на него силой трения покоя, ведь нижняя точка колеса покоится относительно дороги, если колесо катится без проскальзывания. При этом Земля толкает колесо (а вместе с ним и автомобиль, соединенный с колесом) вперед.

9. Сила трения скольжения

Когда тело скользит по поверхности другого тела, на него действует сила трения скольжения.

➤ *Сила трения скольжения - это сила, возникающая при скольжении одного тела по поверхности другого.*

На опыте можно показать, что модуль силы трения скольжения $F_{\text{тр.скол}}$ пропорциональна модулю силы нормального давления N :

$$F_{\text{тр.скол}} = \mu N$$

Коэффициент пропорциональности μ называется коэффициентом трения.

Следует обратить внимание учащихся на то, что соотношение $F_{\text{тр.скол}} = \mu N$ нельзя записывать в векторном виде, так как сила трения и сила нормального давления перпендикулярны друг другу.

При перемещении тела по горизонтальной поверхности горизонтально направленной силой сила нормальной реакции равна по модулю силе тяжести, поэтому в этом случае соотношение $F_{\text{тр.скол}} = \mu N$ принимает вид: $F_{\text{тр.скол}} = \mu mg$

Коэффициент трения зависит в основном от материалов, из которых изготовлены осязательные поверхности и качества обработки их поверхностей. Коэффициент трения определяют экспериментально. Например: сталь по стали - 0,2; сталь по льду - 0,015; резина по бетону - 0,75.

10. Сила трения качения

Если тело не скользит по поверхности другого тела, а катится, то трение, возникающее в месте их столкновения, называют трением качения.

К трению качения можно отнести трения колес железнодорожного вагона о рельсы, колес автомобиля о мостовую, трения при перекатывании бочек или труб о грунт и т.п.

При одинаковых нагрузок сила трения качения значительно меньше силы трения скольжения, поэтому в тех случаях, когда нужно уменьшить силу трения, трения скольжения заменяют трением качения. Для этого используют шариковые и роликовые подшипники. Применение шариковых или роликовых подшипников позволяет уменьшить силу трения в 20-30 раз.

Во время качения тело деформирует все новые и новые участки поверхности. Это является одной из причин возникновения силы трения качения. Обычно трение качения тем меньше, чем тверже поверхности соприкасаемых тел.

Трения, как и любое другое физическое явление, может быть и вредным, и полезным.

Когда трения вредное, его пытаются уменьшить. Для этого используют смазки, применяют магнитную или воздушную подушку, заменяют скольжения качением, применяют шариковые, роликовые или магнитные подшипники.

Когда трения полезное, его пытаются увеличить: в случае гололеда посыпают тротуары и автодороги песком, применяют шипы на обуви и автомобильных шинах. Трения позволяет осуществить торможение тел, движущихся и перемещения грузов конвейерной лентой.

11. Гравитационное взаимодействие

Теория гравитации - теория, созданная Ньютоном, является основой современной науки. Другая теория гравитации, разработанная Эйнштейном, является выдающимся достижением теоретической физики XX в. На протяжении столетий развития цивилизации человечества люди наблюдали явления взаимного притяжения тел и измеряли его величину; они пытались поставить это явление себе на службу, преодолеть его влияние и в последнее время - рассчитывать его с чрезвычайной точностью во время первых шагов исследования и постижения Вселенной.

Среди всех сил, существующих в природе, сила притяжения отличается, прежде всего, тем, что имеет свои проявления повсюду.

➤ *Гравитационное взаимодействие - это взаимодействие, присущая всем телам во Вселенной. Она проявляется в их взаимном притяжении друг к другу.*

Гравитационное взаимодействие осуществляется с помощью особого вида материи - гравитационного поля.

Гравитационное поле существует у любого тела: звезды или планеты, человека или книги, молекулы или атома. Гравитационное поле можно определить только в телах, имеющих значительную массу. Это означает, что гравитационное взаимодействие очень слабое.

12. Закон всемирного тяготения

Сделав многочисленные расчеты, Ньютон пришел к выводу, что все тела в природе притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Используя астрономические данные и математические вычисления, Ньютон сформулировал закон всемирного тяготения:

➤ *Две материальные точки массами m_1 и m_2 , находящиеся на расстоянии R друг от друга, притягиваются с силой*

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

Коэффициент пропорциональности G в законе всемирного тяготения называют **гравитационной постоянной**. Он численно равен силе, с которой притягиваются две материальные точки единичной массы (1 кг), находящиеся на единичном расстоянии (1 м) друг от друга.

Измерения показали, что $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$

Такое значение гравитационной постоянной объясняет, почему гравитационные силы между телами небольшой массы ничтожно малы, и мы их часто не замечаем. Ведь даже два шара, каждый массой в тонну, на расстоянии 1 м притягиваются друг к другу с силой только в 6,67 стотысячный долей ньютона. А для тел, имеющих большую массу (звезд и планет), эти силы достигают больших значений.

13. Сила притяжения и центр тяжести

Камень падает на Землю, потому что его притягивает Земля. Камень также притягивает Землю. Силы взаимодействия между камнем и Землей - это силы всемирного тяготения. Для нас особенно важное значение имеет сила притяжения тел к планете, на которой мы живем, - к Земле. Поэтому сила тяжести определяется как сила, с которой тело притягивается к Земле в определенном месте. Теперь мы можем добавить, что это частный случай гравитационных сил.

➤ *Силу, с которой Земля притягивает любое тело, называют **силой тяжести**.*

Во время свободного падения все тела у поверхности Земли движутся с одинаковым ускорением, называют ускорением свободного падения g . Это ускорение обусловлено действием на тело силы притяжения F_T .

Итак, второй закон Ньютона для тела, которое свободно падает, имеет вид: $F = mg$

Таким образом,

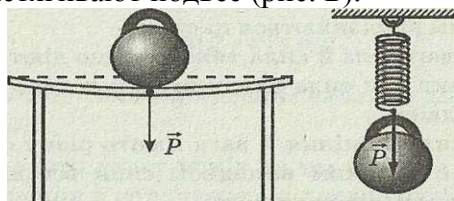
➤ *Сила тяжести, действующая на тело, пропорциональна массе этого тела.*

Сила притяжения действует на все тела. Но до какой точки приложена эта сила, если тело нельзя считать материальной точкой? Очень простой ответить на этот вопрос с помощью опыта. Возьмем тело произвольной формы, изготовленное из картона, и проколем его иглой. Слегка покачивая фигуру, можно убедиться в том, что она находится в равновесии. Вертикаль можно определить с помощью подвеса. В точке подвеса на тело действуют сила тяжести F_T и сила упругости нити $F_{упр}$. Под действием этих сил тело находится в состоянии равновесия. Поэтому, согласно второму закону Ньютона, $F_T + F_{упр} = 0$. Отсюда следует, что $F_T = -F_{упр}$, то есть сила тяжести и сила упругости направлены противоположно и линии их действия находятся на одной прямой. Повторим опыт, прикрепив иглу за подвесом в другой точке, и найдем новую линию действия силы. Проведенные линии действия силы тяжести пересекаются в одной точке. Эта точка и является центром тяжести тела.

➤ Точка приложения силы тяжести, действующей на тело, при любом его положении в пространстве называют **центром тяжести**.

14. Вес тела

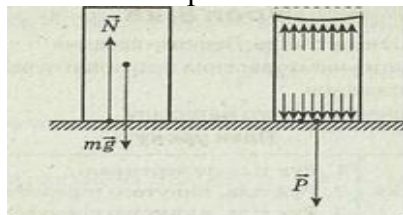
Вследствие земного притяжения все тела сжимают или прогибают сопротивления (рис. А) или растягивают подвес (рис. Б).



Для характеристики такого действия вводится понятие веса тела.

Весом тела называют силу, с которой тело, вследствие его притяжения к Земле, давит на опору или растягивает подвес.

Выясним причину возникновения веса тела. Для этого рассмотрим тело, лежащее на горизонтальной опоре.



На это тело действуют две силы: сила тяжести $F_T = mg$ и сила реакции опоры N . Поскольку эти силы приложены к разным точкам этого тела, то в результате действия этих сил тело деформируется (сжимается). В результате возникает сила упругости P , которая и действует на опору.

Силы N и P - это силы взаимодействия тела и опоры, поэтому, согласно третьему закону Ньютона, они одинаковы по модулю и противоположны по направлению:

$$N = -P.$$

Если тело и опора неподвижны относительно Земли (или совместно движутся равномерно и прямолинейно), то, согласно второму закону Ньютона, $N + mg = 0$.

Итак, $P = mg$.

С последнего равенства следует, что вес тела в состоянии покоя равен силе притяжения, действующей на это тело. Отсюда ошибочно можно сделать вывод о том, что вес и сила тяжести - это та самая сила. Рассмотрим, чем отличаются эти силы.

Во-первых, вес тела и сила тяжести, действующих на это тело, приложенным к разным телам: сила тяжести приложена к телу, а вес - к опоре или подвесу.

Во-вторых, сила притяжения и вес имеют разную физическую природу: сила притяжения является частным случаем силы всемирного тяготения, а вес обычно силой упругости.

В-третьих, сила притяжения равна весу тела только в том случае, если тело находится в состоянии покоя или движется с постоянной скоростью.

15. Невесомость

Во время свободного падения груза его ускорения $g = a$, поэтому $P = m(g - a) = 0$, то есть вес тела равен нулю. Говорят, что тело находится в состоянии невесомости.

➤ *Состояние, при котором вес тела равен нулю, называется состоянием невесомости.*

Следует отметить, что в состоянии невесомости вес тела равен нулю, но сила притяжения равна mg .

Характерным свойством состояния невесомости является отсутствие «внутреннего напряжений» в теле, например, отсутствие давления одних органов на другие в теле человека.

Длительного состояния невесомости испытывают космонавты в космическом корабле, когда его двигатели выключены. При этом космонавты вместе с космическим кораблем движутся под действием только сил тяжести (со стороны Земли, Луны или других космических тел).

Закрепление изученного материала по теме «Динамика»

1. Равнодействующая всех сил, действующих на тело равна нулю. Двигается ли это тело или находится в состоянии покоя?
2. Как будет двигаться тело под действием силы 10 Н?
3. Какая из приведённых ниже физических величин векторная?
4. На тело массой 1 кг действуют силы $F_1 = 3$ Н и $F_2 = 4$ Н, направленные на север и восток соответственно. Чему равно ускорение тела?
5. Два человека тянут веревку в противоположные стороны с силой 30 Н. Чему равна равнодействующая этих сил?
6. Определите вес деревянного бруска, движущегося под действием силы трения 20 Н, если коэффициент трения равен 0,2?
7. Как будет двигаться тело массой 4 кг под действием единственной силы 8 Н?
8. Чему равна сила взаимодействия между двумя телами массой по 1 кг, расстояние между которыми 1 м?
9. В инерциальной системе отсчета сила F сообщает телу массой m ускорение a . Как изменится ускорение тела, если массу тела в 2 раза увеличить, а действующую на него силу вдвое уменьшить?
10. На шар $m = 500$ г, движущийся со скоростью $v = 2 + 2t$, действует сила....
11. Определить вес тела массой 150 г движущегося вверх с ускорением 2 м/с².
12. Определить объём медного бруска, если на него действует сила тяжести 89 кН (плотность меди 8900 кг/м³)
13. Реактивный самолёт летит со скоростью 1440 км/ч. Считая, что человек может переносить пятикратное увеличение веса, определить радиус окружности, по которой может двигаться самолёт в вертикальной плоскости.

Лекция 5. Закон сохранения в механике

1. Импульс тела и импульс силы

Пусть два шарика массой m_1 и m_2 движутся со скоростями ϑ_0 и U_0 . В определенный момент времени они вступают во взаимодействие, которое продолжается Δt . При этом механическое движение передается от одного шара к другому. В результате взаимодействия скорости шаров становятся одинаковыми ϑ_1 и U_1 .

Согласно третьему закону Ньютона, $F_{12} = -F_{21}$ но $F_{12} = m_1 a_1$ и $F_{21} = m_2 a_2$. Итак, $m_1 a_1 = -m_2 a_2$.

Ускорения, полученные шариками в результате взаимодействия, будут одинаковыми:

$$a_1 = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_0}{\Delta t}; \quad a_2 = \frac{U_1 - U_0}{\Delta t}$$

Подставляя значение ускорения в предыдущее равенство, получаем:

$$m_1 \frac{\vartheta_1 - \vartheta_0}{\Delta t} = -m_2 \frac{U_1 - U_0}{\Delta t}.$$

Или:

$$m_1 v_1 - m_1 v_0 = -(m_2 U_1 - m_2 U_0) = m_2 U_0 - m_2 U_1$$

Отсюда получаем:

$$\Delta(m_1 v) = \Delta(m_2 U)$$

С последнего равенства видно, что изменение скорости тел, которые взаимодействуют, будет разной, но изменение величины произведения $m v$ будет одинаковой в обоих телах, которые взаимодействуют.

➤ Величина $m v$ получила название **импульс тела**. Она является мерой механического движения. При взаимодействии происходит передача импульса от одного тела к другому:

$$p = m v$$

Импульс тела - это векторная величина, равная произведению массы тела на его скорость и совпадает по направлению с направлением скорости.

Единицей измерения импульса в СИ является кг · м/с.

Под действием силы тело изменяет свою скорость, следовательно, меняется и импульс тела:

$$\Delta p = \Delta(m v) = m \Delta v$$

Поскольку $\Delta v = a \Delta t$, то $\Delta p = m a \Delta t$. С учетом того, что $m a = F$, получаем: $\Delta p = F \Delta t$.

➤ Произведение силы на время ее действия называют **импульсом силы**.

Единица измерения импульса силы в СИ - Н·с.

Второй закон Ньютона можно записать в виде: $\Delta p = F \Delta t$.

Изменение импульса тела равно импульсу силы, действующей на тело.

Если импульс тела меняется за очень короткий интервал времени, то возникают большие силы (удар, толчок, столкновение). Чтобы избежать слишком больших сил, необходимо увеличивать время действия силы.

2. Закон сохранения импульса

Рассмотрим систему тел, которые взаимодействуют только друг с другом и не взаимодействуют с другими телами. Такую систему тел называют замкнутой.

Систему тел, которые взаимодействуют можно примерно считать замкнутой и тогда, когда действия других тел компенсирует друг друга, или настолько малы, что ими можно пренебречь.

Перепишем ранее полученное равенство $m_1 v_1 - m_1 v_0 = m_2 U_0 - m_2 U_1$ в виде

$$m_1 v_1 + m_2 U_1 = m_2 U_0 + m_1 v_0$$

Этот вывод можно обобщить и использовать для исследования случая взаимодействия нескольких тел, важно лишь, чтобы система этих тел была замкнутой.

Закон сохранения импульса:

➤ *Суммарный импульс замкнутой системы тел остается неизменным при любой взаимодействии тел системы между собой:*

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 + m_3 v_3 + \dots + m_n v_n = const$$

3. Что такое механическая работа?

Мы очень часто используем понятие «работа» в повседневной жизни. Работой называют и подъем ведра из колодца, и доставку продуктов из магазина, и решение сложной задачи. Вспомним, что общепринятое понятие «работа» отличается от понятия «механическая работа». Например, в процессе поднятия груза на высоту h понятие механической и «биологической» работы совпадают.

Если мы просто держим в руках определенный груз и не передвигаемся, то мы выполняем определенную биологическую работу при сокращении мышц. С механической точки зрения, никакой работы здесь не происходит, так как отсутствует перемещение.

Про механическую работу говорят тогда, когда тело меняет свое положение в пространстве под действием силы.

С определением механической работы мы уже знакомы из курса физики 8 класса: если на тело действует постоянная сила F , направленная вдоль перемещения S тела, то работа этой силы $A = FS$

- Если сила направлена под углом α к перемещению тела, то работа $A = F \cdot S \cdot \cos \alpha$
- **Работа силы** равна произведению модуля силы на модуль перемещения и на косинус угла между направлением силы и направлением перемещения.

Единицей измерения работы в СИ является джоуль (Дж):

- Один джоуль - это работа, которую выполняет сила в 1 Н в процессе перемещения тела на 1 м направлении действия силы: $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м}$.

Из формулы для работы следует, что работа может быть положительной, равна нулю и быть отрицательной, в зависимости от того, какой угол составляет направление силы с направлением перемещения:

4. Работа различных сил

Работа силы тяжести

Вычислим работу внутренних сил системы, состоящей из Земли и поднятого над поверхностью Земли тела.

Если тело падает с определенной высоты, направление силы тяжести совпадает с направлением перемещения. При этом во время движения тела вниз работа силы тяжести положительна. Если тело массой m падает с высоты h , то работа силы тяжести равна:

$$A = mgh$$

Во время движения тела вверх сила притяжения уже направлена противоположно перемещению, поэтому в этом случае работа силы тяжести отрицательна. Итак, в случае подъема тела массой m на высоту h работа силы тяжести равна:

$$A = -mgh.$$

Работа силы упругости

В случае уменьшения деформации пружины сила упругости, действующая со стороны пружины, направленная так же, как перемещение, так работа силы упругости положительна.

Из закона Гука следует, что в случае уменьшения деформации пружины до нуля, модуль силы упругости уменьшается от kx до нуля, так среднее значение силы упругости равно:

$$F_{\text{упр}} = \frac{kx}{2}$$

При этом работа силы упругости определяется, как

$$A = F_{\text{упр}} \cdot x = \frac{kx}{2} \cdot x = \frac{kx^2}{2}$$

В случае увеличения деформации пружины сила упругости, действующая на тело со стороны пружины, направленная противоположно деформации. В этом случае работа силы упругости отрицательна.

Работа силы трения скольжения

Сила трения скольжения всегда направлена противоположно направлению скорости, а следовательно, и перемещению тела, поэтому работа силы трения скольжения всегда отрицательна.

5. Что такое мощность?

Для многих технических задач важна не только выполненная работа, но и скорость выполнения работы. Скорость выполнения работы характеризуют физической величиной, которую называют мощностью.

- **Мощность** - это физическая величина, численно равная отношению работы к промежутку времени, за который она выполнена:

$$P = \frac{A}{t}$$

Единица мощности в СИ - ватт (Вт):

- 1 Вт - это такая мощность, которая позволяет работе в 1 Дж выполниться за 1 с

Это, по сравнению, небольшая единица. В технике используются киловатт (1000 Вт), а иногда и мегаватт (10^6 Вт).

6. Мгновенная мощность

Подобно введению мгновенной скорости в кинематике, в динамике используют понятие «мгновенной мощности».

При перемещении Δx проекция силы F выполняет работу $A = F_x \Delta x$

- **Мгновенная мощность** - это скалярная физическая величина, равная отношению работы, выполненной за бесконечно малый промежуток времени, к величине этого промежутка:

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F_x \Delta x}{\Delta t} = F_x \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Поскольку скорость $v_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}$, то окончательно получаем:

$$P = F_x v_x$$

- **Мгновенная скорость** равна произведению проекций силы, действующей на тело, и скорости в направлении его перемещения.

Таким образом, чем больше скорость автомобиля, тем меньше сила тяги нужна для ее поддержания (при постоянной мощности двигателя):

$$F_x = \frac{P}{v_x}$$

Необходимая сила тяги обратно пропорциональна скорости автомобиля. С увеличением скорости водитель может переходить на повышенные передачи. При этом вращение колес будет происходить с большей скоростью, но с меньшим усилием.

Обычно быстрходные автомобили и поезда требуют двигатели с большей мощностью. Однако на самом деле во многих случаях сила сопротивления не постоянна, а растет с увеличением скорости. Если, например, нужно увеличить скорость самолета вдвое, то мощность его двигателей нужно увеличить в восемь раз. Вот почему так трудно дается каждый новый успех в увеличении скорости самолетов, кораблей и других транспортных средств.

7. Механическая энергия

В общем случае энергия характеризует движение и взаимодействие различных видов материи. Механическая энергия - это величина, характеризующая относительное движение тел и их взаимодействие, их способность выполнять работу.

Работа связана с перемещением, поэтому она может совершаться только при условии, что тела движутся. Если работа выполняется во время движения тел, которые взаимодействуют, меняется их взаимное положение. Кроме того, вследствие осуществления работы может изменяться скорость тел. То есть тело может выполнить работу только в случае изменения своего механического состояния: меняется или взаимное положение тел, или их скорости, или и то и другое.

Когда мяч падает вниз, меняется его положение относительно Земли. В случае деформации пружины меняется взаимное положение частиц, взаимодействующих и из которых состоит вещество пружины.

- **Способность тела выполнять работу вследствие изменения своего состояния характеризуют физической величиной, называется энергией.**

Механическая энергия тела определяется механическим состоянием тела, то есть взаимным положением тел и их скоростей. Если тело выполняет положительную работу вследствие изменения своего механического состояния, механическая энергия тела уменьшается.

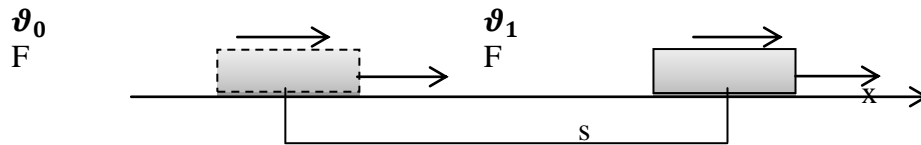
Поскольку мерой изменения энергии является работа, то энергия измеряется в тех же единицах, что и работа. Итак, единицей измерения энергии в системе СИ является джоуль. Например, если система выполняет положительную работу в 1 Дж, энергия системы уменьшается на 1 Дж.

Таким образом, работа в отличие от энергии, характеризует не состояние тела в определенной системе отсчета, а процесс перехода тела из одного состояния в другое.

8. Кинетическая энергия

Вычислим работу постоянной силы F , действующей на тело массой m в случае, когда тело движется прямолинейно и направление силы совпадает с направлением скорости.

Пусть тело осуществило перемещение s . В начальной точке наблюдения тело имеет скорость ϑ_0 , а в конечной ϑ . Направимось x так, чтобы все векторы имели с ней одинаковое направление (см. рис.).



Проекции всех векторов равны модулям этих векторов. Работа силы равна $A = Fs$, где $F = ma$. В случае прямолинейного равноускоренного движения перемещения тела и скорость связаны соотношением:

$$s = \frac{\vartheta^2 - \vartheta_0^2}{2a}$$

Подставляя в формулу работы выражение для F и s , имеем:

$$A = ma \frac{\vartheta^2 - \vartheta_0^2}{2a}, \text{ или } A = \frac{m\vartheta^2}{2} - \frac{m\vartheta_0^2}{2}$$

Величину, равную половине произведения массы тела на квадрат его скорости, называют кинетической энергией тела:

$$W_k = \frac{m\vartheta^2}{2}$$

Любое движущееся тело, имеет кинетическую энергию, пропорциональную, его массе и квадрату скорости.

➤ *Энергия, которой обладает тело вследствие своего движения, называется кинетической энергией.*

Необходимо обратить внимание учащихся на то, что значение кинетической энергии зависит от выбора системы отсчета, ведь кинетическая энергия тела зависит от его скорости, а скорость тела в различных системах отсчета разная.

С учетом определения кинетической энергии можно записать:

$$A = W_k - W_{k0} = \Delta W_k$$

Итак,

➤ *Работа силы равна изменению кинетической энергии тела.*

Это утверждение называют теоремой о кинетической энергии.

Если в начальный момент времени тело неподвижно, то

$$A = W_k$$

В этом заключается физический смысл кинетической энергии:

➤ *Кинетическая энергия тела массой m , движущегося со скоростью ϑ , равна работе, которую выполняет сила, чтобы передать телу, что находится в состоянии покоя, эту скорость.*

Кинетическая энергия увеличивается, если работа силы положительна, и уменьшается вследствие негативной работы.

9. Потенциальная энергия

Поднятое над Землей тело выполняет работу, когда оно движется вниз. При этом изменяется взаимное положение тела и Земли, действуют друг на друга.

➤ *Физическую величину, характеризующую способность системы тел (частей тела, которые взаимодействуют), выполнять работу вследствие изменения их взаимного положения, называют **потенциальной энергией**.*

Выясним, чему равна потенциальная энергия поднятого груза. При падении груза сила притяжения выполняет работу $A = mgh$. Итак, если с нулевым значением потенциальной энергии сопоставить положение груза на поверхности Земли, то потенциальная энергия поднятого груза $W_{\text{п}} = mgh$.

Когда работу выполняет деформация пружины, меняется взаимное положение частиц, из которых состоит пружина.

Когда деформация пружины уменьшается от начального значения x до нуля, сила упругости выполняет работу $A = \frac{kx^2}{2}$.

Итак,

- *потенциальная энергия деформированной пружины:*

$$W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$$

Эта формула означает, что работа силы упругости равна изменению потенциальной энергии пружины, взятой с противоположным знаком.

Изменение потенциальной энергии измеряется работой, которую может выполнить система тел вследствие изменения взаимного положения этих тел. Если все тела системы вернулись в свое первоначальное положение, потенциальная энергия системы не изменилась.

Итак,

- *потенциальную энергию можно определить только для сил, работа которых во время движения замкнутой траектории равна нулю.*

Работа силы тяжести не зависит от формы траектории движения тела и определяется только его начальным и конечным положением над поверхностью Земли.

- *Силы, работа которых не зависит от формы траектории, называются консервативными.*

10. Полная механическая энергия

Если бросить тело массой m вертикально вверх со скоростью ϑ_0 , то в момент броска на тело будет действовать сила наших мышц, в результате которой в теле появится кинетическая энергия:

$$W_{\text{к max}} = \frac{m\vartheta_0^2}{2}$$

При подъеме скорость тела уменьшается, при этом уменьшается и его кинетическая энергия. Поскольку тело движется вверх, его потенциальная энергия возрастает:

$$W_{\text{п}} = mgh,$$

где h - высота подъема тела. На максимальной высоте H кинетическая энергия тела равна нулю, а потенциальная энергия достигает максимального значения $W_{\text{п max}} = mgH$.

Из кинематики известно, что максимальная высота подъема равна: $H = \frac{\vartheta_0^2}{2g}$

Подставив это значение высоты в формулу потенциальной энергии, получим

$$W_{\text{п max}} = mgH = mg \frac{\vartheta_0^2}{2g} = \frac{m\vartheta_0^2}{2} = W_{\text{к max}}$$

Итак, вследствие подъема тела на максимальную высоту его кинетическая энергия полностью превращается в потенциальную энергию. Правильным является и обратное: в случае свободного падения тела на землю и в нижней точке его потенциальная энергия полностью превращается на одинаковую ей по модулю кинетическую энергию.

Тела могут иметь потенциальную и кинетическую энергию одновременно. Сумму потенциальной и кинетической энергии тела называют его полной механической энергией:

$$W = W_{\text{п}} + W_{\text{к}}$$

11. Закон сохранения энергии в механических процессах

Пусть в замкнутой системе тел, в которой не действуют силы трения, и нет неупругих деформаций, внутренние силы в процессе взаимодействия тел выполнили работу A . Эта работа приведет к изменению потенциальной и кинетической энергии системы. Выразим работу внутренних сил системы через изменения ее кинетической и потенциальной энергий:

$$A = W_{\text{к2}} - W_{\text{к1}} \quad \text{и} \quad A = -(W_{\text{п2}} - W_{\text{п1}})$$

Поскольку работа A одна та же, то, сравнив правые части этих равенств, получаем:

$$W_{\text{к2}} - W_{\text{к1}} = -(W_{\text{п2}} - W_{\text{п1}})$$

Сгруппировав члены, принадлежащие к тому же состоянию системы, получим:

$$W_{\text{к1}} + W_{\text{п1}} = W_{\text{к2}} + W_{\text{п2}}$$

В левой части равенства описывается полная механическая энергия системы в некоторый момент времени (до взаимодействия), а в правой - полная механическая энергия в другой момент времени (после взаимодействия).

Итак, в процессе движения тела его механическая энергия сохраняется. Этот и другие примеры позволяют сформулировать закон сохранения механической энергии:

- *если между телами системы действуют только силы притяжения и силы упругости, механическая энергия замкнутой системы тел сохраняется:*

$$W = W_p + W_k = \text{const}$$

Закрепление изученного материала по теме «Законы сохранения в механике».

1. Определить уменьшение импульса пули массой 10 г, летящей со скоростью 600 м/с, если она пробив стену, стала двигаться со скоростью 200 м/с.
2. Скорость пули при вылете из ружья 100 м/с, а её масса 3 г. Определить скорость отдачи ружья при выстреле, если его масса 4 кг.
3. Тело движется по горизонтальной поверхности под действием силы 20 Н, приложенной к телу под углом 60 градусов к горизонту. Определить работу этой силы при перемещении тела на 5 м.
4. Пуля массой 60 г летит равномерно и за 4 с пролетает 1,2 км. Определить величину кинетической энергии пули.
5. Определить среднюю мощность лебёдки, поднимающей груз массой 100 кг с постоянной скоростью на высоту 10 м за 20 секунд.
6. Тележка на американских горках начинает движение без начальной скорости в наивысшей точке на высоте 20 м над землёй. Она резко опускается до высоты 2 м и затем круто взмывает вверх до вершины следующей горы, которая расположена на высоте 15 метров. Какова скорость тележки в желобе на 15-метровой вершине, если потерями энергии на трение можно пренебречь.
7. Движение материальной точки описывается уравнением $x=20+2t-t^2$. Найти импульс через 2 с, если $m=2$ кг.
8. Какую скорость приобретает ракета массой 0,6 кг, если продукты горения массой 15 г вылетают из неё со скоростью 800 м/с?
9. Мальчик тянет санки, прилагая к верёвке силу 100 Н. Верёвка образует с горизонтом угол 30 градусов. Какую работу производит мальчик на пути 50 м?
10. Тело массой 1 кг, двигаясь ускоренно увеличило свою скорость с 2 м/с до 5 м/с. Определить изменение кинетической энергии тела.
11. Подъёмный кран поднял груз массой 4,5 тонны на 8 м. Мощность двигателя крана 9 кВт. Сколько времени затрачено на подъём груза?
12. Сани начинают скользить с горы высотой 20 м. Какую кинетическую энергию они приобретут в конце спуска? Трением пренебречь. Масса саней 3 кг.

Лекция 6. Механические колебания и волны

1. Механические колебания

Колебания - один из самых распространенных видов движения в природе и технике. Колеблются деревья в лесу, пшеница в поле, струны музыкальных инструментов, мембрана телефона. Колеблются плоскости и фюзеляж самолета, кузов автомобиля, поршни двигателя. Колебательные движения происходят и в жизни нашей планеты (землетрясения, приливы и отливы), и в астрономических явлениях. С колебаниями мы встречаемся и в живой природе: биение сердца, движение голосовых связок и т.п.

- *Колебаниями называются физические процессы, точно или приблизительно повторяются через одинаковые промежутки времени.*

В зависимости от физической природы различают механические и электромагнитные колебания.

Подвесим грузик на нитке, отведем его в сторону от положения равновесия и отпустим. Грузик начнет совершать колебания в сторону от положения равновесия, то есть осуществлять

периодическое движение. Колебания около положения равновесия осуществляет также грузик, подвешенный на пружине.

Механическими колебаниями называются такие движения тел, при которых через равные интервалы времени координаты движущегося тела, его скорость и ускорение, приобретают исходных значений.

2. Свободные и вынужденные колебания

Существуют два вида колебательных движений: свободные и вынужденные.

- **Свободные колебания** - это колебания, происходящие в механической системе под действием внутренних сил системы после кратковременного воздействия какой-то внешней силы.

К свободным колебаниям относятся, например, колебания маятника, груз на нитке, груз на пружине, чаши весов и т.д.

Можно дать ученикам еще одну формулировку определения свободных колебаний - энергетическое:

- **Свободные колебания** - это колебания, происходящие исключительно за счет первоначального запаса энергии, переданного системе.

Тело или систему тел можно «заставить» осуществлять колебания, применяя внешнюю периодическую силу. Скажем, качели можно раскачивать, периодически подталкивая ее.

- **Колебания, возникающие под действием внешних сил и изменяющиеся с течением времени по величине и направлению, называются вынужденными.**

Если вы говорите по телефону, то мембрана микрофона колеблется под действием колебаний воздуха, а воздух - под действием колебаний голосовых связок. Колебания мембраны микрофона и колебания воздуха - вынужденные.

Корпуса всех машин и механизмов, работающих также, совершают вынужденные колебания. Вынужденные колебания осуществляет диффузор громкоговорителя.

3. Условия существования свободных колебаний

Рассмотрим колебания груза на нитке или груза на пружине. В приведенных примерах система осуществляла колебания около положения устойчивого равновесия. Почему же колебания возникают именно вблизи этого положения системы? Дело в том, что во время отклонения системы от положения устойчивого равновесия, равнодействующая всех сил, приложенных к телу, стремится вернуть систему в положение равновесия. Эту равнодействующую так и называют - возвратно силой. Однако, вернувшись в состояние равновесия, система вследствие инерции «проскакивает» его. После этого снова возникает возвратно сила, направленная теперь в противоположную сторону. Так и возникают колебания.

Чтобы колебания продолжались долгое время, необходимо, чтобы силы трения или силы сопротивления были очень маленькими.

Итак, для того, чтобы в системе происходили свободные колебания, необходимо выполнение двух условий:

- система находится вблизи положения устойчивого равновесия;
- силы трения или силы сопротивления должны быть достаточно малыми.

4. Амплитуда колебаний

Во время колебаний смещение тела от положения равновесия периодически меняется.

- **Амплитуда колебаний** - это физическая величина, характеризующая колебательное движение и равна максимальному расстоянию, на которое отклоняется колеблющееся тело от своего положения равновесия.

Амплитуду колебаний обозначают символом A . Единица амплитуды колебаний в СИ - метр (м).

Амплитуда свободных колебаний определяется начальными условиями, то есть тем начальным отклонением или толчком, которым грузы на нитке или на пружине были приведены в движение.

Если груз на нити (или на пружине) оставить в покое, то через некоторое время амплитуда колебаний заметно уменьшится. Колебания, амплитуда которых с течением времени

уменьшается, называются затухающими. Колебания, амплитуда которых со временем не меняется, называются незатухающими.

5. Период и частота

Если груз на нитке за время t сделает N полных колебаний, то время одного полного колебания:

$$T = \frac{t}{N}$$

- **Период колебаний** - это промежуток времени, в течение которого происходит одно полное колебание.

Единица периода колебаний в СИ - секунда (с).

- **Частота колебаний** - это число полных колебаний, совершенных 1с:

$$\nu = \frac{1}{T}$$

Единица частоты колебаний в СИ - герц (Гц).

- 1 Гц соответствует частоте колебаний, при которых тело за 1 с совершает одно полное колебание.

Период и частота - взаимно обратные величины.

6. Циклическая частота

Обозначим циклическую частоту колебаний символом ω .

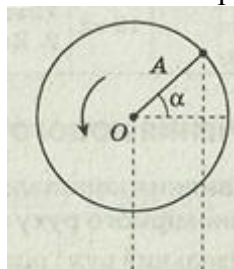
Циклическая частота равна числу полных колебаний, совершенных телом за 2π секунд:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$$

Единица циклической частоты колебаний в СИ - радиан в секунду (рад / с или 1 / с).

7. Гармонические колебания

Изучая движение материальной точки по окружности, мы отмечали, что координата материальной точки менялась по закону синуса или косинуса. Обратим внимание на расположенный ниже рисунок.



Если обозначить радиус круга, которое описывает шарик, через A , а начало координат совместить с центром окружности, то проекция радиус-вектора шарика на ось Ox равна $x = A \cos \varphi$, где-угол, на который вернулся шарик.

В случае равномерного движения по кругу $\varphi = \omega t$, где $\omega = \frac{2\pi}{T}$ скорость вращения шарика. Следовательно, уравнение движения тени шарика вдоль оси Ox имеет вид:

$$x = A \cos \frac{2\pi}{T} t$$

Поскольку тень от шарика и тень от тележки осуществляют абсолютно одинаковые движения, то уравнение колебаний точки на тележке будет одинаковым:

$$x = A \cos \frac{2\pi}{T} t \text{ или } x = A \cos \omega t$$

В этом уравнении x - координата точки в любой момент времени t ; A - амплитуда колебаний; T - период колебаний; ω - циклическая частота. Начало координат совпадает с точкой, в которой тележка находится в состоянии равновесия.

- Колебания, когда координата тела изменяется с течением времени по закону косинуса (или синуса), называются **гармоническими**.

Тележка, закрепленная на пружине, совершает гармонические колебания.

8. Фаза колебаний

Запишем еще раз уравнение гармонических колебаний: $x = A \cos \omega t$. Обозначим величину, которая записана под знаком косинуса, φ .

➤ **Фаза колебаний** - это величина, которая записывается под знаком косинуса или синуса в уравнении гармонических колебаний:

$$\varphi = \omega t.$$

Фаза колебаний определяет по заданной амплитудой состояние колебательной системы в любой момент времени. Колебания с одинаковыми амплитудами и частотами могут отличаться друг от друга фазами.

Если, изучая колебательное движение, включают секундомер не в тот момент, когда амплитуда колебаний была максимальной, а через некоторый промежуток времени, то уравнение колебаний будет иметь вид:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где φ_0 - начальная фаза, то есть фаза колебаний в момент времени $t_0 = 0$.

Если начало отсчета времени совпадает с моментом пребывания тела в положении равновесия, то в этот момент координата тела равна нулю, поэтому в этом случае уравнение колебаний имеет вид: $x = A \sin \omega t$.

9. Процесс колебаний пружинного маятника

Для того чтобы описать колебания (листья и колосья, воздух в органных трубах и трубах духовых музыкальных инструментов); для расчета вибрации (корпусов автомашин, укрепленных на рессорах; фундаментов зданий и станков), введем модель реальных колебательных систем - пружинный маятник.

➤ **Пружинный маятник** - это колебательная система, представляет собой тело, закрепленное на пружине.

Свободные колебания пружинного маятника, обусловленные:

1) действием на тело силы упругости, всегда направленной в сторону положения равновесия;

2) инертностью колеблющегося тела, благодаря которой оно не останавливается в положении равновесия, а продолжает двигаться в том же направлении.

10. Период колебаний пружинного маятника

Первый характерный признак колебаний пружинного маятника можно установить, постепенно увеличивая массу подвешенных к пружине грузиков. Подвешивая к пружине грузы различной массы, можно заметить, что с увеличением массы груза период колебаний груза увеличивается. Например, вследствие увеличения массы груза в 4 раза период колебаний увеличивается вдвое:

$$T \approx \sqrt{m}.$$

Второй характерный признак можно установить, изменяя пружину. Проведя серию измерений, легко обнаружить, что тот же груз быстрее колеблется на жесткой пружине и медленнее - на мягкой, то есть:

$$T \approx \frac{1}{\sqrt{k}}$$

Третья особенность пружинного маятника состоит в том, что период его колебаний не зависит от ускорения свободного падения. В этом нетрудно убедиться, используя метод «увеличения земного притяжения» за счет сильного магнита, который подкладывается под груз, который колеблется.

Таким образом,

➤ **Период колебаний пружинного маятника не зависит от ускорения свободного падения и тем меньше, чем меньше масса груза и жесткая пружины:**

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Зная период колебаний, легко вычислить частоту и циклическую частоту колебаний:

$$v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad \omega = 2\pi v = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

11. Уравнение гармонических колебаний

Рассмотрим колебания тележки с точки зрения динамики. На тележку при движении действуют три силы: сила реакции опоры N , сила притяжения mg и сила упругости $F_{\text{упр}}$. Запишем уравнения второго закона Ньютона в векторной форме:

$$N + mg + F_{\text{упр}} = ma$$

Спроектируем это уравнение на горизонтальную и вертикальную оси:

$$F_{\text{упр}x} = ma_x; \quad N - mg = 0.$$

В соответствии с законом Гука: $F_{\text{упр}x} = -kx$

Таким образом, имеем:

$$-kx = ma_x, \text{ или } a_x = -\frac{k}{m}x$$

Это уравнение называют уравнением свободных колебаний пружинного маятника.

Обозначим: $\omega^2 = \frac{k}{m}$. Тогда уравнение движения груза будет иметь вид:

$$a_x = -\omega^2 x.$$

12. Математический маятник

Чтобы вычислить период колебаний груза, висящего на нити, необходимо немного «идеализировать» задачу. Во-первых, будем считать, что размеры груза намного меньше длины нити, а нить - нерастяжимая и невесомая. Во-вторых, считать угол отклонения маятника достаточно малым (не более 10-15 °).

Математическим маятником называется идеализированная колебательная система. Рассмотрим колебания математического маятника. Для этого возьмем небольшой, но достаточно тяжелый, шарик и подвесим его на длинную нерастяжимую нить.

Причины, обуславливающие свободные колебания

- 1) воздействие на шарик сил, равнодействующая которых всегда направлена в сторону положения равновесия;
- 2) инертность колеблющегося шарика, благодаря которой он не останавливается в положении равновесия.

13. Период колебаний математического маятника

Циклическая частота колебаний математического маятника:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

Воспользовавшись соотношением $T = \frac{2\pi}{\omega}$, найдем формулу для периода колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

- Период свободных колебаний математического маятника не зависит от его массы, а определяется только длиной нити без трения, состоящая из невесомой и нерастяжимой нити, на которой подвешена материальная точка.

14. Преобразование энергии при отсутствии трения

Как известно, если трением можно пренебречь, механическая энергия замкнутой системы сохраняется. Рассмотрим, как меняются потенциальная и кинетическая энергии колебательной системы на примере колебаний груза, подвешенного на нитке. Если вывести систему из положения устойчивого равновесия, то ее потенциальная энергия увеличивается. В случае возвращения в положение устойчивого равновесия потенциальная энергия уменьшается, а кинетическая - увеличивается. В положении равновесия кинетическая энергия системы является максимальной. Итак,

- При колебаний происходят взаимные периодические превращения потенциальной и кинетической энергий.

Это распространяется и на действие пружинного маятника, если массой пружины можно пренебречь по сравнению с массой груза.

Периодически повторяющиеся переходы энергии из одного вида в другой и обратно, сопровождающих колебания маятников, характерные для любых колебаний вообще и является также характерным признаком, как наличие положения устойчивого равновесия, инертность и малое трение.

15. Зависимость энергии колебательной системы от амплитуды колебаний

Покажем на примере колебаний груза на пружине, что энергия колебательной системы пропорциональна квадрату амплитуды колебаний. Действительно, полная энергия системы равна потенциальной энергии при максимальном отклонении от положения равновесия, так как кинетическая энергия при этом равна нулю. Потенциальная энергия при максимальном отклонении от положения равновесия равна $\frac{kA_{max}^2}{2}$, где k - жесткость пружины, A_{max} - амплитуда колебаний. Расчеты показывают, что энергия колебательной системы пропорциональна квадрату амплитуды колебаний для любых гармоничных колебаний.

16. Скорость и ускорение при колебаниях

Какие максимальные значения скорости и ускорения при колебаниях? Ответить на этот вопрос также поможет закон сохранения энергии. Рассмотрим колебания груза на пружине. Когда система проходит положение равновесия, ее потенциальная энергия равна нулю, а кинетическая - максимальная и равна $\frac{m\vartheta_{max}^2}{2}$, где m - масса груза, ϑ_{max} - максимальное значение модуля скорости.

Согласно закону сохранения энергии, кинетическая энергия при прохождении системой положения равновесия равна ее потенциальной энергии при максимальном отклонении от положения равновесия, т.е. $\frac{m\vartheta_{max}^2}{2} = \frac{kA_{max}^2}{2}$. Из этого следует

$$\vartheta_{max} = \sqrt{\frac{k}{m}} A_{max}$$

Вспомним, что $\sqrt{\frac{k}{m}} = \omega$, где ω - циклическая частота.

Таким образом,

$$\vartheta_{max} = \omega A_{max}$$

Покажем, что точно такое соотношение связывает максимальные значение ускорения с максимальным значением скорости. Для гармонических колебаний справедливо уравнение $a_x = -\omega^2 x$, откуда получаем: $a_x = \omega^2 A_{max}$. С учетом того, что $\vartheta_{max} = \omega A_{max}$, имеем: $a_x = \omega \vartheta_{max}$

17. Преобразование энергии при наличии трения

В любой реальной колебательной системе имеется трения, хотя во многих случаях его роль незначительна. Например, тяжелый груз, подвешенный на достаточно длинной нити, может осуществлять малые колебания в течение многих часов.

- Колебания, амплитуда которых с течением времени не меняется, называются **незатухающими**.

Если же силы трения можно сравнить с силами упругости и тяжести, действующих в системе, то механическая энергия системы с течением времени заметно уменьшаться. Поскольку механическая энергия пропорциональна квадрату амплитуды, то в случае уменьшения энергии уменьшится и амплитуда колебаний. В таком случае говорят, что колебания затухают.

- Колебания, амплитуда которых с течением времени уменьшается, называются **затухающими**

18. Вынужденные колебания

Тело или систему тел можно «заставить» осуществлять колебания, прикладывая внешнюю периодическую силу. Скажем, качели можно раскачивать, периодически подталкивая ее.

- *Колебания, происходящие под действием внешних сил, которые периодически меняются, называют **вынужденными**.*

Частота свободных колебаний определяется характеристиками системы. Эта частота называется собственной частотой и обычно обозначаются ν_0 .

Например, для пружинного маятника $\nu_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$, то есть собственная частота определяется жесткостью пружины и массой груза.

Для математического маятника $\nu_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$, то есть собственная частота ν_0 определяется ускорением свободного падения и длиной маятника.

- *Частота вынужденных колебаний любой колебательной системы всегда равна частоте внешней силы.*

Амплитуда вынужденных колебаний не уменьшается со временем, даже если в системе имеется трения, потому что потери механической энергии, обусловлены трением, заполняются за счет работы внешних сил.

Вынужденные колебания широко применяются в различных вибрационных машинах, с помощью которых уплотняют почву и бетон, забивают сваи в твердую почву, бурят горные породы, прокладывают водопроводные трубы под землей.

19. Резонанс

Раскачивая качели, желательнее толкать ее в такт с ее собственной частотой: в таком случае раскачивания будет наиболее эффективным. Этот факт указывает на то, что амплитуда вынужденных колебаний существенно зависит от частоты внешней силы. Опыты показывают, что амплитуда вынужденных колебаний тем больше, чем ближе частота внешней силы к собственной частоте колебаний.

- *Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний вследствие стечения частоты внешней силы с собственной частотой системы называется **резонансом**.*

В случае резонанса направления внешней силы совпадает с направлением движения, поэтому вдоль каждого колебания внешняя сила выполняет положительную работу. Именно эта «согласованность» и приводит резонанс. Если же частота внешней силы отличается от собственной частоты системы, внешняя сила направлена то в направлении движения, то против него. В результате действие внешней силы будет значительно менее эффективной.

20. Механическая волна

Источниками волн является колеблющиеся тела. Если такое тело находится в какой-либо среде, колебания передаются прилегающим частицам вещества. А поскольку частицы вещества взаимодействуют друг с другом, колеблющиеся частицы передают колебания своим «соседям». В результате колебания начинают распространяться в пространстве. Так и возникают волны.

- ***Волной** называют процесс распространения колебаний с течением, времени.*

Механические волны в среде обусловлены упругими деформациями среды. Образование различных волн объясняется существованием силовых связей между частицами, участвующих в колебаниях.

Любая волна переносит энергию, ведь волна - это колебание, распространяющиеся в пространстве, а любые колебания, как мы знаем, имеют энергию. Механическая волна переносит энергию, но не переносит вещество.

21. Поперечные и продольные волны

Во время распространения волны частицы среды колеблются в пределах определенного положения равновесия и не перемещаются вдоль шнура. В зависимости от направления колебаний частиц, относительно направления распространения волны, различают волны поперечные и продольные.

- Волны, в которых частицы среды во время колебаний сдвигаются в направлении, перпендикулярном направлению распространению, называются **поперечными**.

Итак, деформации в среде вследствие распространения поперечной волны - это деформации сдвига в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны.

Поперечные волны могут распространяться только в твердых телах. Дело в том, что такие волны обусловлены деформациями сдвига, а в жидкостях и газах не существует деформаций сдвига: жидкости и газы не «сопротивляются» изменению формы.

Для поперечных волн характерно образование холмов и впадин, перемещающихся со скоростью распространения волны.

Это обусловлено тем, что каждая следующая точка шнура колеблется в направлении, перпендикулярном к нему, с опозданием в фазе относительно предыдущей. Именно это различие в фазе и приводит к изменению формы, то есть бугров и впадин. Такая волна называется бегущей.

Волны, в которых частицы среды при колебании сдвигаются вдоль направления распространения волны, называются продольными.

Пример продольной волны - бегущая волна по мягкой пружине, когда один ее конец совершает колебания под действием периодической внешней силы, направленной вдоль пружины.

22. Длина волны

Если источник волн осуществляет гармонические колебания, то каждая точка среды, в которой распространяется волна, также осуществляет гармонические колебания, причем с той же частотой, что и источник волн. В этом случае волна имеет характерную синусоидальную форму. Максимум волны называют ее гребнями.

- Частоту колебаний каждой точки среды называют **частотой волны** ν . Величину, обратную частоте, называют **периодом волны**: $\nu = \lambda v$
- **Длина волны** λ - это расстояние между двумя ближайшими точками, колеблющимися в одной фазе.

За время одного полного колебания волна распространяется на расстояние, равное длине волны, поэтому можно дать еще одно определение длине волны:

- Расстояние, на которое распространяются колебания за время одного периода, называется **длиной волны**.

Поскольку скорость волны для определенной среды – величина постоянная, то ее можно вычислить по формуле: $\nu = \frac{s}{t}$. С учетом того, что $t = T$ и $s = \lambda$, получаем: $\nu = \frac{\lambda}{T}$. Но $\frac{1}{T} = v$ следовательно получаем:

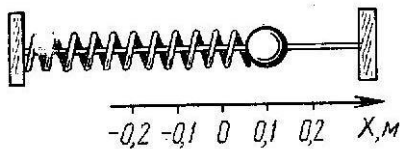
$$\nu = \lambda v$$

Эту формулу называют формулой волны.

Скорость волны зависит от свойств среды, в которой эта волна распространяется. В твердых телах скорость продольных волн больше скорости поперечных. Это обстоятельство используется, например, для определения местоположения эпицентра землетрясений. Во время землетрясения образуются волны обоих типов, поэтому, зная скорость продольных и поперечных волн в земной коре и время запаздывания поперечной волны, можно определить от расстояния до эпицентра землетрясения.

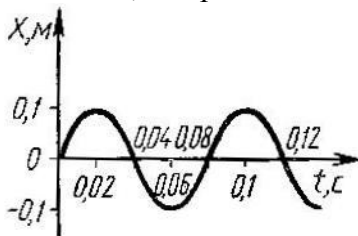
Закрепление изученного материала по теме «Механические колебания и волны»

1. Период колебаний пружинного маятника 0,5с. Чему равна частота колебаний?
2. Шарик на пружине совершает свободные колебания около положения равновесия $x=0$, перемещаясь из точки с координатой $x=0,1\text{м}$ в точку с координатой $x=-0,1\text{м}$ (см. рис.) и обратно. Чему равна амплитуда колебаний шарика?



3. Амплитуда свободных колебаний тела равна 50 см. Какой путь прошло это тело за $\frac{1}{4}$ периода колебаний?

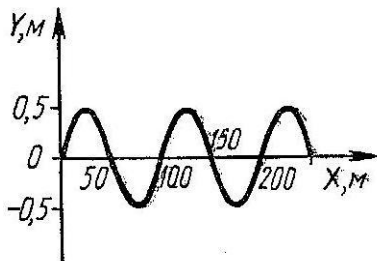
4. На рисунке представлена зависимость координаты тела, совершающего гармонические колебания, от времени? Чему равен период колебаний?



5. Как изменится период колебаний математического маятника при увеличении амплитуды его в 2 раза?

6. Упругие продольные волны могут распространяться ...

7. На рисунке представлен график волны. Чему равна длина волны?



8. Какова глубина моря, если посланный и отраженный сигналы от морского дна возвратились через 1,5 с? Скорость звука в воде принять равной 1500 м/с.

9. Определите скорость распространения волны, если ее длина 5 м, а период колебаний 10 с?

10. Как изменится период колебания нитяного маятника длиной 1 м, если нить удлинить на 3 м?

11. Амплитуда малых свободных колебаний пружинного маятника 9 см, масса груза 100 г, жесткость пружины 40 Н/м. Определите максимальную скорость колеблющегося груза.

Раздел 2. Молекулярная физика и термодинамика

Лекция 7. Молекулярно-кинетическая теория. Агрегатные состояния вещества

1. Основные положения молекулярно-кинетической теории и ее подтверждение на основе опытов

Вещество может находиться в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном. Молекулярная физика - раздел физики, в котором изучаются физические свойства тел в различных агрегатных состояниях на основе их молекулярного строения.

Молекулярно-кинетическая теория зародилась в XIX-м веке с целью объяснить строение и свойства вещества на основе представлений о том, что вещество состоит из мельчайших частиц - молекул, которые непрерывно движутся и взаимодействуют друг с другом. Особенных успехов эта теория достигла во время объяснения свойств газов.

➤ *Молекулярно-кинетической теорией* называют учение о строении и свойствах вещества на основе представлений о существовании атомов и молекул как наименьших частиц химических веществ.

В основе МКТ лежат три основных положения:

1) все вещества образованы из мельчайших частиц - молекул, которые сами состоят из атомов. Молекулы и атомы представляют собой электрически нейтральные частицы. При определенных условиях молекулы и атомы могут приобретать дополнительный электрический заряд и превращаться в положительные или отрицательные ионы;

2) атомы и молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении;

3) частицы взаимодействуют друг с другом силами, имеющими электрическую природу.

Самым ярким экспериментальным подтверждением представлений о молекулярно-кинетической теории (беспорядочное движение атомов и молекул) является броуновское движение. Это тепловое движение мельчайших микроскопических частиц, взвешенных в жидкости или газе. Оно было открыто английским ботаником Р. Броуном в 1827г. Броуновские частицы движутся под влиянием беспорядочных ударов молекул. Из-за хаотичного теплового движения молекул эти удары никогда не уравновешивают друг друга. В результате скорость броуновской частицы беспорядочно изменяется по модулю и направлению, а ее траектория образует сложную зигзагообразную кривую.

Теория броуновского движения была создана А. Эйнштейном в 1905 году. Экспериментально теория Эйнштейна была подтверждена в опытах французского физика Ж. Перрена, проведенных в 1908- 1911г. Постоянное хаотическое движение молекул вещества проявляется также в другом явлении, которое легко наблюдать, - диффузии.

➤ *Диффузией* называется явление проникновения двух или нескольких соприкасающихся веществ друг в друга.

Быстрее процесс протекает в газе, если он неоднороден по составу. Диффузия приводит к образованию однородной смеси, независимо от плотности компонентов. Диффузия и броуновское движение - родственные явления. Взаимное проникновение соприкасающихся веществ друг в друга и беспорядочное движение мельчайших частиц, находящихся в жидкости или газе, происходят вследствие хаотичного теплового движения молекул.

2. Основная задача МКТ

Параметры газа, связанные с индивидуальными характеристиками составляющих его молекул, называются *микроскопическими параметрами* (массы молекул, их скорости, концентрация). Параметры, характеризующие состояние макроскопических тел без учета их молекулярного строения, называются *макроскопическими параметрами* (объем, давление, температура).

➤ *Соотношение между макроскопическими параметрами - объемом и давлением - называется уравнением состояния.*

Основная задача молекулярно-кинетической теории: установить связь между макроскопическими и микроскопическими параметрами вещества и, исходя из этого, найти уравнения состояния этого вещества. Например, зная массу молекул, их средние скорости и

концентрацию, можно найти объем, давление и температуру данной массы газа, а также определить давление газа, если известны его объем и температура.

3. Масса и размеры молекул

Массы отдельных молекул и атомов очень малы. Например, в 1 г воды содержится $3,7 \cdot 10^{22}$ молекул. Итак, масса одной молекулы воды (H_2O) равна:

$$m_{H_2O} = \frac{1}{3,7 \cdot 10^{22}} = 2,7 \cdot 10^{-23} \text{ кг}$$

Массы такого же порядка имеют молекулы других веществ (кроме огромных молекул органических веществ). Например, белки имеют массу, в сотни тысяч раз больше массы отдельных атомов. Но все равно их массы в макроскопических масштабах (граммах и килограммах) чрезвычайно малы.

Приблизительную оценку размеров молекул можно получить из опытов, проведенных немецким физиком В. Рентгеном и английским физиком Д. Рэлея. Если капнуть на поверхность воды капельку масла, то капля расплывется, образуя тонкую пленку толщиной всего лишь в одну молекулу. Толщину этого слоя нетрудно определить и тем самым оценить размеры молекулы масла. Объем V ($0,001 \text{ см}^3$) слоя масла равен произведению площади его поверхности S (6000 см^2) на толщину слоя d , то есть $V = Sd$. Следовательно, размер молекулы масла равна:

$$d = \frac{0,001}{6000} = 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ см}$$

На данный момент существует ряд методов, позволяющих определить размеры молекул и атомов. Например, линейные размеры молекул кислорода составляют $3 \cdot 10^{-10}$ м, воды - примерно $2,6 \cdot 10^{-10}$ м. Таким образом, характерной длиной в мире молекул является размер 10^{-10} м. полезно не только запомнить этот параметр (10^{-10} м), но и образно представить его себе. Это поможет нам войти в мир молекул. Легко проверить если молекулу воды увеличить до размеров яблока, то именно яблоко станет размером с земной шар.

4. Количество вещества

В прошлом веке итальянский ученый Авогадро обнаружил удивительный факт: если два разных газа находятся в сосудах с одинаковым объемом, одинаковой температурой и давлением, то в каждой сосудах находится одно и то же число молекул. Заметьте, массы газов при этом могут отличаться очень сильно: например, если в одном сосуде водород, а в другом - кислород, масса кислорода в 16 раз больше массы водорода. Это означает, что некоторые, причем достаточно важные, свойства тела определяются числом молекул в этом теле: число молекул оказывается даже более существенным, чем масса.

➤ *Физическая величина, которая определяет число молекул в данном теле, называется количеством вещества и обозначается буквой ν .*

Так как массы отдельных молекул отличаются друг от друга, то одинаковые количества различных веществ имеют разную массу. Например, 10^{25} молекул водорода и 10^{25} молекул кислорода считаются одинаковым количеством вещества, хотя имеют разные массы (33,45 г и 531,45 г соответственно). Таким образом, масса не является мерой количества вещества. Единицей количества вещества является моль:

➤ *один моль - это количество вещества, которое содержит столько же молекул, сколько атомов углерода содержится в 12 г углерода.*

Для большинства расчетов (в том числе при решении задач) можно принять, что один моль содержит столько же молекул, сколько атомов водорода содержится в 1 г водорода.

5. Относительная молекулярная масса

Массы отдельных молекул очень малы. Например, масса одной молекулы воды около $3 \cdot 10^{-26}$ кг. Молекулы других веществ имеют массы такого же порядка. Так как массы молекул очень малы, удобно использовать в расчетах не абсолютные значения масс, а относительное. По международным стандартам массы всех атомов и молекул сравнивают с $1/12$ массы атома углерода. Главная причина такого выбора заключается в том, что углерод входит в большое число различных химических соединений. Однако для большинства расчетов (в том числе при

решении задач) можно принять, что одна атомная единица массы (1 а.е.м.) равна массе атома водорода.

- Массу молекулы, выраженную в атомных единицах массы, называют **относительной молекулярной массой**. Относительная молекулярная масса обозначается M_r .

Относительная молекулярная масса M_r равен отношению массы молекулы m_0 данного вещества к $1/12$ массы атома углерода то m_{0c} :

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0c}}$$

Аналогично относительной молекулярной массе определяется и **относительная атомная масса**, как масса атома, выраженная в атомных единицах массы. Значение относительной атомной массы для данного вещества можно найти с помощью таблицы Менделеева, округлив приведенное в ней значение к целому.

6. Постоянная Авогадро

Число N молекул, содержащихся в теле, пропорционально количеству вещества ν , содержащиеся в этом теле: $N \sim \nu$. Коэффициент пропорциональности называют постоянной Авогадро и обозначают N_A .

- Количество молекул в одном моле называется **постоянной Авогадро**: $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ л / моль}$.

Масса одного моля воды, содержащей N_A молекул, равна 18 г, а масса одной молекулы воды равна 18 а.е.м. Таким образом, постоянная Авогадро является переводным множителем между граммом и атомной единицей массы: в одном грамме содержится N_A атомных единиц массы.

Так как постоянная Авогадро численно равна числу молекул в одном моле, то

$$N_A = \frac{N}{\nu}$$

Если количество вещества в данном теле известно, то легко найти число молекул N в этом теле:

$$N = \nu N_A.$$

7. Молярная масса

- Массу одного моля вещества называют **молярной массой**.

Масса m тела пропорциональна количеству вещества ν , содержащемуся в данном теле. Поэтому отношение m/ν характеризует вещество, из которого состоит это тело: чем «тяжелее» молекулы вещества, тем больше это отношение.

- Отношение массы вещества m количеству вещества ν называется **молярной массой** и обозначается M :

$$M = \frac{m}{\nu}$$

Если взять в этой формуле $\nu = 1$, получим, что молярная масса вещества численно равна массе одного моля этого вещества.

Единицей измерения молярной массы в СИ является кг / моль, поскольку масса измеряется в килограммах, а количество вещества - в молях. Например, молярная масса водорода равна $M = 2 \text{ г / моль} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг / моль}$.

Если молярная масса M и количество вещества известны, можно найти массу вещества: $m = \nu M$.

Знание постоянной Авогадро позволяет найти массу одной молекулы. Действительно, пусть тело содержит 11 моль вещества. Тогда масса тела численно равна M , а число молекул в нем численно равно N_A . Обозначая массу одной молекулы m_0 , получаем

$$m_0 = \frac{M}{N_A}$$

Можно сказать, что N_A - это «мостик» между макромиром (миром окружающих нас тел) и микромиром (миром атомов и молекул). Если данное тело содержит ν молей вещества, то число молекул N в этом теле определяется выражением:

$$N = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A$$

➤ Отношение числа молекул N к объему V , занимаемому этими молекулами, называется **концентрацией молекул** и обозначают:

$$n = \frac{N}{V}$$

8. Газообразное состояние вещества

Свойства газов определяются в основном движением молекул, поскольку взаимодействие молекул можно пренебречь. В связи с тем, что молекулы во всех газах движутся практически одинаково, свойства различных газов подобные.

Молекулы в газах расположены не вплотную - в среднем на расстояниях, намного превышающие размеры самих молекул. Например, в воздухе расстояние между молекулами примерно в 10 раз больше размеров молекул. Газы легко сжимаются, при этом уменьшается среднее расстояние между молекулами.

Молекулы с огромными скоростями - сотни метров в секунду - движутся в пространстве. Сталкиваясь, они отталкиваются друг от друга в разные стороны, подобно бильярдным шарам. Слабые силы притяжения молекул газа не способны удержать их рядом друг с другом. Численные удары молекул о стенки сосуда создают давление газа

9. Жидкое состояние вещества

Молекулы жидкости расположены почти вплотную друг к другу, поэтому молекула жидкости ведет себя иначе, не как молекула газа. Запертая, как в клетке, другими молекулами, она осуществляет «бег на месте» (колеблется около положения равновесия, сталкиваясь с соседними молекулами). Только время от времени она осуществляет «скачок», прорываясь через «прутья клетки», но сразу же в новую «клетку», образованную новыми соседями. Время оседлой жизни молекулы воды, то есть время колебания около одного определенного положения равновесия при комнатной температуре, так же в среднем 10^{-11} с. А время одного колебания значительно меньше (10^{-12} - 10^{-13} с). С повышением температуры время оседлой жизни молекул уменьшается.

Молекулы жидкости находятся непосредственно рядом друг с другом. При попытке изменить объем жидкости начинается деформация самих молекул. Для этого нужны очень большие силы. Этим и объясняется малое сжатия жидкостей.

Как известно, жидкость может вытекать, то есть не сохраняет свою форму. Объяснить это можно так. Если жидкость не течет, то «скачки» молекул с одной оседлого положения в другое происходят с одинаковой частотой во всех направлениях. Внешняя сила заметно не изменяет число прыжков молекул в секунду. Но перемещение молекул с одного оседлого положения в другое происходит преимущественно в направлении действия внешней силы. Вот почему жидкость течет и принимает форму сосуда.

10. Твердое состояние вещества

Атомы или молекулы твердых тел колеблются около определенных положений равновесия. Иногда молекулы изменяют положение равновесия, но происходит это редко. Вот почему твердые тела сохраняют не только объем, но и форму.

Если соединить центры положений равновесия атомов твердого тела, то получится правильная пространственная сетка, которая называется кристаллической.

Внутренний порядок в расположении атомов кристаллов влиял на формирование правильных внешних геометрических форм.

Лекция 8. Уравнение состояния идеального газа. Уравнение Менделеева-Клапейрона

1. Модель идеального газа

Конечно, в основе построения любой теории лежит метод моделей, который заключается в том, что вместо реального физического объекта или явления рассматривают его упрощенную модель. В МКТ газов используется модель идеального газа.

С точки зрения молекулярных представлений, газы состоят из атомов или молекул, расстояния между которыми значительно больше их размеры. В результате силы взаимодействия между молекулами газов практически отсутствуют. Взаимодействие между ними фактически происходит только во время кратковременных столкновений.

Поскольку взаимодействие молекул идеального газа сводится только к кратковременным столкновениям и размеры молекул не влияют на давление и температуру газа, мы можем считать, что: идеальный газ - набор невзаимодействующих материальных точек.

➤ *Модель реального газа, в которой пренебрегают размерами молекул газа и их взаимодействием между столкновениями, называют идеальным газом.*

2. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа

Основная задача молекулярно-кинетической теории газа состоит в том, чтобы установить соотношение между давлением газа и его микроскопическими параметрами - массой молекул, их средней скоростью и концентрацией. Это соотношение называется основным уравнением молекулярно-кинетической теории газа.

Поскольку давление газа на стенку сосуда обусловлено ударами молекул, давление газа пропорционально концентрации молекул n : чем больше молекул в единице объема, тем больше ударов молекул о стенку за единицу времени. Каждая молекула при ударе о стенку передает ей импульс, пропорциональный импульсу молекулы, равно по модулю $m_0 v$, где v - модуль скорости молекулы. Поэтому можно было бы ожидать, что давление пропорционально $nm_0 v$, где v - среднее значение модуля скорости молекул.

Однако, на самом деле давление пропорционально не первой, а второй степени скорости, так как, чем больше скорость молекулы, тем чаще она бьется о стенку сосуда. И действительно, расчеты показывают, что основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа имеет вид:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 v^2,$$

где m_0 - масса одной молекулы газа, n - концентрация молекул, v^2 - среднее значение квадрата скорости молекул.

Коэффициент $1/3$ обусловлен трехмерностью пространства - тем, что во время хаотического движения молекул все три направления равноправны.

Итак, немецкий физик Р. Клаузиус выяснил, что давление идеального газа прямо пропорционален концентрации частиц, массы частицы и среднего значения квадрата скорости частицы.

Полученное уравнение связывает макроскопическую величину - давление, - что может быть измерено манометром, с микроскопическими величинами, характеризующими молекулы, и является как бы мостом между двумя мирами: макроскопическим и микроскопическим.

3. Связь давления со средней кинетической энергией молекулы

Если через E обозначить среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекулы

$$E = \frac{m v^2}{2}, \text{ то}$$

$$p = \frac{2}{3} n E$$

Давление идеального газа пропорционально произведению концентрации молекул на среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекулы

В этой формуле концентрация частиц характеризует число ударов молекул о поршень, а средняя кинетическая энергия молекул определяют интенсивность одного удара.

4. Абсолютная температура как мера средней кинетической энергии частиц

Способ определения температуры не связан со свойствами одного конкретного вещества. Для определения температуры можно предложить применение свойств газов, которые были обнаружены экспериментально: при нагревании газ занимает постоянный объем, до 1°C его давление повышается на величину, равную $1/273$ давления при температуре 0°C : $p = p_0 (1 + \alpha t)$, где p и p_0 – соответственно давление газа при температуре $t^\circ\text{C}$ и 0°C , а $\alpha = \frac{1}{273}$ термический коэффициент давления.

Соединив сосуды, в которых находится газ, с манометром, можно измерить температуру по показаниям манометра. При этом следует обратить внимание на странный факт: при температуре $t = -273^\circ\text{C}$ давление газа должно быть равно нулю. Естественно брать эту температуру как точку отсчета новой температурной шкалы, оставив в качестве второй точки отсчета температуру таяния льда при нормальных условиях.

Если при температуре ноль термометрическая величина превращается в ноль, то такая шкала называется абсолютной шкалой температур, и температура, считалась по такой шкале, называется *абсолютной температурой*. Описанную выше шкалу называют шкалой Кельвина, а единицу температуры в этой шкале - градусом Кельвина (обозначение: К).

Например, абсолютному нулю (температуры $t = -273^\circ\text{C}$) отвечает $T = 0\text{ К}$, а температуре таяния льда ($t = 0^\circ\text{C}$) соответствует $T = 273\text{ К}$. Соотношение между T и t выражается формулой:
$$T = t + 273.$$

Экспериментально доказано, что давление разреженного газа в сосуде постоянного объема V изменяется прямо пропорционально его абсолютной температуре: $p \sim T$. С другой стороны, опыт показывает, что при неизменных объеме V и температуре T давление газа изменяется прямо пропорционально концентрации n молекул газа, т.е. числу молекул газа в единице объема. Для любого разреженного газа справедливо соотношение:

$$p = nkT$$

где k – некоторая универсальная для всех газов постоянная величина. Ее называют постоянной Больцмана, в честь австрийского физика Л. Больцмана, одного из создателей молекулярно-кинетической теории. Постоянная Больцмана – одна из фундаментальных физических констант. Ее численное значение в СИ равно:

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

$$\text{Сравнивая соотношения } p = nkT \text{ и } p = \frac{2}{3} nE, \text{ можно получить: } E = \frac{3}{2} kT$$

Средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул газа прямо пропорциональна абсолютной температуре. Таким образом, температура есть мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул.

5. Соотношение Клапейрона

Величинами, определяющими состояние газа, являются: давление p , под которым находится газ, его температура T и объем V . Их называют параметрами состояния. Перечисленные три величины не являются независимыми. Каждая из них является функцией двух других. Уравнение, связывающее все три параметра - давление, объем и температуру газа для данной его массы, - называется уравнением состояния и может быть в общем виде записано так:

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

Это означает, что состояние газа определяется только двумя параметрами (например, давлением и объемом, давлением и температурой или объемом и температурой), третий параметр, однозначно, определяется двумя другими. В первой половине 19-го века французский физик Клапейрон вывел соотношение, связывающее эти три параметра - уравнение Клапейрона (уравнение состояния для данной массы газа).

$$\frac{pV}{T} = \text{const}$$

Для данной массы произведение давления газа на его объем, разделены на абсолютную температуру газа, есть величина постоянная.

Если газ переводят из состояния 1 в состояние 2, то параметры, которые характеризуют газ в каждом из состояний, связанные выражением:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

6. Закон Авогадро

Чтобы убедиться в том, что значение выражения $\frac{pV}{T}$ не всегда является постоянным, наберите воздуха в щеки: одновременно увеличится и давление, и объем воздуха во рту, а температура воздуха останется практически неизменной (равной температуре тела). Следовательно, значение выражения $\frac{pV}{T}$ увеличилось. Причина в том, что увеличилось число молекул газа.

Когда давление и температура являются постоянными, объем газа пропорционален числу молекул N , поэтому значение выражения $\frac{pV}{T}$ пропорционально числу молекул N . Но одинаковый ли коэффициент пропорциональности для различных газов? Ответ на этот вопрос дает закон, который был установлен Авогадро:

➤ *При одинаковой температуре и давлении в равных объемах различных газов содержится одинаковое число молекул.*

Это означает, что $pV/T = kN$ с одним и тем же коэффициентом пропорциональности для всех газов. Этот коэффициент называют постоянной Больцмана, в честь австрийского физика, одного из создателей молекулярно-кинетической теории.

Измерения показали, что $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К

Из уравнения $pV/T = kN$ следует, что давление газа можно очень просто выразить через концентрацию газа $n = \frac{N}{V}$ и его абсолютную температуру. Мы получим $p = \frac{N}{V} kT = nkT$.

3. Уравнение Менделеева -Клапейрона

Мы уже знаем, что число молекул N связано с массой вещества m и его молярной массой M соотношением $N = \frac{m}{M} N_A$.

Подставляя это выражение в соотношение $pV/T = kN$, получаем:

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} kN_A$$

Произведение kN_A обозначается R и называется универсальной постоянной: $R = kN_A$. Измерения показали, что $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$. Используя эту постоянную, получаем уравнение Менделеева - Клапейрона:

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

Это уравнение было выведено российским ученым Д. И. Менделеевым во второй половине 19-го века.

8. Изопроцессы

Состояние данной массы газа определяется тремя макроскопическими параметрами - давлением p , объемом V и температурой T . Однако, многие процессы в газах, происходящие в природе, или которые осуществляются в технике, можно рассматривать (приближенно) как процессы, в которых изменяются только два из них. Особое значение в физике и технике имеют, так называемые изопроцессы.

➤ *Изопроцессами называют процессы, происходящие с данной массой газа при постоянном значении одного из трех параметров - давления, объема или температуры.*

Изопроцесс - это идеализированная модель реального процесса, который только приближительно отражает действительность.

9. Изобарный процесс

- *Изменение объема и температуры газа при постоянном давлении называется **изобарным процессом**.*

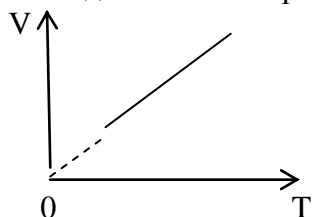
Во время изобарного процесса объем газа прямо пропорционален его абсолютной температуре $V/T = \text{const}$; при $p = \text{const}$. Это соотношению называют законом Гей-Люссака в честь французского ученого, который открыл его в начале 19-го века.

Закон Гей-Люссака позволяет связать значение объема и температуры, данной массы газа в двух различных состояниях, если давление газа в обоих состояниях одинаков. Обозначим V_1 и T_1 значение объема и температуры газа в состоянии 1, а V_2 и T_2 - в состоянии 2. Тогда из соотношения $V/T = \text{const}$, получаем –

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

- *Во время изобарного процесса объем данной массы газа прямо пропорционален его абсолютной температуре.*

Соотношение между объемом данной массы газа и абсолютной температурой при постоянном давлении изображено графически на рисунке.



Этот график называют **изобарой**. Он показывает, что при постоянном давлении объем газа прямо пропорционален его абсолютной температуре.

10. Изохорный процесс

- *Изменение давления и температуры газа с постоянным объемом, называют **изохорным процессом**.*

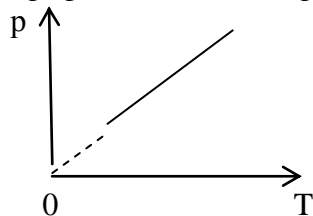
Опыт показывает: если нагреть газ с постоянным объемом, давление газа будет увеличиваться прямо пропорционально абсолютной температуре. Это означает, что при изохорном процессе давление газа прямо пропорционально его абсолютной температуре: $p/T = \text{const}$ при $V = \text{const}$.

Зависимость давления газа от температуры была исследована в конце 18-го века французским ученым Шарлем, поэтому такое соотношение называют законом Шарля.

При изохорном процессе давление данной массы газа прямо пропорционально его абсолютной температуре.

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

График зависимости $p(T)$ при $V = \text{const}$ называют **изохорой**.



Этот график показывает, что с постоянным объемом давление газа прямо пропорционально его абсолютной температуре.

11. Изотермический процесс

- *Изменение давления и объема газа при постоянной температуре называют **изотермическим процессом**.*

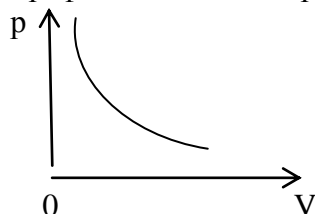
Опыт показывает: если сжимать газ при постоянной температуре, давление растет обратно пропорционально объему. Это означает, что во время изотермического процесса давление газа обратно пропорционально его объему: $pV = \text{const}$ при $T = \text{const}$.

Это соотношение было обнаружено во время опыта во второй половине 17-го века английским ученым Бойлем и французским ученым Мариоттом, поэтому его называют законом Бойля - Мариотта.

➤ Во время изотермического процесса давление данной массы газа обратно пропорционально его объему.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

График зависимости $p(T)$ при $V = \text{const}$ называют **изотермой**.



Этот график показывает, что при постоянной температуре давление газа обратно пропорционально его объему.

Закрепление материала по теме «Молекулярная физика»

1. Определенная масса идеального газа подвергается изохорному повышению температуры, а затем уменьшению объема при постоянном давлении. Изобразите эти процессы графически в осях (p, V) , (p, T) и (V, T) .
2. Найдите массу углекислого газа в баллоне вместимостью 40 л при температуре 288 К и давлении 4,9 кПа. Молярная масса углекислого газа равна 44 г/моль.
3. В барометрической трубке внутри жидкости имеется столбик воздуха, высота которого при 27 °С равна 9 см. Определите в сантиметрах высоту столбика при 47 °С.
4. Бутылка вместимостью 0,5 л выдерживает избыточное давление 148 кПа. Какую максимальную массу твердого углекислого газа можно запечатать в бутылке, чтобы она не взорвалась при 300 К? Атмосферное давление равно 101 кПа. Объемом твердого углекислого газа пренебречь.
5. Как объясняется закон Шарля с точки зрения молекулярно-кинетической теории?
6. Вслед за изотермическим сжатием определенная масса идеального газа испытывает изобарное расширение, и в результате обоих процессов газ приобретает первоначальный объем. Изобразите графически эти процессы в осях (p, V) , (p, T) и (V, T) .
7. До какой температуры нужно нагреть запаянный шар, содержащий 6,00 г воды, чтобы шар разорвался, если известно, что стенки шара выдерживают давление не более 4,053 Мпа, а вместимость его равна 1,20 л?
8. Определите температуру газа, находящегося в закрытом сосуде, если при увеличении давления на 0,4% первоначального давления температура газа возрастает на 1 К.
9. Некоторая масса молекулярного водорода занимает объем 1 м³ при температуре 250 К и давлении 200 кПа. Какое давление будет иметь та же масса водорода при температуре 5000 К и объеме 10 м³, если при такой температуре все молекулы водорода диссоциируют на атомы?
10. Как объясняется закон Гей-Люссака с точки зрения молекулярно-кинетической теории?

Лекция 9. Основы термодинамики.

1. Тепловое равновесие

Ежедневно мы сталкиваемся с телами, находящимися в разных состояниях, для которых характерны определенные параметры. Например, кусок льда, принесенный в комнату зимой, и воздух в комнате имеют разную температуру. Через некоторое время в результате теплообмена между льдом и воздухом температура льда повысится, а воздуха изменится, лед растает, вода, образовавшаяся из него, нагреется, температура воды и воздуха в комнате будет одинаковой.

Говорят, что между водой и воздухом установилась тепловое, или термодинамическое равновесие, а макроскопические системы представляют собой термодинамическую систему.

- **Термодинамическая система** - совокупность макроскопических систем, которые могут обмениваться энергией между собой и с внешними телами. Термодинамическую систему, которая не участвует в теплообмене с окружающими телами, называют **теплоизолированной**.

Теплоизолированная термодинамическая система с течением времени всегда приходит в состояние теплового равновесия, из которого сама выйти не может. Это утверждение раскрывает содержание закона термодинамического равновесия.

Равновесное состояние характеризуется неизменностью во времени всех термодинамических параметров состояния теплоизолированной системы. Например, если налить в стакан горячую воду и оставить ее в комнате, то через некоторое время стакан и вода в ней придут в состояние термодинамического равновесия с воздухом и предметами, находящимися в комнате. При этом температура, давление и объем останутся неизменными, как угодно долго при отсутствии внешних воздействий.

2. Температура

В повседневной жизни температура - величина, отличающая «горячее» от «холодного». И первые представления о температуре возникли с ощущением тепла и холода. Температура характеризует степень нагретого тела.

О различии степеней нагретости тел судят из процесса теплопередачи, возникающей при тепловом контакте тел.

Основное свойство температуры заключается в следующем: если привести в соприкосновение два тела - холодное и горячее, то холодное тело начнет нагреваться, а горячее - охлаждаться. Температура каждого из тел будет меняться с течением времени до тех пор, пока температуры тел не станут одинаковыми. Мы говорим, что тела придут в состояние теплового равновесия.

Итак, температура характеризует состояние теплового равновесия: все тела, находящиеся в тепловом равновесии, имеют одинаковую температуру.

Это свойство отличает температуру от других параметров состояния, например объема или давления их значение в состоянии теплового равновесия со временем также не меняются, но не одинаковы во всех частях системы равновесия.

3. Внутренняя энергия

При изучении курса механики мы познакомились с понятием механической энергии и знаем, что механическая энергия - это сумма кинетической энергии, обусловленная движением тел, и потенциальной энергии, которая обусловлена их взаимодействием.

Если тела взаимодействуют с помощью сил притяжения и упругости, то механическая энергия сохраняется. Механическая энергия убывает, если между телами действует сила трения или скольжения. При этом тела нагреваются, а мы уже знаем, что повышение температуры означает увеличение энергии хаотического движения частиц. Однако механическая энергия может падать и без повышения температуры. Например, если тереть лед при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, он будет превращаться в воду, температура которой тоже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Во что же превращается при этом механическая энергия? Она превращается в потенциальную энергию взаимодействия молекул. Во время преобразования льда в воду эта потенциальная энергия увеличивается. Мы говорим, что в обоих случаях увеличивается внутренняя энергия тела.

- **Внутренняя энергия** - это сумма кинетической энергии хаотического движения всех частиц, входящих в состав данного тела и потенциальной энергии их взаимодействия друг с другом: $U = E_k + E_p$.

Примеры изменения внутренней энергии: нагрев и охлаждение; плавления и кристаллизация; испарения и конденсации химические реакции; ядерные реакции.

Внутренняя энергия тела зависит от его состояния, то есть функцией состояния, и определяется однозначно параметрами p , V , T . Это означает, что тело, находясь в состоянии с данными значениями параметров, имеет одно, и только одно значение внутренней энергии. При смене состояния тела изменяется значение внутренней энергии.

4. Два способа изменения внутренней энергии

Изменить внутреннюю энергию тела можно двумя способами:

1) при осуществлении над телом работы (например, если сжимать газ в теплоизолированной емкости, то он нагревается)

2) благодаря теплопередаче, то есть без осуществления работы (например, при контакте тел различной температуры, их температуры выравниваются, то есть внутренняя энергия более нагретого тела уменьшается, а менее нагретого - увеличивается). Количественную меру изменения внутренней энергии в процессе теплопередачи называют количеством теплоты и обозначают Q . Количество теплоты измеряется в джоулях.

5. Внутренняя энергия идеального газа

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа имеет вид $p = \frac{1}{3}nm_0v^2 = \frac{2}{3}\frac{nm_0v^2}{2} = \frac{2}{3}nE$. уравнения состояния идеального газа можно записать в виде $p = nkT$.

Из этих двух выражений можно получить $E = \frac{3}{2}kT$.

Если идеальный газ состоит из N молекул, то их общая энергия $U = NE$. Подставляя сюда выражение $N = \nu N_A$ и $E = \frac{3}{2}kT$, получаем:

$$U = \nu N_A \cdot \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2}\nu N_A kT = \frac{3}{2}\nu RT$$

Для одного моля это выражение будет иметь вид:

$$U = \frac{3}{2}RT$$

Эта энергия называется *внутренней энергией идеального газа*. Так как для идеального газа взаимодействием молекул пренебрегают, потенциальная энергия молекул равна нулю.

➤ *Внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры и не зависит ни от его давления, ни от объема.*

Увеличение массы газа приводит к увеличению его внутренней энергии ($U \sim m$). Внутренняя энергия зависит от рода газа, то есть от его молярной массы ($U \sim \frac{1}{M}$). Это происходит в таких условиях: чем больше молярная масса M , тем меньше атомов содержится в газе данной массы. Если идеальный газ состоит из более сложных молекул, чем одноатомный, то его внутренняя энергия также пропорциональна абсолютной температуре, только коэффициент пропорциональности между V и T другой. Объясняется это тем, что сложные молекулы не только движутся поступательно, но и вращаются. Внутренняя энергия таких газов равна сумме энергий поступательного и вращательного движения молекул.

6. Вычисление работы при изобарном процессе

Внутреннюю энергию макроскопической системы можно изменить, выполнив определенную работу. Получим формулу для вычисления работы, которую выполняет система. Рассмотрим простейшую систему - газ, который может расширяться или сжиматься, но как целое он не перемещается.

Пусть газ находится в вертикальном цилиндре, который закрыт подвижным поршнем площадью. Под действием приложенной внешней силы F поршень опустился на расстояние Δx , сжав при этом газ. Газ будет сжиматься до тех пор, пока сила F не уравнивается с силой, действующей на поршень со стороны газа и соответствующей pS , где p - давление газа (если перемещение мало, то давление газа можно считать постоянным).

Очевидно, работа газа (A_r) определяется следующим образом: $F\Delta x = pS\Delta x$ или $A_r = p\Delta V$.

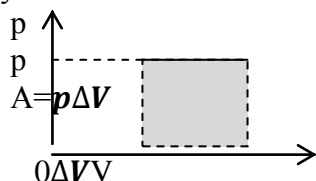
Если газ сжать, то $\Delta V < 0$ - работа газа отрицательна, если газ расширить, то $\Delta V > 0$ - работа газа положительна.

Работа внешних сил, будет иметь противоположный знак: $A = -A_r = -p\Delta V$.

Таким образом, осуществляя над газом положительную работу, внешние тела передают ему определенную энергию. При расширении газа, наоборот, работа внешних сил отрицательна.

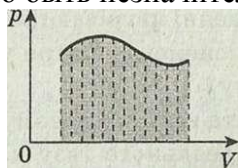
7. Графическое нахождение работы газа

Работу газа в случае постоянного давления можно построить графически. При изобарном процессе работа расширения газа может быть найдена на диаграмме pV , как площадь прямоугольника



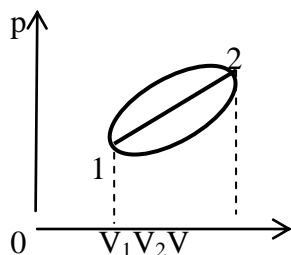
Из графика следует, что $A = p\Delta V = p(V_2 - V_1)$

Работа, выполненная газом, численно равна площади под графиком зависимости $p(V)$ в том случае, когда давление газа в ходе процесса меняется. Чтобы это доказать, необходимо весь процесс разбить на большое количество этапов, на каждом из которых изменение давления должно быть незначительным.



Суммарная работа будет и в этом случае равна площади фигуры, ограниченной графиком зависимости давления от объема, осью абсцисс и перпендикулярами, восстановленными к оси в точках V_2 и V_1 .

Если газ из состояния 1 переводят в состояние 2 различными способами (см. Рис.), То очевидно, что разница энергий U_2 и U_1 та же, а работа - разная. Работа в термодинамике зависит от последовательности состояний, которое проходит тело от начального до конечного состояния.



8. Закон сохранения энергии в тепловых явлениях

Первый закон термодинамики - это закон сохранения энергии, который распространяется на тепловые явления. Начиная изучение первого закона термодинамики, прежде всего, необходимо разъяснить ученикам, что известные им способы изменения внутренней энергии (телопередача и работа) эквивалентны. Это позволит учащимся расширить известный закон сохранения энергии для механических процессов и на тепловые процессы, так как принцип эквивалентности количества теплоты Q и работы A является частным случаем закона сохранения и превращения энергии. Работа A является мерой изменения механической энергии, количество теплоты - мера изменения внутренней энергии.

Принцип эквивалентности говорит о том, что при взаимных превращениях внутренней и механической энергий спад одной из них равен увеличению другой.

На основании множества наблюдений и обобщения опытных фактов был сформулирован закон сохранения энергии.

➤ *Энергия в природе не возникает из ничего и не исчезает: количество энергии неизменно, она только переходит из одной формы в другую.*

Закон сохранения энергии управляет всеми явлениями природы и связывает их воедино. Он выполняется абсолютно точно, неизвестно ни одного случая, когда бы этот закон не выполнялся.

9. Первый закон термодинамики

Обозначим изменение внутренней энергии тела ΔU , а работу, выполненную над этим телом, обозначим A .

Закон сохранения энергии применимый к тепловым явлениям получил название первого закона термодинамики.

Изменение внутренней энергии тела равно сумме количества теплоты, переданного телу, и работы, совершаемой над телом:

$$\Delta U = Q + A$$

Часто используют и другую формулировку первого закона термодинамики, в котором полученное телом количество теплоты выражается через изменение внутренней энергии и работу, осуществленную телом.

Обозначим эту работу A_{Γ} , поскольку в тепловых двигателях работу осуществляет газ. Работа A_{Γ} связана с работой A , которая осуществлена над телом, в соотношении $A_{\Gamma} = -A$. Тогда первый закон термодинамики можно сформулировать так:

- количество теплоты, которая передается телу, равно сумме изменений внутренней энергии тела и работы, которую оно выполняет:

$$\Delta U = Q + A_{\Gamma}$$

10. Основные элементы теплового двигателя

Существуют различные типы тепловых двигателей: паровая турбина, двигатель внутреннего сгорания, реактивный двигатель и др. Не беря во внимание различные конструкции двигателей и некоторые особенности их работы - принципы их действия одинаковы.

- Устройство, которое осуществляет механическую работу за счет внутренних энергии топлива, называют **тепловым двигателем**.

Все тепловые двигатели, независимо от их особенностей, имеют три основные части: нагреватель, рабочее тело, холодильник. Рассмотрим их назначение.

11. Полезная работа теплового двигателя

В тепловом двигателе происходит преобразование внутренней энергии в механическую энергию. Следовательно, необходимо иметь систему, за счет внутренней энергии которой происходила бы механическая работа. Такую систему называют **рабочим телом двигателя**. Механическая работа осуществляется при сжатии и расширении рабочего тела. Чем больше сжатие или расширение, тем больше работа осуществляется. Газы расширяются и сжимаются легче воды, поэтому в качестве рабочего тела чаще всего используют газ или пар. Так, в паровой турбине рабочим телом является пар, в двигателе внутреннего сгорания - газ, состоящий из смеси паров бензина и воздуха (или продуктов сгорания - работу осуществляет именно эта смесь).

Поскольку работа осуществляется за счет внутренней энергии рабочего тела, то для увеличения внутренней энергии рабочего тела следует нагреть до определенной температуры T_1 . Поэтому в состав теплового двигателя входит нагреватель.

Действие теплового двигателя имеет **циклический характер**: после того, как рабочее тело (газ) расширился, выполнив работу, его необходимо сжать до бывшего объема, чтобы оно могло выполнить работу в следующем цикле.

Таким образом, для того, чтобы тепловой двигатель осуществлял полезную работу, необходимо периодически нагревать и охлаждать рабочее тело, то есть периодически передавать рабочему телу и отбирать у него определенное количество теплоты.

Процесс сжатия следует осуществлять при более низкой температуре, чем расширение. Поэтому рабочее тело необходимо охладить. Для этого его приводят в контакт с телом, температура которого $T_2 < T_1$. Такое тело называют **холодильником**. Чаще всего холодильником является окружающий воздух или вода.

Получив при расширении от тела с температурой T_1 (нагревания) определенное количество теплоты Q_1 газ непременно отдает при сжатии количество теплоты Q_2 тела с низкой температурой T_2 (холодильник). Итак, в работу превращается лишь часть количества теплоты полученного от нагревателя, равна: $Q_1 - Q_2$

После завершения каждого цикла рабочее тело возвращается в исходное состояние, то есть его внутренняя энергия принимает прежнее значение. Поэтому с первого закона термодинамики следует, что полезная работа $A_{\text{п}}$, выполненная тепловым двигателем, равна

разности количества теплоты Q_1 полученной рабочим телом и количества теплоты Q_2 переданной рабочим телом холодильника:

12. КПД теплового двигателя

Замкнутые (циклические) процессы используются при работе всех тепловых машин: двигателей внутреннего сгорания, паровых и газовых турбин, холодильных машин. Для оценки эффективности превращения внутренней энергии рабочего тела в механическую работу, совершаемую за цикл, вводится коэффициент полезного действия. Коэффициент полезного действия теплового двигателя - это отношение полезной работы $A_{\text{п}}$, выполненной двигателем, к количеству теплоты, полученной от нагревателя:

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{Q_1} \cdot 100\%$$

Эффективность действия теплового двигателя тем будет выше, чем большую полезную работу $A_{\text{п}}$ он может выполнить с тем же количеством теплоты полученной от нагревателя. Так как $A_{\text{п}} = Q_1 - Q_2$, то

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%$$

С учетом того, что количество теплоты, переданное холодильнику, всегда больше нуля, коэффициент полезного действия любого теплового двигателя меньше 100%. Таким образом, в механическую работу можно превратить только часть количества теплоты, полученную от нагревателя.

Во всех машинах, кроме тепловых, если бы удалось устранить все потери, КПД равен был 100%. Если же в тепловых двигателях устранить все потери, то КПД все равно окажется меньше 100%.

Французский инженер Сади Карно выяснил, при каких же условиях КПД будет максимальным. Он придумал идеальную тепловую машину с идеальным газом в качестве рабочего тела, цикл работы, которой состоит из двух изотермических и двух адиабатных процессов:

$$\eta_{\text{ид}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Из приведенной формулы видно, что для повышения КПД надо уменьшать отношение: $\frac{T_2}{T_1}$.

Этого можно достичь или снижая температуру холодильника, или повышая температуру нагревателя, или выполняя и то и другое.

Мы рассмотрели формулу для максимального КПД теплового двигателя. Такой КПД мог бы иметь идеальный тепловой двигатель, в котором полностью отсутствует трение, а также отсутствуют потери тепла. Впрочем, в любом реальном двигателе есть и трение, и потери тепла. Поэтому реальный тепловой двигатель имеет, к сожалению, гораздо меньше КПД при максимально возможном. Например, для двигателя внутреннего сгорания $\eta_{\text{max}} = 80\%$, а реальный КПД - всего около 20%.

Закрепление материала по теме «Термодинамика»

1. Как изменится внутренняя энергия 240г кислорода O_2 при охлаждении его на 100К? (Молярная масса кислорода $32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $R=8,31$ Дж/моль*К).
2. При температуре 280К и давлении $4 \cdot 10^5$ Па газ занимает объем 0.1 м^3 . Какая работа совершена над газом по увеличению его объема, если он нагрет до 420К при постоянном давлении? (Ответ написать в кДж).
3. Определить начальную температуру 0.6 кг олова, если при погружении ее в воду массой 3 кг при 300К она нагрелась на 2К. ($C_{\text{воды}}=4200$ Дж/кг*К, $C_{\text{олова}}=250$ Дж/кг*К).
4. Какую силу тяги развивает тепловоз, если он ведет состав со скоростью 27 км/ч и расходует 400 кг дизельного горючего в час при КПД 30% ($q=4.2 \cdot 10^7$ Дж/кг).

5. Двухатомному газу сообщено 14кДж теплоты. При этом газ расширялся при постоянном давлении. Определить работу расширения газа и изменение внутренней энергии газа.
6. Как изменится внутренняя энергия 4 молей одноатомного идеального газа при уменьшении его температуры на 200К?($R=8,31$ Дж/моль*К.)
7. При изобарном нагревании некоторой массы кислорода O_2 на 200К совершена работа 25 кДж по увеличению его объема. Определить массу кислорода.($R=8,31$ Дж/моль*К.)

Раздел 3. Основы электродинамика

Лекция 10. Закон Кулона. Электрическое поле

1. Электрический заряд

Тела, обладающие способностью к электрическим взаимодействиям, называются наэлектризованными. Если тело наэлектризовано, говорят, что оно имеет электрический заряд.

Электрический заряд - это физическая величина, характеризующая свойства частиц или тел вступать в электромагнитное взаимодействие.

Единица электрического заряда в СИ - кулон (Кл). 1 Кл равен заряду, проходящего через поперечное сечение проводника за 1 с при силе тока в проводнике 1 А: $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$

Основные свойства электрического заряда:

1. Существуют два рода электрических зарядов - положительные и отрицательные. Электрический заряд наэлектризованной стеклянной палочки, потертой о шелк, *назвали положительным*, а заряд эбонитовой палочки, потертой о мех, - *отрицательным*.

2. Тела, имеющие заряды одного знака отталкиваются; тела, имеющие заряды противоположных знаков, притягиваются.

3. Носителем электрического заряда является частичка: электрический заряд не существует отдельно от нее.

4. Электрический заряд является дискретным, то есть электрические заряды физических тел кратные определенному малейшему (элементарному) заряду. Носителем малейшего отрицательного заряда является электрон:

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Носителем малейшего положительного заряда является протон. Заряд протона по модулю равен заряду электрона.

2. Электризация тел

Явление, при котором тела приобретают свойства притягивать другие тела, **называют электризацией**.

Тела, которые обладают способностью к электрическим взаимодействиям, **называют наэлектризованными**.

Существуют несколько способов электризации, среди которых - электризация трением. В процессе электризации трением происходит тесный контакт двух тел, изготовленных из различных материалов, и часть электронов переходит из одного тела в другое.

При любом способе электризации тел происходит перераспределение существующих в них электрических зарядов, а не появление новых. Это утверждение является следствием важнейшего закона природы - закона сохранения электрического заряда.

3. Закон сохранения электрического заряда

При электризации тело которое потеряло часть своих электронов, заряжается положительно, а тело которое приобрело лишние электроны, - отрицательно. Общее же количество электронов в этих телах остается неизменным.

Полный заряд замкнутой системы тел или частиц остается неизменным при любых взаимодействиях, происходящих в этой системе:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$$

Этот закон не утверждает, что суммарные заряды всех положительно заряженных и всех отрицательно заряженных частиц должны каждый отдельно храниться. Во время ионизации атома в системе образуются две частицы: положительно заряженный ион и отрицательно заряженный электрон. Суммарные положительные и отрицательные заряды при этом увеличиваются, полный же электрический заряд остается неизменным. Несложно увидеть, что всегда сохраняется разница между общим числом всех положительных и отрицательных зарядов.

4. Закон Кулона

Французский ученый Шарль Кулон исследовал, как зависит сила взаимодействия между заряженными телами от значений зарядов тел и от расстояния между ними. В своих опытах Кулон не учитывал размеры взаимодействующих тел.

Заряд, помещенный на теле, размеры которого малы сравнительно с расстоянием к другим телам, с которыми оно взаимодействует, называют точечным зарядом.

Закон Кулона, открытый в 1785, количественно описывает взаимодействие заряженных тел. Он является фундаментальным законом, то есть установленный с помощью эксперимента и не следует ни из какого другого закона природы.

Значение силы F взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов q_1 и q_2 прямо пропорционально произведению модулей этих зарядов и обратно пропорционален квадрату расстояния r между ними:

$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Значение коэффициента пропорциональности k зависит от выбора системы единиц.

Коэффициент пропорциональности k в законе Кулона равен

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2.$$

Иногда вместо коэффициента k используют другой коэффициент ϵ_0 , который называется электрической постоянной:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$$

Тогда математическую запись закона Кулона имеет следующий вид:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

5. Электрическое поле

Согласно идеям Майкла Фарадея электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый заряд создает в окружающем пространстве электрическое поле, и взаимодействие зарядов происходит с помощью полей, создаваемых этими зарядами. Взаимодействие двух электрических зарядов q_1 и q_2 сводится к тому, что поле заряда q_1 действует на заряд q_2 а поле заряда q_2 действует на заряд q_1 .

Человек не может непосредственно с помощью органов чувств воспринимать электрическое поле, но объективность его существования, материальность доведены экспериментально.

Поле, как и вещество, является одной из форм существования материи.

Электрическое поле - это форма материи, которая существует вокруг заряженных тел и проявляется в действии с некоторой силой на любое заряженное тело, находящиеся в этом поле.

Поле, созданное неподвижными в этой системе отсчета зарядами, называют **электростатическим**.

Необходимо обратить внимание на то, что электрическое поле распространяется в пространстве хотя и с огромной, но конечной скоростью - скоростью света. Благодаря этому свойству взаимодействие между двумя зарядами начинается не мгновенно, а через определенный интервал времени $\Delta t = \frac{l}{c}$, где l - расстояние между зарядами, а c - скорость света в вакууме.

6. Напряженность электрического поля

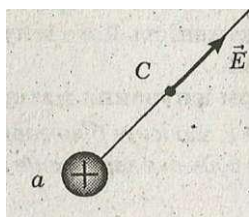
Если поочередно помещать в ту же точку поля небольшие заряженные тела и измерять силы, действующие на них со стороны поля, то выяснится, что силы прямо пропорциональны величинам зарядов $\frac{F}{q}$ - остаются постоянным, не зависят от модуля заряда и характеризует только электрическое поле в той точке, где находится заряд. Эту характеристику называют напряженностью электрического поля.

Напряженность электрического поля E - это векторная величина, характеризующая электрическое поле и равна отношению силы F , с которой электрическое поле действует на пробный заряд, помещенный в некоторую точку поля, к значению q этого заряда:

$$E = \frac{F}{q}$$

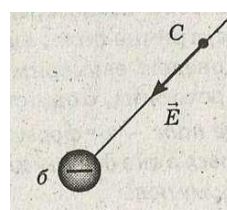
Напряженность поля в СИ выражается: $[E] = \text{Н} / \text{Кл}$.

По направлению вектора напряженности в некоторой точке электрического поля выбирают направление кулоновской силы, которая действовала бы на пробный положительный заряд, если бы он был помещен в эту точку поля.



7. Напряженность поля

Пусть точечным зарядом Q , расположенным в вакууме, создано электрическое поле. Чтобы найти напряженность данного поля в произвольной точке, поместим в эту точку пробный заряд q . На заряд q , который находится на расстоянии r от заряда действует сила $F = k \frac{Qq}{r^2}$. Поскольку модуль напряженности поля $E = \frac{F}{q}$, получаем, что модуль напряженности поля точечного заряда $E = k \frac{Q}{r^2}$



точечного заряда

8. Принцип суперпозиции

Зная напряженность E электрического поля, созданного некоторым зарядом в определенной точке пространства, несложно определить модуль и направление вектора силы, с которой поле будет действовать на любой заряд q , помещенный в эту точку:

$$F = qE$$

Если же поле образовано не одним зарядом, а несколькими, то действующую результирующую силу на пробный заряд со стороны системы зарядов, определяют векторной суммой всех сил, с которыми действовали бы заряды системы отдельно на этот пробный заряд.

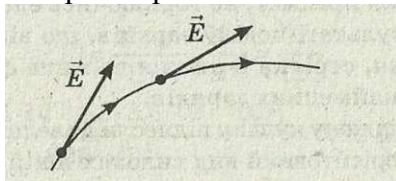
Отсюда следует принцип суперпозиции электрических полей:

напряженность электрического поля системы N зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых каждым из них в отдельности:

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_N$$

9. Линии напряженности

Электрическое поле можно изобразить графически, используя так называемые *линии напряженности электрического поля* (силовые линии) - линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора напряженности электрического поля.



Свойства силовых линий: они не пересекаются; не имеют изломов; начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных. Чтобы охарактеризовать не только направление, но и модуль напряженности поля в разных точках, *силовые линии проводят так, что частота силовых была линий пропорциональна модулю напряженности.*

Лекция 11. Проводники и диэлектрики в электрическом поле. Конденсаторы

1. Особенности внутреннего строения проводников

Любое вещество состоит из молекул, атомов или ионов, которые, в свою очередь, содержат заряженные частицы. Поэтому, если тело поместить в электрическое поле, это приведет к определенным изменениям в веществе, из которого изготовлено тело.

По электрическим свойствам вещество делится на проводники, диэлектрики и полупроводники.

Проводниками называют вещества, способные проводить электрический ток.

В проводниках заряженными частицами являются частицы, которые могут свободно перемещаться в веществе.

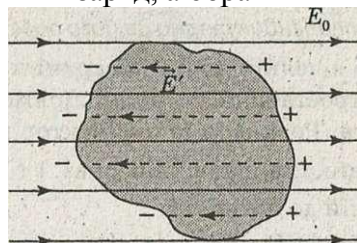
Лучшие проводники - это металлы. Дело в том, что в атомах металлов внешние электроны слабо связаны со своими атомами и поэтому легко отрываются от них и «соединяются», становясь собственностью всего куска металла в целом.

Проводниками также растворы солей (например, каменной соли). В этом случае роль свободных зарядов играют положительно и отрицательно заряженные ионы.

2. Электростатические свойства проводников

Свойство 1. *Напряженность электростатического поля внутри проводника равна нулю.*

Поместим проводник в электростатическое поле. Под действием электростатических сил движение свободных электронов станет направленным. Определенный участок на поверхности проводника приобретает отрицательный заряд, а обратный - положительный.



$$E = E_0 - E' = 0$$

Таким образом, на поверхности проводника появляются приведенные (индуцированные) электрические заряды, при этом суммарный заряд проводника остается неизменным. Описанное явление называется электростатической индукцией.

Электростатическая индукция - это явление перераспределения электрических зарядов в проводнике, помещенном в электростатическое поле, в результате чего на поверхности проводника возникают электрические заряды.

Возникающие индуцированные заряды создают свое электрическое поле напряженностью E' , направленную в сторону, противоположную напряженности E_0 внешнего поля. Процесс перераспределения зарядов в проводнике будет продолжаться до тех пор, пока создаваемое индуцированными зарядами поле внутри проводника полностью компенсирует внешнее поле. Напряженность $E = E_0 + E'$ результирующего поля внутри проводника равна нулю.

Свойство 2. *Поверхность проводника является эквипотенциальной.*

Это утверждение является следствием соотношения между напряженностью поля E и разностью потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$$

Если напряженность поля внутри проводника равна нулю, то разность потенциалов также равна нулю, поэтому потенциалы во всех точках проводника одинаковые, то есть поверхность проводника является эквипотенциальной.

Свойство 3. *Весь статический заряд проводника сконцентрирован на его поверхности.*

Это свойство является следствием закона Кулона и свойством одноименных зарядов отталкиваться.

Свойство 4. *Вектор напряженности электростатического поля проводника направлен перпендикулярно его поверхности.*

Свойство 5. Электрические заряды распределяются на поверхности проводника так, что напряженность электростатического поля проводника больше на выступлениях проводника и меньше на его впадинах.

3. Особенности внутреннего строения диэлектриков

Диэлектриками называют вещества, которые плохо проводят электрический ток. При обычных условиях у них практически отсутствуют свободные заряды. В зависимости от химического строения диэлектрики делят на три группы.

1. Неполлярные диэлектрики - вещества, молекулы (атомы) которых неполярные: у них при отсутствии внешнего электрического поля центры масс положительных и отрицательных зарядов совпадают. Например, инертные газы (аргон, ксенон); газы, состоящие из симметричных двухатомных молекул (кислород, водород, азот); некоторые органические жидкости (масло, бензин); из твердых тел - пластмассы.

2. Полярные диэлектрики - вещества, молекулы которых полярные: у них при отсутствии внешнего электрического поля центры масс позитивных и отрицательных зарядов не совпадают. Примером полярного диэлектрика является вода.

Молекулы воды, как и других полярных диэлектриков, представляют собой микроскопические электрические диполи.

Электрический диполь - электронейтральная совокупность равных по модулю и противоположных по знаку двух зарядов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга.

При отсутствии внешнего электростатического поля дипольные молекулы благодаря тепловому движению располагаются беспорядочно. Поэтому векторная сумма напряженностей полей, созданных дипольными молекулами диэлектрика, равна нулю.

3. Ионные диэлектрики - вещества, обладающие ионной структурой. Среди них соли и щелочи: натрий хлорид натрия, калий хлорид и т. д. При отсутствии внешнего электростатического поля каждая ячейка и кристалл в целом является электронейтральной.

4. Как электростатическое поле влияет на диэлектрик?

Внесение диэлектрика во внешнее электростатическое поле приводит к поляризации диэлектрика. Механизм поляризации различных типов диэлектриков разный, поскольку он определяет характер химической связи в диэлектриках.

Во время поляризации неполярных диэлектриков проявляется электронный (деформационный) механизм. Под действием внешнего электрического поля молекулы неполярных диэлектриков поляризуются: положительные заряды смещаются в направлении вектора напряженности E_0 этого поля, а отрицательные - в противоположном направлении.

В конце концов, молекулы превращаются в электрические диполи, расположенные цепочками вдоль силовых линий внешнего поля. В результате на поверхностях появляются нескомпенсированные связанные заряды противоположных знаков, образующих свое поле, напряженностью E' которая направлена навстречу напряженности E_0 внешнего поля.

В процессе поляризации полярных диэлектриков возникает ориентированная поляризация. Под действием внешнего поля дипольные молекулы диэлектрика пытаются вернуться так, чтобы их оси были расположены вдоль силовых линий поля, но тепловое движение молекул мешает этому процессу. Поэтому возникает лишь частичное упорядочивание дипольных моментов. Наличие порядка в расположении молекул приводит к тому, что на поверхностях диэлектрика появляются не скомпенсированные заряды противоположных знаков. Эти заряды образуют свое поле, напряженность E' которая направлена на встречу напряженности E_0 внешнего поля.

В процессе поляризации ионных диэлектриков наблюдается ионная поляризация. В результате действия внешнего поля ионы разных знаков смещаются в противоположных направлениях, из-за чего на гранях кристалла появляются нескомпенсированные связанные заряды, то есть кристалл поляризуется.

Подводя итог, можно сказать, что поляризацию диэлектриков можно определить как процесс появления ориентированных диполей или ориентации диполей, которые существуют в диэлектрике под действием внешнего электростатического поля.

5. Как диэлектрик влияет на электростатическое поле

Итак, внесение диэлектрика во внешнее электростатическое поле приводит к появлению связанных зарядов на поверхности диэлектрика. Связанные заряды создают электрическое поле напряженностью E' , которая внутри диэлектрика направлена противоположно вектору напряженности E_0 внешнего поля. Благодаря этому поле внутри диэлектрика ослабевает. В результате напряженность E результирующего поля внутри диэлектрика оказывается по модулю меньше, чем напряженность E_0 внешнего поля: $E = E_0 - E'$. Уменьшение модуля напряженности E электрического поля в веществе по сравнению с модулем напряженности E_0 электростатического поля в вакууме, характеризуется физической величиной, которую называют диэлектрической проницаемостью вещества:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E'}$$

Уменьшение напряженности электрического поля в диэлектрике в ε раз приводит к такому же уменьшению силы электростатического взаимодействия точечных зарядов в этом диэлектрике.

Поэтому закон Кулона для точечных зарядов, расположенных в диэлектрике, имеет вид:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}$$

Формулы для расчета напряженности и потенциала поля, созданного точечным зарядом Q , расположенным в диэлектрике, имеют вид:

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}$$

6. Электроемкость

Электроемкость характеризует способность проводников накапливать электрический заряд, а значит, и электроэнергию.

Электроёмкость проводника C - скалярная величина, характеризующий способность проводника накапливать заряд и равна отношению значения q электрического заряда к его потенциалу φ :

$$C = \frac{q}{\varphi}$$

Единицей электроемкости в СИ является $[C] = 1 \text{ Ф}$. В честь английского физика М. Фарадея эта единица названа фарадом.

1 фарад - емкость проводника, у которого изменение заряда на 1 Кл вызывает изменение потенциала на 1 В.

7. Конденсатор

Оказалось, что для накопления зарядов удобно использовать два проводника, которым передают заряды противоположных знаков, одинаковых по модулю.

Конденсатор - это два проводника (обмоток), разделенные слоем диэлектрика, толщина которого намного меньше размеров проводников.

Зарядом конденсатора q называют модуль заряда одной из его обмоток (суммарный заряд обеих обкладок равен нулю). Заряд конденсатора определяет напряжение на этом конденсаторе (разница потенциалов между двумя обмотками).

Для зарядки конденсатора обычно его обмотки соединяют с полюсами батареи аккумуляторов. В результате на обмотках появляются одинаковые по модулю, но противоположны по знаку заряды. Результат не изменится, если соединить с полюсом батареи только одну обмотку, заземлив другую.

Отношение значения q заряда этого конденсатора к разности потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ между его обкладками не зависит ни от q ни от $\varphi_1 - \varphi_2$ и может служить характеристикой конденсатора.

Емкость конденсатора C - скалярная величина, характеризующая способность конденсатора накапливать заряд и равен отношению значение заряда q одной из обмоток к разности потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$$

8. Емкость плоского конденсатора

Плоский конденсатор представляет собой систему из двух плоских параллельных пластин площадью S каждая. Расстояние между пластинами d намного меньше их линейных размеров.

Опыты показывают, что в случае удаления одной пластины от второй разность потенциалов между ними увеличивается, а это свидетельствует об уменьшении емкости конденсатора.

Соответственно в случае уменьшения расстояния между пластинами емкость конденсатора увеличивается. То есть емкость конденсатора изменяется обратно пропорционально расстоянию между пластинами.

Не меняя расстояния между пластинами, сдвинем одну из них - площадь пластины уменьшается

Опытным путем можно убедиться также, что емкость конденсатора не зависит от материала и толщины его пластин, а зависит от свойств диэлектрика, находящегося между ними:

Таким образом, емкость плоского конденсатора определяется по формуле:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

Поскольку расстояние d между пластинами можно сделать очень маленьким, емкость плоского конденсатора может быть довольно значительной.

9. Энергия плоского конденсатора

Заряженный конденсатор, как и любое заряженное тело, обладает энергией. Вычислим энергию заряженного до напряжения U плоского конденсатора, с емкостью C и заряд q.

Во время разрядки конденсатора напряжение U на его обмотках меняется прямо пропорционально заряду q конденсатора, поскольку емкость C конденсатора ($C = \frac{q}{U}$) в этом случае не меняется.

Работа по перемещению точечного заряда равна

$$A = \frac{CU^2}{2} \text{ или } A = \frac{q^2}{2C}$$

С другой стороны, работа, выполненная во время разрядки конденсатора, равна изменению энергии $\Delta W_{\text{п}}$ электрического поля:

$$A = -\Delta W_{\text{п}} = W_{\text{п0}} - 0 = W_{\text{п0}}$$

Итак,

$$W_{\text{п0}} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

Таким образом, энергия $W_{\text{п}}$ заряженного до напряжения U конденсатора, с емкостью C и заряд q, равна:

$$W_{\text{п}} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

10. Объемная плотность энергии электрического поля

Выразим энергию электрического поля конденсатора через характеристики поля. Для этого выразим напряжение через напряженность ($U=Ed$) и воспользуемся выражением для емкости плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$

После подстановки приведенных формул в формулу $W_{\text{п}} = \frac{CU^2}{2}$ получим:

$$W_{\text{п}} = \frac{CE^2 d^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 SE^2 d^2}{2d} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} Sd = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} V$$

Анализируя последнюю формулу, приходим к выводу, что энергия однородного поля прямо пропорциональна объему, который занимает поле. В связи с этим говорят об энергии единицы объема поля, так называемую объемную плотность энергии

$$\omega_{\text{эл}} = \frac{W_{\text{п}}}{V} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$$

Единица объемной плотности энергии в СИ – джоуль

Закрепление изученного материала по теме «Электрическое поле»

1. Какая физическая величина является силовой характеристикой электрического поля?
2. Два точечных электрических заряда q и $2q$ на расстоянии r друг от друга отталкиваются с силой F . С какой силой будут отталкиваться эти заряды на расстоянии $2r$?
3. Как изменится емкость воздушного конденсатора при уменьшении расстояния между пластинами в 2 раза? Выберите правильный ответ.
4. Два электрических заряда, один из которых в два раза меньше другого, находясь в вакууме на расстоянии **0,6** м, взаимодействуют с силой 2 мН. Определить эти заряды.
5. Найти заряд, создающий электрическое поле, если на расстоянии 5 см от заряда напряженность поля 0,15 МВ/м.
6. Какова разность потенциалов двух точек электрического поля, если для перемещения заряда 2 мкКл между этими точками совершена работа 0,8 мДж?
7. Что произойдет с разностью потенциалов на пластинах заряженного конденсатора, если уменьшить расстояние между ними?
8. Маленький шарик массой 0,4 г подвешен на тонкой шелковой нити и имеет заряд $4 \cdot 10^{-7}$ Кл. На какое расстояние снизу к нему следует поднести другой шарик с одноименным зарядом $6 \cdot 10^{-8}$ Кл, чтобы натяжение нити стало вдвое меньше?
9. Два заряда $2 \cdot 10^{-8}$ Кл и $1,6 \cdot 10^{-7}$ Кл помещены на расстоянии 5 см друг от друга. Определить напряженность поля в точке, удаленной от первого заряда на 3 см и от второго на 4 см.

Лекция 12. Постоянный электрический ток. Законы Ома для полной цепи

1. При каких условиях возникает и существует электрический ток?

Свободные заряженные частицы в проводниках движутся непрерывно и хаотично. Если же свободным заряженным частицам передать еще и стремящееся движение, то через любое сечение проводника будет переноситься заряд.

Электрическим током называют направленное движение заряженных частиц.

Для возникновения и существования электрического тока необходимы:

- наличие свободных заряженных частиц - носителей тока;
- наличие электрического поля, действие которого создает и поддерживает направленный

движение свободных заряженных частиц.

За создание электрического поля «отвечают» источники тока.

Источники электрического тока - устройства, преобразующие различные виды энергии в электрическую энергию.

В источниках электрического тока выполняется работа по разделению электрических зарядов, в результате чего на одном полюсе источника накапливается положительный заряд, а на другом - отрицательный. Примером источников тока могут служить аккумуляторы и гальванические элементы.

2. Сила тока

Когда по проводнику протекает электрический ток, через поперечное сечение проводника ежесекундно переносится некоторый электрический заряд. Для оценки электрических зарядов,

проходящих через проводник, была введена специальная физическая величина - сила электрического тока.

Сила тока I - это физическая величина, характеризующая электрический ток и равна отношению заряда Δq , переносимого через поперечное сечение проводника за промежуток времени Δt , к этому промежутку:

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

Если сила тока не изменяется со временем, то такой ток называют постоянным. Сила постоянного тока I в проводнике численно равна заряду q , перенесенного через поперечное сечение проводника за единицу времени:

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

В системе СИ силу тока измеряют в амперах (А). Ампер является одной из основных единиц системы СИ и определяется с помощью магнитного взаимодействия токов. За силы тока в 1 А через поперечное сечение проводника каждую секунду проходит заряд в 1 Кл ($1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с}$).

Прибор для измерения силы тока называют амперметром. Амперметр включают в электрическую цепь последовательно с проводником, в котором измеряют силу тока.

3. Закон Ома для участка цепи

Если участок цепи не содержит источника тока, электрическое напряжение U на его концах численно равно работе электрического поля по перемещению единичного положительного заряда q на этом участке:

$$U = \frac{A}{q}.$$

Прибор для измерения напряжения называют вольтметром. Вольтметр включают в электрическую цепь параллельно к участку цепи, на котором необходимо измерить напряжение.

Напряжение характеризует не электрический ток, а электрическое поле, которое поддерживает этот ток. Очевидно, что между значениями силы тока и напряжением существует связь.

Опыты показывают, что сила тока изменяется прямо пропорционально приложенному напряжению. Поэтому отношение для каждого U/I проводника является постоянным. Эта величина характеризует конкретный проводник и называется электрическим сопротивлением проводника. Следовательно, формулу зависимости силы тока от напряжения можно записать в таком виде:

$$I = U/R.$$

Это утверждение называют законом Ома для участка цепи.

Сила тока I на участке цепи прямо пропорциональна напряжению U на концах этого участка.

Сопротивление участка цепи зависит от свойств проводников, из которых образован данный участок.

Электрическое сопротивление - это физическая величина, характеризующая свойство проводника противодействовать электрическому току.

В СИ единицей электрического сопротивления является 1 Ом (это сопротивление такого проводника, в котором протекает ток силой 1 А при напряжении 1 В).

Сопротивление проводника зависит от материала и геометрических размеров проводника. Зависимость электрического сопротивления от размеров проводника имеет вид:

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

Удельное сопротивление проводника - это физическая величина, характеризующая электрические свойства вещества и численно равно сопротивлению проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м².

Поскольку $\rho = RS/l$, единица удельного сопротивления в СИ:

$$[\rho] = \frac{1 \text{ Ом} \cdot 1 \text{ м}^2}{1 \text{ м}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Значение удельного сопротивления вещества обусловлено химической природой вещества и существенно зависит от температуры.

4. Электрическая цепь

Простейшая электрическая цепь представляет собой соединение проводников в определенном порядке: источник тока, потребитель электрической энергии, нормально разомкнутый контакт (размыкающий) устройство, соединительные провода. Каждый элемент электрической цепи на схемах имеет условное обозначение.

Необходимо обратить внимание на то, что направлением тока в проводнике условно считают направление, в котором двигались бы в кругу положительно заряженные частицы, т.е. направление от положительного полюса источника тока к отрицательному.

5. Последовательное соединение проводников

Соединение проводников называют последовательным, если оно не содержит разветвлений, т.е. проводники расположены последовательно один за другим.

Рассмотрим участок цепи, содержащий два резистора:

1. Сила тока в каждом из проводников одинакова: $I_1 = I_2 = I$.
2. Напряжение на двух проводниках: $U = U_1 + U_2$.
3. Общее сопротивление проводников: $R = R_1 + R_2$.
4. За последовательного соединения двух проводников напряжение на каждом проводнике

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

прямо пропорциональна его сопротивлению:

При последовательном соединении n проводников выполняются следующие соотношения:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n; \quad U = \sum_{i=1}^n U_i; \quad R = \sum_{i=1}^n R_i.$$

Необходимо обратить внимание:

- общее сопротивление проводников, соединенных последовательно, больше сопротивления каждого из этих проводников;
- общее сопротивление R последовательно соединенных проводников, каждый из которых имеет сопротивление R' , равен $R = nR'$, где n - число проводников.

6. Параллельное соединение проводников

Соединение проводников называют параллельным, если для протекания тока есть два или более пути ветки и все эти ветви имеют одну пару общих точек - узлов.

В узлах происходит разветвление цепи (в каждом узле соединяются не менее трех проводов). Таким образом, разветвление является характерным признаком цепи с параллельным соединением проводников.

Рассмотрим участок цепи, содержащий два параллельно соединенных резистора:

1. Общее напряжение на участке и напряжение на каждом из двух резисторов одинаковы: $U = U_1 = U_2$.

2. Сила тока в нерозгалуженной части цепи равна сумме сил токов в отдельных ветвях: $I = I_1 + I_2$.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

3. Общее сопротивление проводников:

4. В случае параллельного соединения двух проводников сила тока в каждой ветви

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

обратно пропорциональна ее сопротивлению:

За параллельного соединения n проводников выполняются следующие соотношения:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i; \quad U = U_1 = U_2 = \dots = U_n; \quad \frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}.$$

Необходимо обратить внимание:

- общее сопротивление проводников, соединенных параллельно, меньше сопротивления каждого из этих проводников;
- общее сопротивление R параллельно соединенных проводников, каждый из которых имеет сопротивление R' , равен $R = R'/n$, где n - число проводников.

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

В случае двух проводников их общее сопротивление

7. Природа сторонних сил

Внутри источника тока происходит разделение зарядов, в результате чего на положительном полюсе источника накапливается положительный заряд, а на отрицательном - отрицательный. Вследствие этого между полюсами возникает разность потенциалов, и во внешней части цепи возникает электростатическое поле, под действием которого во внешнем круге течет ток.

Вне источника тока свободные заряды движутся под действием сил электростатического поля, но внутри источника они движутся против сил этого поля.

Причины движения зарядов в источнике по своей природе отличаются от природы кулоновских сил. Совокупность причин, через которые происходит вынужденное перемещение зарядов внутри источника тока, называют сторонними силами.

Природа сторонних сил может быть различной: они могут возникать в результате химических реакций (в гальванических элементах и аккумуляторах), изменения магнитного поля (в электромагнитных генераторах), благодаря световому воздействию (в фотоэлементах) и др.

8. ЭДС источника тока

Сторонние силы своей работой замыкают круг и обеспечивают постоянство тока. Каждый источник тока характеризуется работой действующих в нем сторонних сил по перемещению единицы положительного заряда, то есть определенной электрорушью силой (ЭДС).

· Электродвижущая сила \mathcal{E} - это скалярная величина, характеризующая энергетические свойства источника тока и равна отношению работы сторонних сил по перемещению положительного заряда внутри источника к значению этого заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор.}}}{q}$$

$$[\mathcal{E}] = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}} = 1 \text{ В.}$$

В системе СИ:

ЭДС источника тока равна 1, если сторонние силы, действующие в источнике, выполняют работу 1 Дж, перемещая единичный положительный заряд от отрицательного полюса к положительному.

Любой источник тока, по сути, является преобразователем энергии: в нем один какой-либо вид энергии превращается в электрическую. С этой точки зрения, сторонние силы и выполняют работу по разделению зарядов (физическая величина, измеряемая работой сторонних сил по разъединению единицы количества электричества).

9. Напряжение на участке цепи

Если во время прохождения по участку электрического тока на свободные заряды действуют только кулоновские силы, участок называют однородной, если действуют кулоновские и сторонние силы, то - неоднородной.

Рассмотрим неоднородную на участке 1-2 электрической цепи, изображенную на рисунке.



Поскольку участок неоднородна, то работа A_{1-2} по перемещению свободных заряженных частиц, выполняемая во время прохождения электрического тока на этом участке равна:

$$A_{1-2} = A_{1-2}^{\text{кул}} + A_{1-2}^{\text{ст.}}$$

Тогда работа по перемещению единичного положительного заряда на участке 1-2 электрической цепи равна:

$$\frac{A_{1-2}}{q} = \frac{A_{1-2}^{\text{кул}}}{q} + \frac{A_{1-2}^{\text{ст.}}}{q}$$

С учетом того, что $\frac{A_{1-2}^{\text{кул}}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2$ и $\frac{A_{1-2}^{\text{ст.}}}{q} = \mathcal{E}$, получаем:

$$\frac{A_{1-2}}{q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E} \quad \text{або} \quad U_{1-2} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E},$$

где U_{1-2} - напряжение на участке 1-2 круга.

Таким образом,

· **напряжение на участке цепи** - это скалярная величина, численно равная полной работе A_{1-2} кулоновских и сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда на участке цепи:

$$U = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}.$$

10. Закон Ома для полной цепи

Определим силу тока на участке неоднородной. С учетом закона Ома для участка цепи, получаем:

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}}{R}.$$

Если соединить концы этого участка, получим полный (замкнутый) электрическая цепь, состоящая из двух частей - внутренней и внешней. Внутренняя часть представляет собой источник тока, имеющий ЭДС \mathcal{E} и внутреннее сопротивление r ; внешняя - соединительные провода и резистор общего сопротивления R .

Для полного круга $\varphi_1 = \varphi_2$, а общее сопротивление цепи равно сумме сопротивлений внешней и внутренней частей круга $R + r$.

Тогда получаем закон Ома для полной (замкнутой) цепи:

· сила тока в замкнутой цепи, содержащей один источник, равна отношению ЭДС источника к полному сопротивлению цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

Если круг содержит несколько последовательно включенных элементов с ЭДС $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$ и т.д., то полная ЭДС цепи равна алгебраической сумме ЭДС отдельных элементов.

Общее сопротивление цепи равно сумме всех сопротивлений:

$$R_{\text{общ}} = R + r_1 + r_2 + r_3.$$

В случае последовательного соединения n одинаковых источников тока, каждый из которых имеет ЭДС \mathcal{E}' и внутреннее сопротивление r' , закон Ома имеет вид:

$$I = \frac{n\mathcal{E}'}{R + nr'}.$$

В случае параллельного соединения n одинаковых источников тока, каждое из которых имеет ЭДС \mathcal{E}' и внутреннее сопротивление r' , закон Ома имеет вид:

$$I = \frac{\mathcal{E}'}{R + \frac{r'}{n}}.$$

Закрепление изученного материала по теме «Законы постоянного тока»

1. Если увеличить в 2 раза силу тока в цепи, а время прохождения тока по проводнику уменьшить в 2 раза, то количество теплоты, выделяемое проводником ...
2. На штепсельных вилках некоторых бытовых электрических приборов имеется надпись: «6 А, 250 В». Определите максимально допустимую мощность электроприборов, которые можно включать, используя такие вилки.
3. Чему равно время прохождения тока по проводнику, если при силе тока в цепи 5 А совершается работа 540 кДж? Сопротивление проводника 24 Ом.

4. Чтобы найти мощность электрического тока надо
5. С помощью какого прибор измеряется сила тока
6. Физик, который изобрел прибор для установления основных законов электрического взаимодействия
7. Какую работу совершит электрический ток в течение 2 минут, если сила тока в проводнике 4 А, а его сопротивление 50 Ом?
8. Рассчитайте стоимость израсходованной энергии при тарифе 1,25 р. за 1 кВтч при горении электрической лампы мощностью 100 Вт, если лампа горит по 8 ч в сутки в течение месяца (30 дней).

Лекция 13. Электрический ток в различных средах

1. Природа электрического тока в металлах

Классическая электронная теория так объясняет различия свойств проводников и диэлектриков: в одних телах есть свободные носители зарядов, которые могут перемещаться в разных направлениях, а в других телах носители электрических зарядов связаны и могут лишь немного смещаться в ту или иную сторону.

Среди твердых тел встречаются тела, одинаковые по химическому составу, но различные по электрическим свойствам (например, алмаз и графит). Электрические свойства зависят, очевидно, от типа связи атомов в твердых телах.

Между атомами в кристаллах существует ковалентная связь, при котором электроны слабо удерживаются ионами кристаллической решетки. Эти так называемые свободные электроны проводимости могут создавать ток в металле. Таким образом, структуру металла можно представить себе как ионный остов, помещенный в электронный газ. Представление о электронном газе - это некоторая приближенная модель явления, в которой допускаются известные упрощения.

В основу классической электронной теории положены следующие положения:

- свободные электроны в металле ведут себя как молекулы идеального газа; «электронный газ подчиняется законам идеального газа, к которому применимы все положения МКТ;
- движение электронов происходит по законам классической механики Ньютона;
- взаимодействие электронов друг с другом не учитывается.

2. Экспериментальное доказательство существования свободных электронов в металлах

Природа носителей зарядов в металлах доказана классическими опытами Рикке, Мандельштам-Папалекси и Тольман-Стюарта.

Опыт Рикке позволяет сделать вывод, что ток в металлах осуществляют не ионы, а электроны.

Прямые доказательства электронной природы тока в металле дали опыты Мандельштам-Папалекси (1913) и Тольман-Стюарта (1916).

В этих опытах было установлено отношение заряда электрона к его массе:

$$\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}},$$

что соответствует установленному ранее из других опытов.

3. Скорость дрейфа электронов

Движение электронов в электрическом поле - результат сочетания двух движений: хаотического тепловой и направленного под действием электрического поля.

Обозначим скорость дрейфа \bar{v} . Очевидно, что именно эта скорость \bar{v} определяет силу тока. Чем больше эта скорость, тем больше электронов пройдет через поперечное сечение проводника за единицу времени.

Оценим величину средней скорости дрейфа. Для этого рассмотрим металлический проводник с площадью поперечного сечения S . За некоторый промежуток времени t через это сечение успеют пройти все электроны, которые находятся от него на расстоянии, не превышающем vt . Эти электроны находятся в мысленно выделенном объеме, равном:

$$V = S\bar{v}t.$$

Если концентрация свободных электронов в этом металле равна n , то число их в объеме V равна nV . За время t они перенесут заряд $q = enV$.

Следовательно, сила тока в проводнике:

$$I = \frac{q}{t} = \frac{enV}{t} = \frac{en\bar{v}tS}{t} = en\bar{v}S.$$

Таким образом, сила тока пропорциональна средней скорости дрейфа электронов.

Вычислим среднюю скорость направленного движения электронов в медном проводнике (концентрация $9 \cdot 10^{28}$ м⁻³) площадью поперечного сечения 1 мм² при силе тока 10 А:

$$\bar{v} = \frac{I}{neS};$$

$$\bar{v} = \frac{10}{9 \cdot 10^{28} \cdot 1,6 \cdot 10^{19} \cdot 10^{-6}} \approx 7 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

Эта скорость в миллиарды раз меньше скорости теплового движения электронов, для меди имеет значение около 1000 км/с.

4. Зависимость сопротивления проводника от температуры

Из опытов легко установить, что сопротивление металлов зависит от температуры. При нагревании проводника его геометрические размеры меняются в незначительной степени. Сопротивление проводника изменяется в основном за счет изменения его удельного сопротивления:

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

где ρ_0 , ρ - удельные сопротивления проводника соответственно при температуре $T_0 = 273$ К и при данной температуре T ; α - температурный коэффициент сопротивления.

Температурный коэффициент сопротивления α - физическая величина, характеризующая зависимость сопротивления вещества от температуры и численно равен относительному изменению удельного сопротивления вещества при нагревании его на 1 К:

$$\alpha = \frac{\Delta\rho}{\rho\Delta T}.$$

Для чистых металлов

$$\alpha = \frac{1}{273} \text{ К}^{-1}.$$

5. Явление сверхпроводимости

1911 г. голландский ученый Камерлинг-Оннес открыл явление сверхпроводимости. Если в замкнутом проводнике, который находится в сверхпроводящем состоянии, создать электрический ток, то ток в проводнике будет существовать без поддержки источника тока неограниченное время.

Эти и другие свойства сверхпроводников открывают широкие возможности их применения в технике и промышленности. Только создание сверхпроводящих линий электропередач сэкономит 10-15 % электроэнергии.

Сейчас ученые работают над получением надпроводниковых материалов, сохраняющих свои свойства при комнатной температуре. Высокотемпературная сверхпроводимость, открытая в 1986 г., должно привести к новой технической революции в электротехнике, радиотехнике, конструировании ЭВМ.

6. Электролитическая диссоциация

Как известно, проводниками электрического тока могут быть не только твердые тела, но и жидкости. Опыты показывают, что электролиты (растворы солей, кислот и щелочей в воде) являются хорошими проводниками электрического тока.

Электролитами называют вещества, растворы которых проводят электрический ток.

Молекулы растворимых веществ состоят из взаимосвязанных ионов противоположного знака (например Na^+Cl^- , H^+Cl^- , K^+Cl^- , $\text{Cu}^{++}\text{SO}_4^{--}$). Силы притяжения между этими ионами обеспечивают целостность таких молекул. Взаимодействие этих молекул с полярными молекулами растворителя, например, воды, приводит к ослаблению взаимного притяжения противоположно заряженных ионов.

Распад молекул на ионы под действием растворителя называют **электролитической диссоциацией**.

В растворе может происходить также и процесс, что называется рекомбинацией.

Рекомбинация - процесс воссоединения ионов в нейтральные молекулы.

Между процессами электролитической диссоциации и рекомбинацией ионов при неизменных условиях устанавливается динамическое равновесие, при котором число молекул, распадающихся на ионы в единицу времени, равно числу пар ионов, которые за это время соединяются в нейтральные молекулы.

7. Электролиз

Ионы в электролитах движутся хаотически до тех пор, пока в жидкость не опускаются электроды. Тогда на хаотическое движение ионов накладывается их упорядоченное движение к соответствующим электродам и в жидкости возникает электрический ток.

При ионной проводимости прохождение тока связано с переносом вещества. На электродах происходит выделение веществ, входящих в состав электролитов.

Процесс выделения вещества на электродах при прохождении электрического тока через электролит **называют электролизом**.

На аноде отрицательно заряженные ионы отдают свои лишние электроны (в химии этот процесс называется окислительной реакцией), а на катоде положительные ионы получают недостающие электроны (восстановительная реакция).

Точно измеряя массу вещества, выделяющегося на электродах при прохождении электрического тока через раствор электролита, английский физик Майкл Фарадей сформулировал законы, которые впоследствии стали называть законами электролиза (или законами Фарадея).

Первый закон Фарадея:

Масса вещества, которая выделилась на электроде при прохождении электрического тока, пропорциональна силе тока I и времени t его прохождения через электролит.

$$m = kIt.$$

Коэффициент k называют электрохимическим эквивалентом вещества. Смысл этого коэффициента можно определить из выражения: $k = m/q$.

Электрохимический эквивалент численно равен массе вещества в кг, выделяющегося при прохождении 1 Кл электричества.

Единица электрохимического эквивалента в СИ: кг/Кл.

Электрохимические эквиваленты различных веществ существенно отличаются друг от друга. Ответ на вопрос “От чего зависит электрохимический эквивалент вещества?” дает второй закон Фарадея:

электрохимический эквивалент k вещества прямо пропорционален его химическому эквиваленту M/n .

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n},$$

где F - постоянная Фарадея; n - валентность вещества; M - молярная масса вещества.

Постоянную Фарадея F определяют как произведение заряда электрона на постоянную Авогадро:

$$F = |e|N_A = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль.}$$

Таким образом, стала Фарадея равна модулю заряда одного моля электронов.

Подставляя последнее равенство во второй закон Фарадея, получаем:

$$k = \frac{1}{|e|N_A} \cdot \frac{M}{n}.$$

$$\frac{M}{N_A} = m_{\text{иона}} \quad \text{и} \quad |e|n = q_{\text{иона}}.$$

Здесь $\frac{M}{N_A} = m_{\text{иона}}$ и $|e|n = q_{\text{иона}}$. Следовательно, электрохимический эквивалент данного вещества равен отношению массы иона этого вещества к модулю его заряда:

$$k = \frac{m_{\text{иона}}}{q_{\text{иона}}}.$$

8. Механизм проводимости газов

В естественном состоянии газы и их смеси (в том числе воздуха) не проводят электрический ток. Газы, в отличие от металлов и электролитов, состоят из электрически нейтральных атомов и молекул и при нормальных условиях не содержат свободных носителей тока (электронов и ионов).

Однако при некоторых условиях можно заметно повысить электропроводность газа. Достаточно, например, подействовать пламенем спички на воздух возле заряженного электроскопа, как он сразу же разряжается. Из этого опыта делают вывод, что под действием пламени воздух теряет свои изоляционные свойства, т.е. в нем появляются свободные заряды. Воздух, как и другие газы, можно сделать электропроводным и в случае воздействия на него ультрафиолетового, рентгеновского и радиоактивного излучений.

Для отрыва электрона от атома необходима определенная энергия, которая называется энергией ионизации.

Ионизация газов - отрыв от их атомов или молекул электронов.

Противоположным процессу ионизации газов является процесс рекомбинации - воссоединение противоположно заряженных частиц в нейтральные молекулы.

Ионизатор ежесекундно создает в пространстве между электродами некоторое число ионов и электронов. Столько же ионов и электронов, соединяясь между собой, образуют нейтральные атомы. Такое динамическое равновесие существует до тех пор, пока между электродами нет электрического поля. Как только между электродами будет создано поле, сразу же на частицы, несущие заряды разного знака, начнут действовать силы, направленные в противоположные стороны. Поэтому, несмотря беспорядочного движения, заряженные частицы будут перемещаться в направлении действия на них электрического поля. Это стремящейся движение частиц под действием электрического поля и представляет собой ток в газе.

Процесс протекания электрического тока через газ называют газовым разрядом.

В ионизированном газе есть носители зарядов трех сортов: электроны, положительные и отрицательные ионы.

9. Газовый разряд

Ионизация газа может происходить под влиянием различных внешних факторов. Сильное нагревание газа, рентгеновское или радиоактивное излучение, космическое излучение, бомбардировки швидкорухомими электронами или ионами, называются внешними ионизаторами.

Существует 2 вида газового разряда: несамостоятельный и самостоятельный.

Если электропроводность газа возникает под действием ионизаторов, а с удалением последнего исчезает, то имеем несамостоятельный разряд.

Газовый разряд, который можно наблюдать только при наличии внешнего ионизатора, **называется несамостоятельным газовым разрядом.**

При определенных условиях ток в газах может проходить и без внешнего ионизатора.

Газовый разряд, который продолжается после того, как прекращается действие внешнего ионизатора, **называется самостоятельным газовым разрядом.**

Какова же причина появления носителей заряда в этом случае?

Электрическое поле действует на заряженные частицы, находящиеся в газе (электроны и ионы). Если поле достаточно сильное, то поле разгоняет электроны до такой скорости, что в результате столкновений с атомами или молекулами происходит их ионизация.

Вследствие ионизации появляются новые заряженные частицы - ионы и электроны. Они так же разгоняются полем, электроны ионизируют новые атомы или молекулы, что, в свою очередь, создает дополнительное увеличение количества заряженных частиц.

В результате количество заряженных частиц резко возрастает. Это явление получило название электронной лавины. Именно ею и объясняется самостоятельный разряд в газах.

10. Типы самостоятельного разряда

Существует несколько типов самостоятельных разрядов, среди которых различают искровой, коронный, дуговой и тлеющий.

Искровой разряд имеет вид ярких зигзагообразных прерывистых полосок, сопровождается характерным звуковым эффектом - «треском» искры.

Искровой разряд в незначительных масштабах возникает, например, в обычных выключателях, когда мы выключаем свет. А в гигантских масштабах это молния. Молния преимущественно ударяет в места, которые имеют хорошую проводимость. Кроме того, молния часто поражает отдельно расположенный предмет на возвышении. Поэтому во время грозы нельзя подходить к высоким предметам и молниеотводов, а тем более прибегать к ним.

На применении искрового разряда основаны методы электроискровой обработки металлов. Мощные, сильно-токовые разряды в водороде были первыми шагами на пути к управляемому термоядерному синтезу.

Коронный разряд - это характерная форма самостоятельного газового разряда, возникающего в резко неоднородных полях.

Из-за атмосферного давления в газах, находящихся в сильно неоднородном электрическом поле (вблизи острия, возле проводов линий электропередачи высокого напряжения и др.), наблюдается коронный разряд.

В достаточно сильном поле ионизация электронным ударом происходит уже из-за атмосферного давления. Именно такая ситуация возникает перед грозой или во время грозы. Но по мере удаления от острия поле быстро уменьшается, поэтому вдали от острия электронная лавина не возникает.

Коронный разряд применяется в электрофильтрах для очистки воздуха. Ионы, сталкиваясь с частицами дыма, заряжают их, после чего заряженные частицы притягиваются к электродам и оседают на них.

Если угольными электродами, к которым приложено напряжение в несколько десятков вольт, прикоснуться друг к другу, то в цепи возникнет большой ток. При этом в месте контакта электродов, где сопротивление максимальное, электроды нагреваются настолько, что с катода начинают вылетать электроны. Это явление называют термоэлектронной эмиссией.

Благодаря термоэлектронной эмиссии ток в воздухе не прекращается, и после разведения электродов возникает самостоятельный разряд. Его называют дуговым разрядом.

Температура во время дугового разряда достигает 6000°C (такая температура на поверхности Солнца).

Дуговой разряд был открыт в 1802 г. русским физиком В. В. Петровым.

Дуговой разряд используют для электросварки металлов.

1876 г. русский инженер П. Н. Яблочков впервые применил электрическую дугу для освещения. Дуговой разряд также используют в прожекторах, проекционных аппаратах и в маяках. В металлургии широко применяют дуговые электропечи, источником тепла в которых является дуговой разряд. В таких печах выплавляют сталь, чугун, бронзу и другие металлы.

При низком давлении возникает разряд, который называют тлеющим.

В случае уменьшения давления газа расстояние, которое пролетает электроном между последовательными столкновениями, увеличивается. Благодаря этому даже незначительное поле успевает разогнать электроны между столкновениями, так что электроны получают энергию, достаточную для ионизации атомов и молекул газа.

Электрический разряд, что происходит за низкого давления (частицы миллиметра ртутного столба, то есть в тысячи раз меньше атмосферного давления), называют тлеющим разрядом.

Тлеющий заряд используют в люминесцентных газонаполненных лампах и рекламных трубках.

11. Что такое полупроводники

Полупроводники, как это следует из их названия, по своей проводимости занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Если значение удельного электрического сопротивления примерно равен $10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, диэлектриков - $10^{12} - 10^{20} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, то полупроводников - $10^{-8} - 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Во время изучения зависимости проводимости полупроводников от внешних факторов выяснилось, что эта зависимость у полупроводников значительно отличается от той, что наблюдалась в металлах.

Во-первых, после повышения температуры удельное сопротивление полупроводников уменьшается, а удельное сопротивление металлов, наоборот, увеличивается.

Во-вторых, удельное сопротивление некоторых полупроводников уменьшается соответственно увеличению освещенности.

В-третьих, введение примесей может резко уменьшить удельное сопротивление полупроводников.

12. Механизм собственной проводимости полупроводников

Связь электронов со своими атомами в полупроводниках не такая крепкая, как в диэлектриках. И в случае повышения температуры, а так же во время яркого освещения некоторые электроны отрываются от своих атомов и становятся свободными зарядами, то есть могут перемещаться.

Благодаря этому в полупроводниках появляются отрицательные носители заряда - свободные электроны.

Проводимость полупроводника, обусловленная движением электронов, называют электронной проводимостью, а свободные электроны - электроны проводимости.

Когда электрон отрывается от атома, положительный заряд этого атома становится некомпенсированным, т.е. в этом месте появляется лишний положительный заряд. Этот положительный заряд называют «дыркой». Атом, вблизи которого образовалась дырка, может отобрать связанный электрон у соседнего атома, при этом дырка переместится до соседнего атома, а тот атом, в свою очередь, может «передать» дырку дальше. Такое «эстафетное» перемещение связанных электронов можно рассматривать как перемещение дырок, то есть положительных зарядов.

Проводимость полупроводника, обусловленная движением дырок, называется дырочной проводимостью.

Таким образом, отличие дырочной проводимости от электронной заключается в том, что электронная проводимость обусловлена перемещением в полупроводниках свободных электронов, а дырочная - перемещением связанных электронов.

В чистом полупроводнике (без примесей) электрический ток создает одинаковое количество свободных электронов и дырок. Такую проводимость называют собственной проводимостью полупроводников.

13. Влияние примесей на проводимость полупроводников

Если в чистый полупроводник добавить незначительного количества примеси, то механизм проводимости резко изменится. Это изменение легко наблюдать на примере кремния (Si) с незначительным количеством примеси мышьяка (As). В новом кристалле часть атомов Кремния будет замещаться атомами Мышьяка. Арсен, как известно, пятивалентный элемент. Четыре валентные электроны атомы мышьяка образуют парные электронные связи с соседними атомами Кремния. Пяти же валентному электрону пары не хватает, и поскольку он слабо связан с атомами мышьяка, то легко становится свободным. В результате значительное количество атомов примеси дает свободные электроны. Необходимо отметить, что примеси типа мышьяка добавляют в кристалл только электроны, а вакантные места (дырки) при этом не образуются.

Примеси, атомы которых легко отдают электроны, называются донорными.

Основными носителями зарядов в полупроводники с донорными примесями являются отрицательные частицы. Поэтому такие полупроводники называют полупроводниками n-типа.

Полупроводники, в которых основными носителями зарядов являются электроны, называют полупроводниками n-типа.

Если в кремний добавить незначительное количество трехвалентного индия, то характер проводимости полупроводника изменится. Поскольку Индий имеет три валентных электрона, то он может установить ковалентная связь только с тремя соседними атомами. Для установления связи с четвертым атомом электрона не хватит. Индий «одолжит» электрон в соседних атомах, в результате чего каждый атом Индия образует одно вакантное место - дырку.

Примеси, которые «захватывают» электроны атомов кристаллической решетки полупроводников, называются акцепторными.

В случае акцепторной примеси основными носителями заряда во время прохождения электрического тока через полупроводник есть дыры.

Полупроводники, в которых основными носителями зарядов являются дырки, называют полупроводниками p-типа.

Практически все полупроводники содержат донорные и акцепторные примеси. Тип проводимости полупроводника определяет примесь с более высокой концентрацией носителей заряда - электронов и дырок.

14. Электронно-дырочный переход

Среди физических свойств, присущих полупроводникам, наибольшее применение получили свойства контактов (p-n-перехода) между полупроводниками с разными типами проводимости.

В полупроводнике n-типа электроны участвуют в тепловом движении и диффундируют через границу в полупроводника p-типа, где их концентрация значительно меньше. Точно так же дырки диффундируют из полупроводника p-типа в полупроводник n-типа. Это происходит подобно тому, как атомы растворенного вещества диффундируют из крепкого раствора в слабый в случае их столкновения.

В результате диффузии в приконтактной области основных носителей заряда уменьшается: в полупроводнике n-типа уменьшается концентрация электронов, а в полупроводнике p-типа концентрация дырок. Поэтому сопротивление приконтактной участка оказывается очень значительным.

Если теперь полупроводник присоединить к источнику тока так, чтобы его электронная область соединялась с отрицательным полюсом источника, а дырочная - с положительным, то электрическое поле, созданное источником тока, будет направлено так, что оно перемещивает основные носители тока в каждой области полупроводника в p-n-перехода. Приконтактная область будет обогащаться основными носителями тока, и его сопротивление уменьшится. Через контакт будет проходить заметный ток. Направление тока в этом случае называют пропускным, или прямым.

Если же присоединить полупроводник n-типа к положительному, а p-типа к отрицательному полюсу источника, то приконтактная зона расширяется. Сопротивление участка значительно увеличивается. Ток через переходный слой будет очень незначительный. Это направление тока называют замыкающим, или обратным.

Электронно-дырочный переход обладает практически одностороннюю проводимость: он пропускает заметный ток от p-к n-области и очень маленький ток в обратном направлении.

Следовательно, через границу раздела полупроводников n-типа и p-типа электрический ток идет только в одном направлении - от полупроводника p-типа к полупроводнику n-типа.

Закрепление изученного материала по теме «Электрический ток в различных средах»

1. Какими носителями эл. заряда создается электрический ток в металлах?
2. Какой минимальный по абсолютному значению заряд может быть перенесен электрическим током через электролит?
3. Какими носителями эл. заряда создается электрический ток в растворах или расплавах электролитов?
4. Какие действия эл. тока всегда сопровождают его прохождение через любые среды?
5. На рис. 1 представлено схематическое изображение транзистора. Какой цифрой на нем обозначен эмиттер?
6. Каким типом проводимости обладают полупроводниковые материалы без примесей?
7. Каким типом проводимости обладают полупроводниковые материалы с донорными примесями?
8. Какой из приведенных на рис. 2 графиков отражает зависимость удельного сопротивления полупроводника от температуры?
9. При прохождении через какие среды электрического тока происходит перенос вещества?
10. В одном случае в германий добавили пятивалентный фосфор, в другом – трехвалентный галлий. Каким типом проводимости в основном обладал полупроводник в каждом случае?
11. Как изменится масса вещества, выделившегося на катоде при прохождении электрического тока через раствор электролита, если сила тока увеличится в 2 раза, а время его прохождения уменьшится в 2 раза?

Лекция 14. Магнитное поле. Свойства поля

1. Магнитное поле

В начале XIX века после открытий Эрстеда, Ампера, Фарадея и Максвелла стало ясно, что взаимодействие между магнитами и проводниками с током имеет одинаковую физическую природу. Это взаимодействие, так же как и электрическое, происходит через поле. Соответствующее поле назвали магнитным.

Магнитное поле - составляющая электромагнитного поля, что проявляет себя через действие на движущиеся заряженные частицы (или тела) и создана намагниченными телами, переменным электрическим полем и заряженными подвижными частицами (телами).

2. Силовая характеристика магнитного поля

Из опытов Ампера и определение магнитного поля следует, что магнитное поле оказывает определенное силовое воздействие. Если прямой проводник, изготовленный из немагнитного материала, подвесить на проводах между полюсами постоянного магнита и пропустить ток, то проводник отклонится от первоначального положения. Причиной такого отклонения является сила, действующая на проводник с током со стороны магнитного поля - сила Ампера.

Увеличивая или уменьшая силу тока I в проводнике или длину l активной части проводника, можно убедиться, что сила Ампера прямо пропорциональна и силе тока и длине проводника:

$$F_a \sim I \cdot l.$$

Изменяя угол между проводником и линиями магнитного поля, можно доказать, что сила Ампера будет максимальной ($F_{a \max}$), если проводник расположен перпендикулярно к линиям магнитного поля.

Поскольку $F_{a \max} \sim I \cdot l$, то для данного участка магнитного поля отношение $F_{a \max}/I$ зависит только от свойств самого поля. Поэтому это отношение выбрали за силовую характеристику магнитного поля - магнитную индукцию.

Магнитная индукция \vec{B} - это физическая величина, характеризующая силовое действие магнитного поля и численно равна отношению максимальной силы, с которой магнитное поле действует на расположенный в этом поле проводник с током, к произведению силы тока на длину активной части проводника:

$$B = \frac{F_{a \max}}{I l}.$$

Единица магнитной индукции в СИ - тесла (Тл).

1 Тл - это индукция такого однородного магнитного поля, действует с максимальной силой 1 Н на проводник длиной 1 м, через который течет ток 1 А.

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

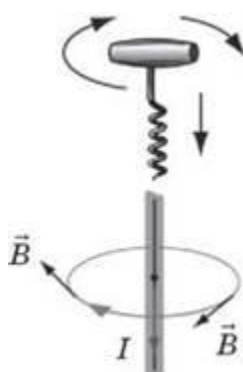
3. Направление вектора магнитной индукции

За направление вектора магнитной индукции в определенной точке поля выбрано направление, на которое указывает северный конец магнитной стрелки, установленной в этой точке.

Направление вектора магнитной индукции магнитного поля проводника с током определяют с помощью правила буравчика или правило правой руки.

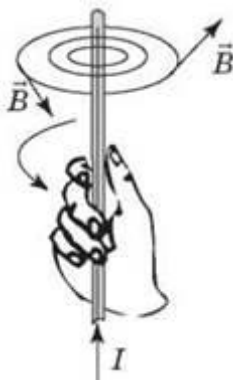
Правило буравчика:

если вкручивать буравчик по направлению тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика укажет направление вектора индукции магнитного поля тока.



Правило правой руки:

если направить отогнутый большой палец правой руки по направлению тока в проводнике, то четыре согнутых пальца укажут направление вектора индукции магнитного поля тока.



4. Графическое изображение магнитного поля

Магнитное поле удобно исследовать с помощью маленьких магнитов (магнитных стрелок) или опилок, которые в магнитном поле намагничиваются и становятся маленькими магнитами. Эти «маленькие магнитики» выстраиваются вдоль определенных линий, образуя наглядное изображение магнитного поля. Эти линии называют линиями магнитного поля (или линиями магнитной индукции).

Линии магнитной индукции - условные линии, в каждой точке которых касательная совпадает с линией, вдоль которой обращен вектор магнитной индукции.

Опыты показывают, что силовые линии магнитного поля всегда замкнуты. В отличие от силовых линий электрического поля, они нигде не начинаются и не заканчиваются. Поле с такими линиями называют вихревым. Следовательно, магнитное поле является вихревым.

Линии магнитного поля реально не существуют, они всего лишь удобный способ его описания. Силовым линиям магнитного поля приписывают определенное направление.

Закрепление изученного материала по теме «Магнитное поле»

1. Длина активной части проводника 15 см. Угол между направлением тока и индукцией магнитного поля равен 90° . С какой силой магнитное поле с индукцией 40 мТл действует на проводник, если сила тока в нем 12 А?

2. На протон, движущийся со скоростью 10^7 м/с в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям индукции, действует сила $0,32 \cdot 10^{-12}$ Н. Какова индукция магнитного поля?
3. Определите индуктивность катушки, которую при силе тока 8,6 А пронизывает магнитный поток 120 мВб.
4. Определите по условию задачи №2 радиус окружности, по которой движется протон, период обращения, импульс электрона, его кинетическую энергию, а также ускоряющую разность потенциалов, которую прошел протон, прежде чем попал в магнитное поле.
5. Участок проводника длиной 10 см находится в магнитном поле. Сила электрического тока, протекающего по проводнику, 10 А. При перемещении проводника на 8 см в направлении действия силы Ампера она совершила работу 4 мДж. Чему равна индукция магнитного поля? Проводник расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции.
6. По катушке протекает ток, создающий магнитное поле энергией 0,5 Дж. Магнитный поток через катушку 10 мВб. Найти силу тока.
7. Частица массой m , несущая заряд q , движется в однородном магнитном поле с индукцией \mathbf{B} по окружности радиуса R со скоростью v . Что произойдет с радиусом орбиты, периодом обращения и кинетической энергией частицы при увеличении индукции магнитного поля?
8. Горизонтальные рельсы находятся на расстоянии 30 см друг от друга. На них лежит стержень массой 100 г перпендикулярно рельсам. Вся система находится в вертикальном магнитном поле с индукцией 0,5 Тл. При пропускании по стержню тока 2 А, он движется с ускорением 2 м/с^2 . Найти коэффициент трения между рельсами и стержнем.
9. Частица массой 10^{-5} кг и зарядом 10^{-6} Кл ускоряется однородным электрическим полем напряженностью 10 кВ/м в течение 10 с. Затем она влетает в однородное магнитное поле индукцией 2,5 Тл, силовые линии которого перпендикулярны скорости частицы. Найти силу, действующую на частицу со стороны магнитного поля. Начальная скорость частицы равна нулю.

Лекция 15. Сила и закон Ампера. Сила Лоренца

1. Как определяют модуль и направление силы Ампера

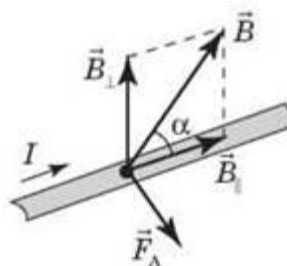
Рассмотрим силу, действующую со стороны магнитного поля на проводник с током. Эту силу называют силой Ампера.

$$B = \frac{F_{A \max}}{Il}$$

Из определения магнитной индукции $B = \frac{F_{A \max}}{Il}$ следует, что максимальная сила Ампера равна: $F_{A \max} = BI$.

Сила Ампера зависит от ориентации проводника относительно вектора магнитной индукции: магнитное поле не влияет на проводник с током, ось которого параллельна к линиям магнитной индукции, сила Ампера максимальна в случае, когда ось проводника перпендикулярна к линиям магнитной индукции.

Модуль силы Ампера зависит только от проекции вектора магнитной индукции на ось, перпендикулярную к оси проводника: $B = B \sin \alpha$, где α - угол между вектором магнитной индукции и направлением тока в проводнике.

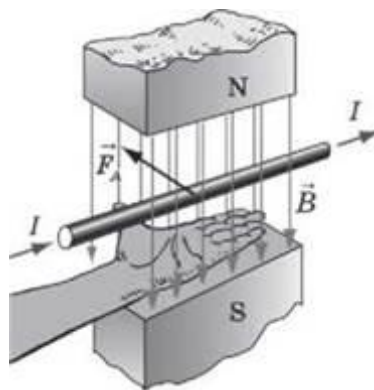


Таким образом, закон Ампера можно записать в виде:

$$F_A = BIl \sin \alpha.$$

Направление силы Ампера определяют по **правилу левой руки**:

если раскрытую ладонь левой руки расположить так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока в проводнике, то отогнутый в плоскости ладони большой палец покажет направление силы, действующей на проводник со стороны магнитного поля.

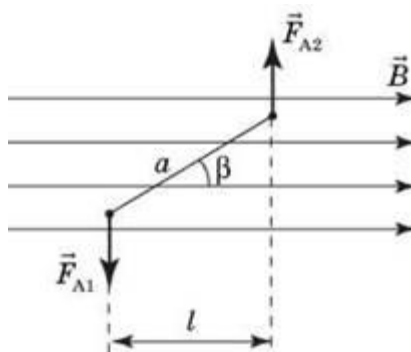


2. Рамка с током в магнитном поле

Рассмотрим действие однородного магнитного поля с магнитной индукцией B на твердую прямоугольную рамку с силой тока в ней I . Будем считать линии магнитного поля горизонтальными.

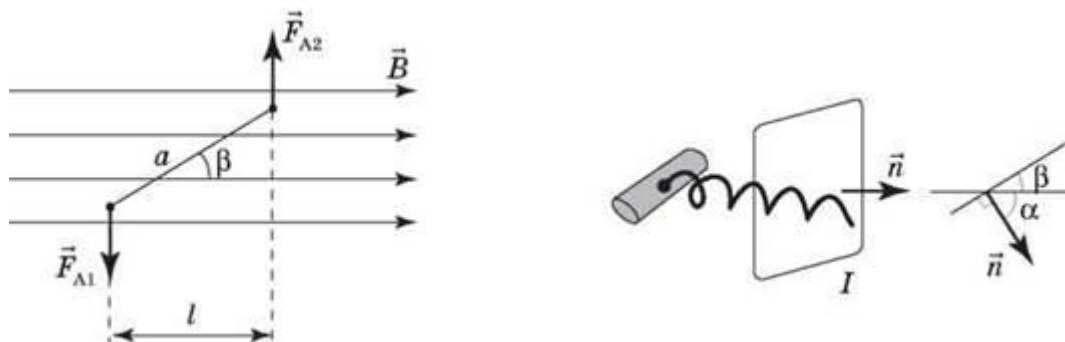
Рассмотрим, какие силы действуют на противоположные стороны рамки с током в магнитном поле. По ним текут токи, направленные в противоположные стороны. Поэтому силы, действующие со стороны магнитного поля на противоположные стороны рамки, будут противоположно направлены. Эти силы будут поворачивать рамку. Таким образом, магнитное поле оказывает на рамку с током ориентировочное действие: рамка будет поворачиваться до тех пор, пока обе силы Ампера не будут направлены вдоль одной прямой, то есть пока плоскость рамки не станет перпендикулярной магнитных линий.

Определим момент сил, действующих на рамку. Обозначим a и b - длины соответственно горизонтальной и вертикальной сторон рамки, β - угол между плоскостью рамки и линиями магнитного поля. На рисунке показан вид рамки сверху и силы, действующие на вертикальные стороны рамки.



Модуль каждой из этих сил $F_a = BIb$, момент пары сил равен $M = FA1 = Blab \cdot \cos \beta = BIS \cdot \cos \beta$, где S - площадь рамки.

Положение рамки принято определять по углу между линиями магнитного поля и перпендикуляром (вектором нормали \vec{n}) к площади рамки. Направление нормали выбирают так, чтобы он был связан с направлением тока в рамке правилом буравчика. Очевидно, что $\cos\beta = \sin\alpha$. Итак, на рамку действует момент сил $M = BIS \cdot \sin\alpha$.



Момент сил равен нулю, если $\alpha = 0$ (в положении устойчивого равновесия) или $\alpha = 180^\circ$ (в положении неустойчивого равновесия). В положении устойчивого равновесия силы Ампера пытаются растянуть рамку, а в положении неустойчивого равновесия - сжать.

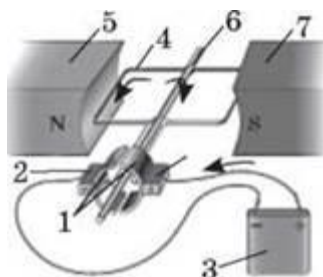
3. Как работает двигатель постоянного тока

Вращение рамки с током в магнитном поле используют в электрических двигателях - устройствах, в которых электрическая энергия превращается в механическую.

Чтобы ротор (подвижная часть электродвигателя) вращался, необходимо решить две главные проблемы.

1). Проводник нельзя припаять одним концом к контакту на роторе, а вторым - к контакту на статоре (неподвижной части электродвигателя): такой проводник быстро оборвется. Чтобы поддерживать ток в обмотке ротора, изобрели скользящие контакты, а в большинстве электродвигателей переменного тока научились вообще обходиться без контактов, используя явление электромагнитной индукции.

2). Если направление магнитной индукции и тока в рамке не меняется, то ротор просто остановится в положении устойчивого равновесия. Чтобы обеспечить непрерывное вращение ротора, в двигателях постоянного тока применяют коллектор. Благодаря использованию коллектора направление тока в рамке через каждые пол оборота меняется на противоположный. В результате силы, действующие на рамку, вращают ее все время в том же направлении (см. рисунок).



Неподвижную часть электродвигателя называют статором (в переводе с латыни - «неподвижный»). В статоре небольшого электродвигателя расположен постоянный магнит с полюсами специальной формы. В статоре мощного электродвигателя расположен электромагнит.

Итак, чтобы сконструировать электрический двигатель, необходимо иметь: 1) постоянный магнит; 2) ведущий контур; 3) источник тока; 4) коллектор.

4. Модуль и направление силы Лоренца

Из экспериментов известно, что в случае отсутствия электрического поля на заряженную частицу может действовать определенная сила, если частица движется.

Силу, с которой магнитное поле действует на движущиеся заряженные частицы, называют силой Лоренца \vec{F}_L .

Если пропустить через определенную точку магнитного поля различные заряженные частицы в разных направлениях и с разными скоростями, то можно обнаружить следующее:

- на частицу, которая движется вдоль линии магнитного поля, сила Лоренца не действует;
- модуль силы Лоренца будет максимальным, если частица движется перпендикулярно линии магнитного поля.
- максимальный модуль силы Лоренца прямо пропорционален модулям заряда частицы и скорости ее движения:

$$F_{L \text{ макс}} \sim |q| \cdot v.$$

Таким образом, модуль силы Лоренца равен:

$$F_L = B|q_0|v \sin \alpha,$$

где B - магнитная индукция поля, в котором движется частица; q_0 - заряд частицы; v - скорость движения частицы; α - угол между линией движения частицы и линией магнитного поля.

Направление силы Лоренца, действующей на положительно заряженную частицу, определяют с помощью **правила левой руки**:

если раскрытую ладонь левой руки расположить так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление скорости положительно заряженной частицы, то отогнутый в плоскости ладони большой палец покажет направление силы, действующей на частицу.

На подвижную отрицательно заряженную частицу (например, электрон) сила Лоренца действует в противоположном направлении.

5. Как движутся заряженные частицы под действием силы Лоренца?

Рассмотрим возможные случаи движения заряженной частицы в однородном магнитном поле.

- 1). Скорость частицы направлена вдоль линий магнитной индукции поля.

В этом случае угол α между направлением вектора скорости \vec{v} и вектора магнитной индукции \vec{B} равен нулю (или 180°). Поскольку $\sin \alpha = 0$, то $F_L = 0$. Следовательно, магнитное поле не действует на частицу, и она движется равномерно прямолинейно.

- 2). Скорость частицы направлена перпендикулярно к линиям магнитной индукции поля.

В этом случае угол α между направлением вектора скорости \vec{v} и вектора магнитной индукции \vec{B} поля равен 90° , поэтому $F_L = B|q_0|v$, поскольку $\sin \alpha = 1$. В соответствии с правилом левой руки в любой точке траектории движения частицы, сила Лоренца перпендикулярна к направлению скорости ее движения. Следовательно, частица будет двигаться равномерно по окружности.

Согласно второму закону Ньютона, $F_L = ma$. Тогда:

$$B|q_0|v = \frac{mv^2}{R}.$$

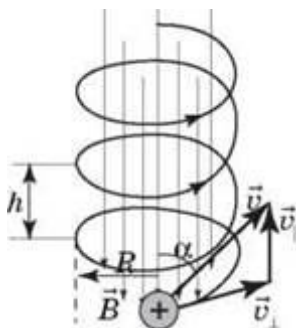
Отсюда можно найти радиус R траектории движения частицы и период ее вращения:

$$R = \frac{mv}{B|q_0|}, \quad T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{B|q_0|}.$$

Период обращения частицы не зависит от скорости ее движения и радиуса траектории.

6. Скорость частицы направлена под некоторым углом α к линиям магнитной индукции поля.

В этом случае скорость \vec{v} частицы можно разложить на две составляющие: \vec{v}_1 направлена вдоль магнитных линий поля, и ее поле не меняет; \vec{v}_\perp , перпендикулярна к линиям поля, и сила Лоренца меняет ее направление, вызывая движение частицы по окружности.



Таким образом, траектория движения частицы - спираль, шаг h (расстояние между соседними витками) которой определяется составляющей \vec{v}_1 : $h = \vec{v}_1 T$, а радиус R витка спирали - составляющей \vec{v}_\perp : $R = m \vec{v}_\perp / Bq$.

Работу циклотронов - ускорителей заряженных частиц - определяет тот факт, что период вращения частицы в однородном магнитном поле не зависит от скорости и радиуса траектории.

Закрепление изученного материала по теме «Сила Ампера и Сила Лоренца»

1. Определить силу, с которой однородное магнитное поле действует на проводник длиной 20 см, если сила тока в нем 300 мА, расположенный под углом 30 градусов к вектору магнитной индукции. Магнитная индукция составляет 0,5 Тл.
2. Проводник с током 5 А находится в магнитном поле с индукцией 10 Тл. Определить длину проводника, если магнитное поле действует на него с силой 20Н и перпендикулярно проводнику.
3. Определить силу, действующую на заряд 0,005 Кл, движущийся в магнитном поле с индукцией 0,3 Тл со скоростью 200 м/с под углом 30 градусов к вектору магнитной индукции.
4. Какова скорость заряженного тела, перемещающегося в магнитном поле с индукцией 2 Тл, если на него со стороны магнитного поля действует сила 32 Н. Скорость и магнитное поле взаимно перпендикулярны. Заряд тела равен 0,5 мКл.
5. Определить силу тока в проводнике длиной 20 см, расположенному перпендикулярно силовым линиям магнитного поля с индукцией 0,06 Тл, если на него со стороны магнитного поля действует сила 0,48 Н.

6. В магнитном поле с индукцией $B=4$ Тл движется электрон со скоростью 10^7 м/с, направленной перпендикулярно линиям индукции магнитного поля. Чему равен модуль силы F , действующей на электрон со стороны магнитного поля?

Лекция 16. Явление электромагнитной индукции

1. Опыты Фарадея

Английский физик Майкл Фарадей, узнав об опытах Эрстеда, занялся поисками связи магнитных явлений с электрическими. Он поставил перед собой задачу: «Если электрический ток создает магнитное поле, то нельзя ли с помощью магнитного поля получить электрический ток?» Поиски Фарадея продолжались с 1821 до 1831 года. Он провел значительную работу и проявил находчивость, настойчивость и упорство, пока, наконец, не получил электрический ток с помощью магнитного поля. Фарадей доказал, что магнитное поле может порождать электрический ток, открыв явление электромагнитной индукции. На этом явлении основана сегодня действие генераторов электрического тока на всех электростанциях Земли.

Можно провести ряд опытов, которые являются современными вариантами опытов Фарадея.

Опыт 1. Замыкаем катушку на гальванометр и вводим в нее постоянный магнит. Во время движения магнита стрелка гальванометра отклоняется, что свидетельствует о наличии электрического тока.

Если оставить магнит неподвижным, а двигать катушку, то электрический ток в катушке возникает только во время ее движения.

Опыт 2. Если взять две катушки и надеть их на общий сердечник, то в случае изменения силы тока в одной катушке в другой катушке можно наблюдать появление тока.

Опыт 3. Если вращать замкнутую катушку вблизи полюса магнита, то в катушке возникает электрический ток.

Опыт 4. Если разместить вблизи полюса магнита замкнутый контур и изменять его площадь, то в контуре возникает электрический ток.

2. Поток магнитной индукции

Проанализировав перечисленные выше опыты, можно заметить, что в замкнутом проводящем контуре ток возникает лишь тогда, когда меняется число линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность, ограниченную контуром. Физическую величину, которую наглядно можно рассмотреть как величину, пропорциональную числу линий магнитной индукции, пронизывающих эту поверхность, называют потоком магнитной индукции (или магнитным потоком).

Поток магнитной индукции Φ - это физическая величина, характеризующая распределение магнитного поля по поверхности, ограниченной замкнутым контуром, и численно равна произведению магнитной индукции B на площадь S поверхности и на косинус угла α между вектором магнитной индукции и нормалью к поверхности:

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

Единица потока магнитной индукции в СИ - вебер:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2.$$

Магнитный поток 1 Вб создает однородное магнитное поле с индукцией 1 Тл через поверхность площадью 1 м^2 , расположенную перпендикулярно вектору магнитной индукции.

3. Явление электромагнитной индукции

Исходя из формулы $\Phi = BS \cos \alpha$, все опыты можно условно разделить на три группы:

- а) опыты, в которых изменяется индукция магнитного поля B ;
- б) опыты, в которых изменяется площадь контура S ;
- в) опыты, в которых изменяется угол между направлением вектора магнитной индукции и нормалью к площадке.

На основании выполненных исследований можно подвести учащихся к выводу: для возбуждения электрического тока в замкнутом контуре необходимо изменять магнитный поток через этот контур.

Явление электромагнитной индукции заключается в том, что: индукционный ток в замкнутом контуре возникает при изменении магнитного потока через площадь, ограниченную контуром.

Существуют две причины возникновения индукционного тока:

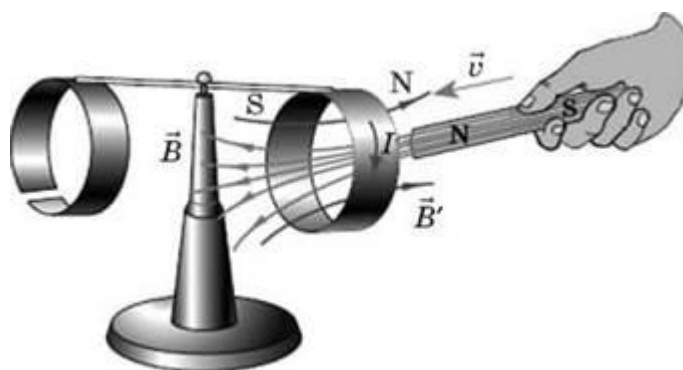
- 1) во время движения контура в магнитном поле;
- 2) во время нахождения неподвижного контура в переменном магнитном поле.

Лекция 17. Правило Ленца

1. Как определять направление индукционного тока?

Из ряда опытов следует, что в разных случаях направление индукционного тока может быть различным: отброс стрелки гальванометра в некоторых опытах происходило в одну сторону, а в других - в противоположную. Найдем общее правило, по которому определяем направление индукционного тока.

Если приближать магнит к кольцу, то оно начнет отталкиваться от магнита. Это отталкивание можно объяснить только тем, что в кольце возникает индукционный ток, обусловленный ростом магнитного потока через кольцо, а кольцо с током взаимодействует с магнитом.



Иначе говоря, если магнитный поток через контур увеличивается, то направление индукционного тока в контуре такой, что вектор магнитной индукции созданного этим током поля направлен противоположно вектору магнитной индукции внешнего магнитного поля.

В случае же удаления магнита в проводящем кольце возникает индукционный ток такого направления, что кольцо притягивается к магниту. Или иначе: если магнитный поток через контур уменьшается, то направление индукционного тока таково, что вектор магнитной индукции созданного этим током поля направлен так же, как вектор магнитной индукции внешнего магнитного поля.

Общим в этих исследованиях является то, что индукционный ток имеет такое направление, что созданный им магнитный поток всегда пытается компенсировать ту изменение магнитного потока, вызвавшего этот ток.

Эта закономерность называется правилом Ленца, потому что она была установлена опытным путем российским физиком Эмилием Христиановичем Ленцем через два года после открытия Фарадеем явления электромагнитной индукции.

Часто бывает удобнее воспользоваться другой формулировкой правила Ленца: во всех случаях электромагнитной индукции токи и силы направлены так, чтобы противодействовать причине их возникновения.

Правило Ленца имеет глубокий физический смысл - оно выражает закон сохранения энергии. Для создания индукционного тока необходима энергия, следовательно, следует выполнить дополнительную работу внешних сил. После приближения магнита к контуру или отдаления его от контура всегда возникает сила, препятствующая движению. Чтобы преодолеть это противодействие, выполняется работа.

2. Алгоритм решения задач

Во время решения задач на правило Ленца следует придерживаться такого алгоритма:

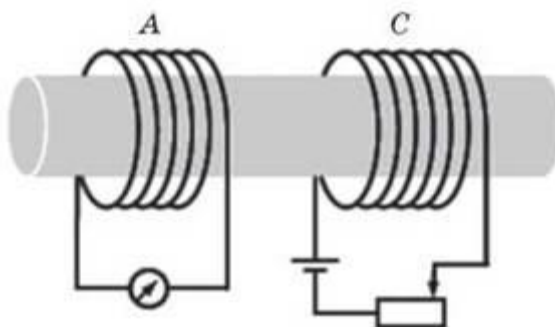
1) определить направление вектора \vec{B} магнитной индукции внешнего магнитного поля;
2) из условия задачи выяснить, увеличивается или уменьшается магнитный поток, пронизывающий контур;

3) определить направление вектора \vec{B} магнитной индукции магнитного поля индукционного тока: если магнитный поток увеличивается, то $\vec{B}, \uparrow \downarrow \vec{B}$; если уменьшается, то $\vec{B}, \uparrow \uparrow \vec{B}$;

4) определить направление индукционного тока, воспользовавшись правилом правой руки.

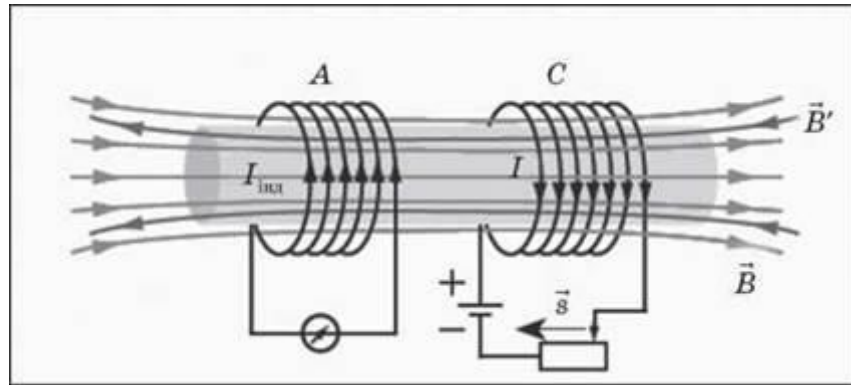
Как пример рассмотрим решение такой задачи.

Катушки А и С надели на общий сердечник. Определите направление индукционного тока в катушке А во время перемещения ползунка реостата влево.



Решение

1) Покажем направление электрического тока в катушке С и, воспользовавшись правилом правой руки, определим направление магнитной индукции \vec{B} внешнего магнитного поля (магнитного поля тока в катушке С).



2) После перемещения ползунка реостата влево сопротивление реостата уменьшается, следовательно, согласно закону Ома, сила тока в цепи катушки С увеличивается, поэтому увеличивается и магнитная индукция B внешнего магнитного поля, созданного этим током. Поскольку $B \uparrow$, то и увеличивается магнитный поток, пронизывающий катушку ($R \downarrow \Rightarrow I \uparrow \Rightarrow B \uparrow \Rightarrow \Phi \uparrow$).

3) Поскольку $\Phi \uparrow$, то вектор \vec{B}' магнитной индукции магнитного поля тока в катушке А направленный противоположно вектору \vec{B} магнитной индукции внешнего магнитного поля:

$$(\Delta\Phi > 0 \Rightarrow \vec{B}' \uparrow \downarrow \vec{B}).$$

4) Зная направление вектора \vec{B} и воспользовавшись правилом правой руки, определим направление индукционного тока в катушке А.

Ответ: индукционный ток в катушке А направленный по передней стенке вверх.

3. Закон электромагнитной индукции

Как известно, электрический ток существует в замкнутом контуре, если выполняются два условия: наличие свободных заряженных частиц и наличие электрического поля. Но в опытах Фарадея в кругу катушки, замкнутой на гальванометр, нет электрического поля, созданного электрическими зарядами (но ток есть!). Это может означать только одно: в случае изменения магнитного потока, пронизывающего проводящий контур, в контуре возникают посторонние (не кулоновские) силы, которые перемещают электрические заряды вдоль контура, выполняя при этом работу.

Работу сторонних сил (АСТ) по перемещению единичного положительного заряда называют ЭДС индукции $\mathcal{E}_{\text{инд}}$:

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$

Эту величину можно измерить, используя закон Ома для полного круга, согласно которому $\mathcal{E}_{\text{инд}} = I_{\text{инд}} R$, где $I_{\text{инд}}$ - сила индукционного тока, R - сопротивление контура. Опытным путем было установлено закон электромагнитной индукции:

ЭДС индукции в замкнутом контуре равна модулю скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур:

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$

Для возникновения индукционного тока проводник должен быть замкнутым, при этом сила тока зависит не только от скорости изменения магнитного потока, но и от сопротивления проводника:

$$I_{\text{инд}} = \frac{1}{R} \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$

Для катушки, состоящей из N витков, помещенной в переменное магнитное поле, ЭДС индукции будет в N раз больше:

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = N \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$

С учетом правила Ленца закон электромагнитной индукции записывается в

виде
$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Таким образом, ЭДС индукции в замкнутом контуре равна скорости изменения магнитного потока через этот контур, взятый с противоположным знаком.

4. Вихревое электрическое поле

Откуда же берутся посторонние силы, которые действуют на заряды в контуре? В случае неподвижного относительно наблюдателя проводника причина появления посторонних сил - переменное магнитное поле. Дело в том, что переменное магнитное поле порождает в окружающем пространстве электрическое поле - именно оно действует на свободные заряженные частицы в проводнике. Но порождение электрического поля магнитным полем происходит даже там, где нет ведущего контура, и не возникает электрический ток. Как видим, магнитное поле может не только передавать магнитные взаимодействия, но и быть причиной появления другой формы материи - электрического поля.

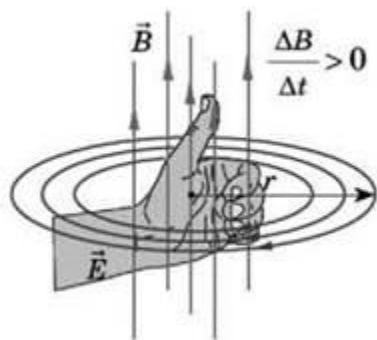
Однако электрическое поле, порождаемое переменным магнитным полем, имеет существенное отличие от поля, созданного заряженными частицами.

Электрическое поле, создаваемое переменным магнитным полем, является вихревым, то есть его силовые линии являются замкнутыми.

Вихревое электрическое поле имеет некоторые особенности:

1) поле проявляет себя через силовое воздействие на заряженные частицы, поэтому основной характеристикой вихревого электрического поля является напряженность \vec{E} ;

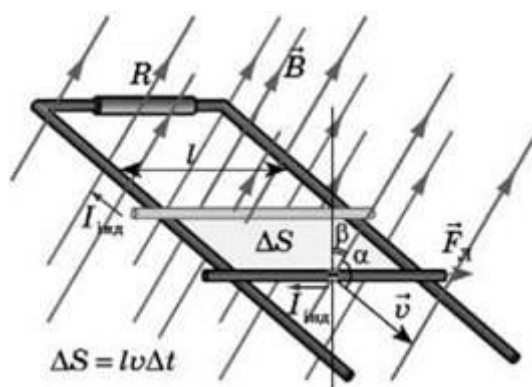
2) в отличие от электростатического поля, линии напряженности вихревого электрического поля являются замкнутыми. Направление этих линий можно определить с помощью, например, левой руки, как показано на рисунке:



3) в отличие от электростатического поля, работа вихревого электрического поля по замкнутой траектории не равна нулю (вихревое электрическое поле является непотенциальным).

5. ЭДС индукции в движущихся проводниках

Рассмотрим проводник длиной l , движущегося поступательно в однородном магнитном поле с индукцией \vec{B} со скоростью \vec{v} , направленной под углом α к линиям магнитной индукции поля.



На электроны, движущиеся вместе с проводником в магнитном поле, действует сила Лоренца, направленная вдоль проводника. Ее модуль

$$F = |q_0| B v \sin \alpha,$$

где q_0 - заряд свободной заряженной частицы. Под действием этой силы происходит разделение зарядов - свободные заряженные частицы сместятся к одному концу проводника, а на другом конце возникнет их нехватка, то есть будет превышать заряд противоположного знака. Следовательно, в этом случае сторонняя сила - это сила Лоренца. Разделение зарядов приведет к появлению электрического поля, что будет препятствовать дальнейшему разделению зарядов.

Этот процесс прекратится, когда сила Лоренца и сила $\vec{F} = q_0 \vec{E}$ уравновесят друг друга.

Следовательно, внутри проводника напряженность электрического поля $E = B v \sin \alpha$, а разность потенциалов на концах проводника $U = El = B v l \sin \alpha$. Поскольку мы рассматриваем разомкнутое круг, разность потенциалов на концах проводника равна ЭДС индукции в этом проводнике. Таким образом,

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = B v l \sin \alpha.$$

Если такой проводник замкнуть, то по кругу пройдет электрический ток. Таким образом, движущийся в магнитном поле проводник можно рассматривать, как своеобразный источник тока характеризуется ЭДС индукции.

Лекция 18. Самоиндукция. Индуктивность

1. Самоиндукция

Если магнитный поток через замкнутый контур меняется, то возникает вихревое электрическое поле, а вследствие этого — ЭДС индукции в катушке. Магнитный поток не обязательно должен быть создан полем магнита или полем другой катушки: точно так же поток может быть создан электрическим током самой катушки. Следовательно, магнитный поток может меняться во время изменения силы тока в катушке.

Поэтому любое изменение силы тока в катушке приводит к возникновению в этой же катушке ЭДС (ее называют ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{\text{си}}$).

Самоиндукция — явление возникновения ЭДС индукции в проводящем контуре вследствие изменения силы тока в этом же контуре.

Согласно правилу Ленца ЭДС самоиндукции противодействует изменению силы тока. Следовательно, самоиндукция всегда ослабляет увеличение силы тока после замыкания цепи постоянного тока. При отсутствии самоиндукции сила тока мгновенно возросла бы до максимального значения во время замыкания ключа. Но если в кругу есть катушка с большим количеством витков, а тем более с ферромагнитным сердечником, сила тока будет повышаться значительно медленнее.

Итак, вследствие явления самоиндукции замкнутый контур с током обладает «инертностью»: силу тока в контуре, содержащем катушку, не можно увеличить мгновенно. В то же время ее нельзя и уменьшить мгновенно.

2. ЭДС самоиндукции

Как известно ученикам, энергетической характеристикой вихревого электрического поля ЭДС индукции. Поскольку самоиндукция является частным случаем электромагнитной индукции, то для вычисления ЭДС самоиндукции можно применить формулу:

$$\mathcal{E}_{\text{си}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

где N — число витков.

Однако на практике ЭДС самоиндукции связывают не со скоростью изменения магнитного потока, а со скоростью изменения силы тока. Модуль вектора индукции магнитного поля, создаваемого током, пропорционален силе тока. Поскольку магнитный поток Φ пропорционален B , то $\Phi \sim B \sim I$.

Следовательно, можно утверждать, что $\Phi = LI$, где L — коэффициент пропорциональности между током в проводящем контуре и магнитном потоке, пронизывающего этот контур. Величину L называют коэффициентом самоиндукции или индуктивностью контура.

Если считать, что форма контура остается неизменной и магнитный поток меняется только за счет изменения силы тока, то для ЭДС самоиндукции получим:

$$\mathcal{E}_{\text{си}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

3. Индуктивность

Ток I , протекающий через любой замкнутый контур, создает магнитный поток Φ , пронизывающий поверхность, ограниченную этим проводником. Если проводник неподвижен и магнитные свойства

среды не меняются, магнитный поток пропорционален силе тока: $\Phi \sim I$ или $\Phi = LI$, где L — величина, характеризующая контур (например, катушку) и окружающая его среда (сердечник).

Для такого способа введения ее физический смысл индуктивности определяют из выражения:

$$L = \frac{\Delta\Phi}{\Delta I}.$$

Индуктивность — это собственное качество ведущего контура, определяемая отношением изменения потока магнитной индукции, пронизывающего контур, к изменению силы тока в нем.

Из последнего выражения следует, что индуктивность численно равна потоку магнитной индукции, которая создается силой тока в 1 А. В системе СИ единицей индуктивности является генри (Гн). Эта единица названа в честь американского физика Джозефа Генри, впервые наблюдал явление самоиндукции 1832 года, в следующем году после открытия явления электромагнитной индукции:

$$|L| = \frac{1 \text{ Вб}}{1 \text{ А}} = 1 \text{ Гн}.$$

1 генри — это индуктивность такого проводника, в котором ток силой в 1 А создает магнитный поток в 1 Вб.

Для решения задач с использованием формулы $\mathcal{E}_{\text{ст}} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ можно дать и другое определение индуктивности и единицы ее измерения.

При $\Delta I = 1 \text{ А}$ и $\Delta t = 1 \text{ с}$ получаем: $\mathcal{E}_{\text{ст}} = -L$. Таким образом, соответственно к увеличению индуктивности возрастает и ЭДС индукции.

Индуктивность проводника равна 1 Гн, если в нем при изменении силы тока в 1 А за 1 с возникает ЭДС самоиндукции 1 В:

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

4. Можно утверждать, что магнитное поле имеет энергию?

Рассмотрим явление самоиндукции в контуре с лампочкой с точки зрения закона сохранения энергии. Откуда берется энергия, за счет которой в течение некоторого времени после отключения источника питания поддерживается электрический ток в контуре? Ведь вспышка происходит тогда, когда ключ уже разомкнут. Следовательно, энергия не может браться от аккумулятора. Очевидно, что эта энергия была ранее запасенная в виде энергии магнитного поля.

Таким образом, описанное выше явление самоиндукции наглядно показывает, что магнитное поле имеет запас энергии. Эта энергия расходуется на создание магнитного поля, поэтому в случае исчезновения поля ее можно получить обратно.

2. Вычисление энергии магнитного поля

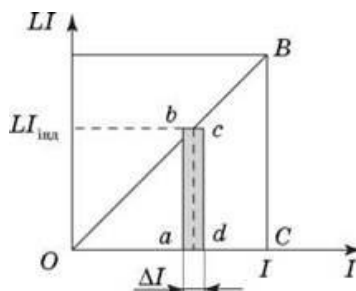
Сразу же после замыкания цепи, когда ток начинает нарастать, в проводнике появляется вихревое электрическое поле, которое противодействует электрическому полю источника питания. Источник выполняет дополнительную работу против сил вихревого поля. Согласно закону сохранения энергии $\Delta W_{\text{м}}$ — энергия, накапливает магнитное поле за незначительный интервал времени Δt , — равна дополнительной работе, которую выполняет источник для создания тока:

$$\Delta W_{\text{м}} = -A_{\text{ст}} = -\mathcal{E}_{\text{ст}} q = -\mathcal{E}_{\text{ст}} I_{\text{мд}} \Delta t,$$

где АСТ — работа вихревого поля, равна по модулю и противоположна по знаку дополнительной работе источника питания за интервал времени Δt ; $I_{\text{инд}}$ — средняя сила тока в проводнике за интервал времени Δt .

Поскольку $\mathcal{E}_{\text{ст}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, получаем $\Delta W_{\text{м}} = L \frac{\Delta I}{\Delta t} I_{\text{инд}} \Delta t = LI_{\text{инд}} \Delta I$.

Чтобы найти полную энергию WM, магнитного поля, обратимся к графику зависимости LI(I).



Энергия $\Delta W_{\text{м}}$ численно равна площади участка abcd со сторонами $L I_{\text{инд}}$ и ΔI (ΔI — изменение силы тока за интервал времени Δt). Полная энергия WM, которую накапливает магнитное поле за время возрастания силы тока от 0 до I, численно равна площади треугольника OBC со сторонами I и LI.

Полная энергия магнитного поля прямо пропорциональна квадрату силы тока в проводнике:

$$W_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2}.$$

Необходимо обратить внимание на аналогию индуктивности и массы в механике. Так, что больше (при прочих равных условиях) индуктивность L, то нарастание тока I медленнее. А что больше (при прочих равных условиях) масса m, тем медленнее нарастание скорости v .

Частичное сходство между процессом установления тока в катушке индуктивности и разгоном автомобиля позволяет предположить, что величины работы по разгону автомобиля и по установлению тока выражаются аналогичными соотношениями.

Механическая работа по разгону автомобиля равна $\frac{mv^2}{2}$.

Эту величину можно принять как модель для установки силы тока в катушке индуктивности. Соотношение между I v , L и m позволяет превратить $\frac{mv^2}{2}$ в $\frac{LI^2}{2}$.

5. Что такое электромагнитное поле?

Электрическое поле создают заряды. Магнитное поле возникает при движении электрических зарядов через проводник. Электромагнитное поле — это особая форма материи, через которую осуществляется воздействие между электрическими заряженными частицами.

Электромагнитное поле — форма существования материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между заряженными частицами.

Считается, что электромагнитное поле имеет две составляющие: электрическую, которая характеризуется действием поля на движущиеся и неподвижные заряженные частицы, и магнитную, которая характеризуется действием только на движущиеся заряженные частицы.

Электрическое поле характеризуется воздействием силы $\vec{F}_{\text{эл}}$ на заряд q : $\vec{F}_{\text{эл}} = q\vec{E}$. Источником электрического поля может быть любая заряженная частица или заряженное тело. Кроме того, источником электрического поля может быть переменное магнитное поле.

Магнитное поле характеризуется воздействием на движущиеся заряженные частицы силой Лоренца

$$F_{\text{л}} = qBv\sin\alpha.$$

Источником магнитного поля могут быть движущиеся заряженные тела и частицы и намагниченные тела.

6. Гипотеза Максвелла

Английский физик Дж. Максвелл пришел к выводу, что магнитное поле, которое изменяется со временем, порождает электрическое поле. Это очень важный вывод: ведь порождения электрического поля магнитным полем происходит даже там, где нет проводящего контура и не возникает электрический ток. Как видим, магнитное поле может не только передавать магнитные взаимодействия, но и быть причиной появления другой формы материи — электрического поля.

Электрическое поле, создаваемое переменным магнитным полем, является вихревым, т. е. его силовые линии являются замкнутыми.

Руководствуясь принципом симметрии, Максвелл высказал гипотезу, что переменное электрическое поле порождает магнитное поле.

Опираясь на тот факт, что электрическое поле порождается переменным магнитным полем, а магнитное поле — переменным электрическим, Максвелл пришел к выводу:

Электрического и магнитного поля не существует отдельно, независимо друг от друга, существует единое электромагнитное поле.

На частицу, имеющую заряд q и движущуюся в электромагнитном поле, действует обобщающая сила Лоренца $\vec{F}_{\text{ус}}$, которую можно определить по формуле:

$$\vec{F}_{\text{ус}} = \vec{F}_{\text{эл}} + \vec{F}_{\text{л}},$$

где $\vec{F}_{\text{эл}}$ — электрическая составляющая обобщающей силы Лоренца; $\vec{F}_{\text{л}}$ — магнитная составляющая обобщающей силы Лоренца.

Согласно гипотезе Максвелла переменных электрического и магнитного поля не могут существовать одно без другого.

Электромагнитное поле обладает свойством непрерывности: если в некоторых точках А и В пространства существует электромагнитное поле, то оно существует и в пространстве между этими точками. Электромагнитное поле распространяется в пространстве с конечной скоростью, которая в вакууме равна скорости распространения света — $3 \cdot 10^8$ м/с.

7. Относительность электрических и магнитных полей

Максвелл переложил на языке уравнений все известные факты и положения, касающиеся электрических и магнитных явлений. Эту систему уравнений для электрических и магнитных полей называют сегодня «уравнениями Максвелла». Опишем эти уравнения вербально, сведя их в таблицу:

| Поле | Что его создает |
|------|-----------------|
|------|-----------------|

| | | |
|--------------------|--|-------------------------------|
| Электрическое поле | Электрические заряды в состоянии покоя и движущиеся | Переменное магнитное поле |
| Магнитное поле | Движущиеся электрические заряды (электрические токи) | Переменное электрическое поле |

Из этой таблицы можно сделать следующие выводы:

1. Электрическое и магнитное поля преобразуются друг в друга при переходе из одной инерциальной системы в другую. Можно сказать, что разделение поля на электрическое и магнитное довольно относительное и зависит от системы отсчета.

2. Выбор системы отсчета — субъективный акт, от которого зависит само существование поля.

Электромагнитное поле — вот та объективная реальность, которая существует независимо от того, ставим мы опыт и в какой системе отсчета или вообще его не проводим. Поэтому электромагнитное поле нельзя рассматривать как «совокупность» электрических и магнитных полей. Электрическое и магнитное поля — проявление единого целого (электромагнитного поля) при различных условиях.

Закрепление изученного материала по теме «Электромагнитная индукция»

1. Магнитный поток через катушку, состоящую из 75 витков, равен $4,8 \cdot 10^{-3}$ Вб. Рассчитайте время, за которое должен исчезнуть этот поток, чтобы в катушке возникла ЭДС индукции, равная 0,74 В?
2. В катушке, индуктивность которой равна 0,4 Гн, возникла ЭДС, равная 20 В. Рассчитайте изменение силы тока и энергии магнитного поля катушки, если это произошло за 0,2 с.
3. Проволочное кольцо радиусом 5 см расположено в однородном магнитном поле, индукция которого равна 1 Тл, так, что вектор индукции перпендикулярен плоскости кольца. Определите ЭДС индукции, возникающую в кольце, если его повернуть на угол 90° за время, равное 0,1 с.
4. Какой заряд пройдет через поперечное сечение витка, сопротивление которого равно 0,03 Ом, при уменьшении магнитного потока внутри витка на 12 мВб?
5. Обмотка трансформатора со стальным сердечником имеет индуктивность, равную 0,6 Гн. При какой силе тока энергия магнитного поля трансформатора будет равной 90 Дж?
6. В катушке индуктивностью 0,005 Гн проходит ток силой 20 А. Определите ЭДС самоиндукции, которая возникает в катушке при исчезновении в ней тока за 0,009 с.
7. В результате изменения силы тока с 4 до 20 А поток магнитной индукции через площадь поперечного сечения катушки, имеющей 1000 витков, изменился на 0,002 Вб. Найдите индуктивность катушки.
8. Проводник длиной 2 м и сопротивлением 5 Ом находится в однородном магнитном поле, у которого индукция равна 0,5 Тл. Проводник подсоединен к источнику тока с ЭДС, равной 3 В, и внутренним сопротивлением 1 Ом. Какова сила тока в проводнике, если он движется со скоростью 10 м/с?

Лекция 19. Электромагнитные колебания и волны

1. Виды колебаний и условия их возникновения

Колебания — один из самых распространенных видов движения в природе и технике. Колеблются деревья в лесу, пшеница в поле, струны музыкальных инструментов, мембрана телефона. Колеблются плоскости и фюзеляж самолета, кузов автомобиля, поршни двигателя. Колебательные движения происходят и в жизни нашей планеты (землетрясения, приливы и отливы), и в астрономических явлениях, и в живой природе: биение сердца, подвижность голосовых связок и т. др.

Колебаниями называются физические процессы, которые точно или приблизительно повторяются через одинаковые интервалы времени.

В зависимости от физической природы различают механические и электромагнитные колебания.

Колебания, происходящие только под действием периодически изменяющейся по величине и направлению внешней силы, **называют вынужденными**.

Свободные колебания — это колебания, происходящие в механической системе под действием внутренних сил системы после кратковременного воздействия какой-то внешней силы.

Чтобы в колебательной системе происходили свободные колебания, необходимо выполнение двух условий:

- 1) система должна приближаться к положению устойчивого равновесия;
- 2) силы трения или силы сопротивления должны быть достаточно малыми.

2. Гармонические колебания

Когда тело совершает механические колебания, изменяются его координата, скорость и ускорение. В случае электромагнитных колебаний изменяются сила тока в цепи, заряд и напряжение на обкладках конденсатора, ЭДС. В рамках школьного курса физики мы будем рассматривать только гармонические колебания.

В Колебания, при которых физическая величина совершает колебания, изменяется со временем по закону косинуса (или синуса), называют гармоническими.

Уравнение гармонических колебаний имеет вид:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \text{ або } x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где x — значение переменной величины в данный момент времени; A — амплитуда колебаний; ω — циклическая частота; φ_0 — начальная фаза колебаний.

График гармонических колебаний имеет вид кривой, что в математике называется синусоидой или косинусоидой.

3. Физические величины, характеризующие колебательное движение

Во время колебаний смещение тела от положения равновесия периодически меняется.

Амплитуда колебаний — это физическая величина, характеризующая колебательное движение и равна максимальному значению переменной величины.

Единица амплитуды колебаний определяется единицей переменной величины.

Если груз на нитке за время t совершит N полных колебаний, то время одного полного колебания: $T = t/N$, то есть период колебаний — промежуток времени, в течение которого происходит одно полное колебание. Или иначе:

Период колебаний T — это физическая величина, характеризующая колебания и равен минимальному интервалу времени, через который значения изменяемой величины повторяется.

Единица периода колебаний в СИ — секунда (с).

Частота колебаний — это физическая величина, характеризующая колебания и равна числу полных колебаний в единицу времени: $\nu = N/t$.

Единица частоты колебаний в СИ — герц (Гц).

1 Гц равен частоте колебаний, при которых тело за 1 с совершает одно полное колебание.

Период и частота — взаимнообратные величины.

Циклическая частота — это физическая величина, характеризующая колебания и равна числу полных колебаний, совершаемых за 2π секунд:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}.$$

Единица циклической частоты колебаний в СИ — радиан в секунду (рад/с или 1/с).

Фаза колебаний — это физическая величина, характеризующая состояние колебательной системы в этот момент времени: $\varphi = \omega t + \varphi_0$.

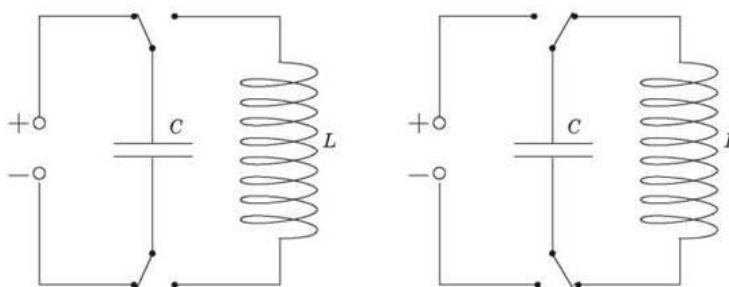
Фаза колебаний определяется их периодом (поскольку $\omega = 2\pi/T$), моментом времени t , в который фиксируется значение переменной величины, и начальной фазой колебаний φ_0 — фаза колебаний в момент начала отсчета времени.

4. Свободные электромагнитные колебания в колебательном контуре

Проще всего круг, в котором могут происходить свободные электрические колебания, состоит из конденсатора и катушки, присоединенной к его обкладкам. Активное сопротивление проводников, из которых изготовлен колебательный контур, должен быть малым.

Чтобы в колебательном контуре возникли свободные колебания, системе необходимо передать энергию, например, зарядить конденсатор. На обкладках конденсатора накапливается определенный заряд q_{\max} , а между обкладками возникает электрическое поле, энергия которого равна:

$$W_{\text{э.п. макс}} = \frac{CU_{\text{макс}}^2}{2} = \frac{q_{\text{макс}}^2}{2C}.$$



Если после зарядки конденсатор замкнуть на катушку индуктивности, то под действием электрического поля конденсатора свободные заряженные частицы в контуре начнут двигаться направленно. В контуре возникнет электрический ток i , а конденсатор начнет разряжаться. Вследствие явления самоиндукции сила тока в катушке будет увеличиваться постепенно и достигнет максимума, когда конденсатор полностью разрядится.

Однако из-за явления самоиндукции после разрядки конденсатора ток не прекратится мгновенно: он будет продолжать течь еще некоторое время в том самом направлении, снова заряжая пластины конденсатора. После этого весь процесс повторится в «противоположном» направлении и колебательный контур вернется в исходное состояние, готов к следующему колебанию.

Таким образом, в течение первой четверти периода энергия электрического поля конденсатора превращается в энергию магнитного поля катушки. Полная энергия колебательного контура равна:

$$W = W_{\text{э.п.}} + W_{\text{м.п.}} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2}.$$

В момент, когда конденсатор полностью разрядится, энергия электрического поля равна нулю, сила тока достигнет максимального значения, а полная энергия колебательного контура равна:

$$W = W_{\text{м. макс}} = \frac{LI_{\text{макс}}^2}{2}.$$

В течение второй четверти периода энергия магнитного поля катушки превращается в энергию электрического поля конденсатора. Конденсатор будет перезаряжаться, пока сила тока не достигнет нуля. Энергия магнитного поля катушки в этот момент также будет равна нулю, а энергия электрического поля конденсатора достигнет максимального значения.

Следующую половину периода характер изменения электрического заряда на обкладках конденсатора и характер изменения силы тока в контуре будут такими же, только в обратном направлении. Когда заряд на обкладках конденсатора достигнет максимального значения, завершится одно полное колебание.

Электромагнитными колебаниями называют периодические (или почти периодические) изменения заряда, силы тока и напряжения.

Колебательный контур можно считать замкнутой системой, поэтому колебания являются свободными.

5. Идеальный колебательный контур

Если бы не было потерь энергии, амплитуда колебаний в колебательном контуре оставалась бы неизменной, и колебания были бы незатухающими.

Физическая модель, что представляет собой колебательный контур, в котором отсутствуют потери энергии, называется **идеальным колебательным контуром**, а колебания — собственными колебаниями.

Закон сохранения энергии для идеального колебательного контура имеет следующий вид:

$$W_{\text{эл. макс}} = W_{\text{эл}} + W_{\text{м}} = W_{\text{м. макс}} \quad \text{або} \quad \frac{q_{\text{макс}}^2}{2C} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \frac{LI_{\text{макс}}^2}{2}.$$

6. Аналогия между свободными электромагнитными и механическими колебаниями

Если сравнить свободные электромагнитные колебания в колебательном контуре и механические колебания груза на пружине, то можно заметить, что колебания различной природы имеют сходные закономерности. Нужно обратить внимание на то, что колебания схожи с закономерностями, а не по природе. Например, если одной из причин механических колебаний является инертность тела, которая характеризуется его массой, то одной из причин электромагнитных колебаний является вихревое электрическое поле, которое характеризуется ЭДС самоиндукции. Именно благодаря вихревому полю, а не инертности электроны продолжают движение в прежнем направлении.

Воспользуемся аналогией с колебаниями пружинного маятника. Исходное состояние системы соответствует моменту, когда груз на пружине отвели от положения равновесия и отпустили без толчка.

| Механические явления | Электромагнитные явления |
|---|---|
| Груз начинает двигаться и приближается к положению равновесия. Скорость груза увеличивается постепенно через его инертность | В колебательном контуре возникает ток разрядки конденсатора. Сила тока в контуре увеличивается постепенно через индуктивность катушки |
| Груз не может остановиться в положении | Конденсатор не может оставаться |

| | |
|--|--|
| равновесия: он приобрел определенной скорости и не может потерять эту скорость мгновенно через инертность | незаряженным, потому что сила тока не может мгновенно уменьшится из-за явления самоиндукции |
| Начиная с этого момента скорость будет уменьшаться, а груз будет отклоняться от положения равновесия в противоположную сторону | Начиная с этого момента сила тока будет уменьшаться, а пластины конденсатора приобретут зарядов противоположного знака |

7. Как образуется электромагнитная волна

Электрический заряд, движущийся в пустоте равномерно, не излучает энергии. Это вытекает из принципа относительности, согласно которому все инерциальные системы отсчета равноправны. В системе, движущейся с зарядом, он неподвижный, а неподвижные заряды не излучают.

Иная картина возникает в том случае, когда заряд под действием внешних сил движется с ускорением. Поле имеет энергию, а значит и массу, образно говоря, отрывается от заряда и излучается в пространство со скоростью света. Излучение происходит, пока на заряд действует внешняя сила, что передает ему ускорение.

Только заряды, которые движутся с ускорением, могут передавать энергию посредством создаваемого ими электромагнитного поля.

Если пропускать через проводник переменный ток, то у проводника периодически будет меняться магнитное поле. Переменное магнитное поле создает переменное электрическое поле, что, в свою очередь, создает переменное магнитное поле, и т. др. То есть мы наблюдаем распространение в пространстве колебаний электромагнитного поля.

Как известно, распространение в пространстве колебаний вещества или поля называют волной.

Электромагнитная волна — это процесс распространения в пространстве с течением времени свободного электромагнитного поля.

Следовательно, источником электромагнитной волны может быть или заряженное тело, ускоренно движется, или проводник, через который течет переменный ток.

8. Открытый колебательный контур

Любой круг переменного тока излучает энергию. Однако обычный колебательный контур излучает крайне слабо. Это происходит по двум причинам:

- 1) недостаточно высокая частота (интенсивность излучения пропорциональна частоте в четвертой степени);
- 2) волны, излучаемые различными участками контура, находятся в противофазе и гасят друг друга.

Ø Контур не излучает в пространство электрическую энергию, называют закрытым.

Чтобы сделать излучение более интенсивным, нужно существенно повысить частоту. Если судить по формуле:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

то для этого нужно уменьшить L и C. Отдаление катушки индуктивности и раздвижения пластин конденсатора приводит к резкому увеличению частоты. Чтобы колебательный контур хорошо излучал электромагнитные волны, необходимо увеличить объем пространства, в котором образуется электромагнитное поле. Для этого контур необходимо развернуть (сделать

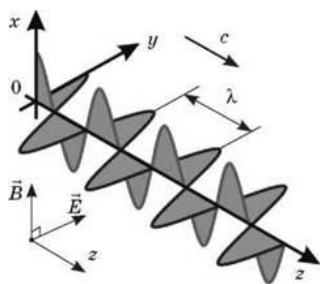
открытым), чего проще всего достичь, раздвинув пластины конденсатора на максимально возможное расстояние.

Именно прямой проводник (вibrator) представляет простейший пример открытого колебательного контура.

9. Физические величины, характеризующие электромагнитную волну

Согласно теории Максвелла электромагнитная волна переносит энергию. Энергия электромагнитного поля волны в данный момент времени меняется периодически в пространстве с изменением векторов \vec{E} и \vec{B} . Электрическое и магнитное поля в электромагнитной волне перпендикулярны друг к другу, причем каждое из них перпендикулярно к направлению распространения волны.

На рисунке схематически изображена зависимость от координат вектора напряженности электрического поля и вектора индукции магнитного поля в электромагнитной волне в некоторый момент времени. В каждой точке пространства, сквозь который движется электромагнитная волна, модуль вектора напряженности электрического поля пропорционален вектору индукции магнитного поля, а направлены эти векторы всегда под прямым углом друг к другу. Гребне волны перемещаются в пространстве со скоростью света c .



Таким образом, электромагнитная волна является поперечной волной. Электромагнитная волна, как и механическая, характеризуется периодом и частотой колебаний, длиной волны и скоростью распространения.

Скорость распространения электромагнитной волны — это расстояние, на которое распространяется волна за единицу времени: $v = s/t$.

Скорость распространения электромагнитной волны в вакууме является постоянной и равна скорости света в вакууме: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Длина волны λ — это расстояние, на которое распространяется электромагнитная волна за время одного периода.

Для электромагнитной волны в вакууме период T , частота ν и длина волны λ связаны соотношениями $\lambda = cT = c/\nu$. В течение одного периода волна проходит расстояние, равное длине волны.

10. опыты Герца

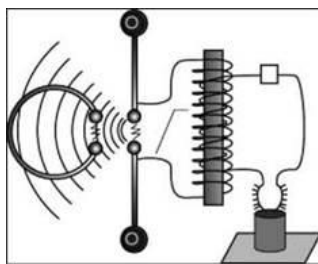
Многие ученые подвергали сомнению правильность теории электромагнитного поля Максвелла. 1886 г. Генрих Герц решил поставить опыт с целью опровергнуть теорию Максвелла. Опыт заключался в том, что в узком промежутке незамкнутого контура возбуждалась искра с помощью высокого напряжения.

Вибратор Герца излучал электромагнитные волны преимущественно в направлении, перпендикулярном к проводнику. Вектор \vec{E} этой волны колебался параллельно vibratorу, а

вектор \vec{B} — перпендикулярно к вибратору. В направлении оси вибратора излучение не происходит.

Необходимо было найти способ обнаружения и исследования электромагнитных волн. Герц использовал для этого второй (приемный) вибратор.

Этот вибратор не присоединяли к какому-нибудь источнику высокого напряжения. Поэтому колебания в нем могли возникнуть только под действием электромагнитной волны. О возникновении колебаний могли свидетельствовать крошечные искры в искровом промежутке приемного вибратора. Чтобы увеличить амплитуду колебаний в этом вибраторе, было использовано явление резонанса: собственная частота колебаний в приемном вибраторе совпала с собственной частотой колебаний в излучателе. Схема опыта Герца показана на рисунке.



Герц не только получил электромагнитные волны, но и изучил их свойства. опыты Герца показали, что электромагнитные волны отражаются от проводника, преломляются на границе с диэлектриком, могут интерферировать, огибать препятствия, их можно поляризовать. При этом отражение, преломление, интерференция и дифракция электромагнитных волн происходят по тем же законам, что и для света. Таким образом, Герц экспериментально подтвердил вывод Максвелла об электромагнитной природе света.

Герц писал: «...описанные опыты доказывают идентичность света, тепловых лучей и электродинамического волнового движения».

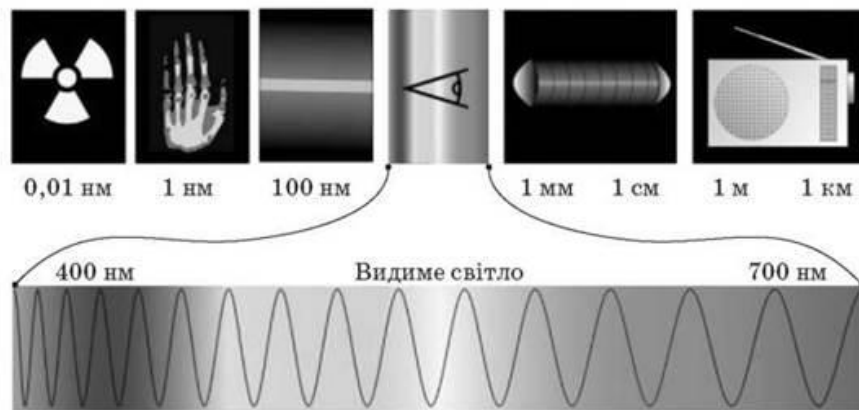
11. Что такое шкала электромагнитных волн

Электромагнитные излучения существенно отличаются по своим свойствам, хотя и имеют единую физическую природу. Все виды электромагнитного излучения в той или иной степени проявляют волновые свойства (интерференцию, дифракцию, поляризацию) и квантовые (корпускулярные) свойства.

Шкала электромагнитных волн — непрерывная последовательность частот и длин волн электромагнитных излучений, которые представляют собой переменное электромагнитное поле, которое распространяется в пространстве.

По способу излучения волн различают: низкочастотное излучение и радиоволны; инфракрасное излучение; видимый свет и ультрафиолетовое излучение; рентгеновское излучение; гамма-излучение.

Все эти виды излучений представляют собой электромагнитные волны, имеющие одинаковую скорость распространения, равную скорости света, а порождающие их заряженные частицы движутся с ускорением.



Лекция 20. Переменный ток. Генератор. Трансформатор

1. Переменный электрический ток

Переменный ток — электрический ток, который периодически изменяется по модулю и направлению.

Вынужденные электромагнитные колебания — незатухающие колебания заряда, напряжения, силы тока и других физических величин, обусловленных ЭДС, периодически изменяется:

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

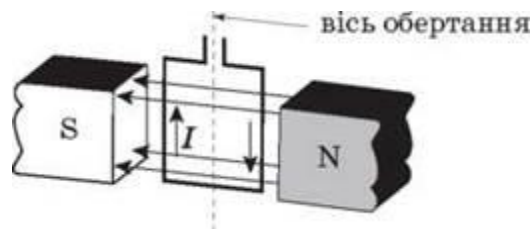
Ярким примером вынужденных колебаний является переменный ток:

$$i = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0).$$

2. Как получать переменную ЭДС

Источник электрической энергии, что создает периодически изменяющуюся ЭДС, называют генератором переменного тока.

Генератором переменного тока может служить проволочная рамка, вращающаяся в однородном магнитном поле индукцией \vec{B} с некоторой постоянной угловой скоростью ω .



Магнитный поток через рамку $\Phi = BS \cos \alpha$. Зависимость угла α от времени имеет вид $\alpha = \omega t$. Тогда $\Phi = BS \cos \omega t$.

Изменение магнитного потока приводит к возникновению в рамке ЭДС индукции \mathcal{E}_i .

Согласно закону электромагнитной индукции, $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Скорость изменения магнитного потока $\Delta\Phi/\Delta t$ с точки зрения математики является производной функции $\Phi(t)$, поэтому

$$\mathcal{E}_i = -\Phi'(t) = \omega BS \sin \omega t.$$

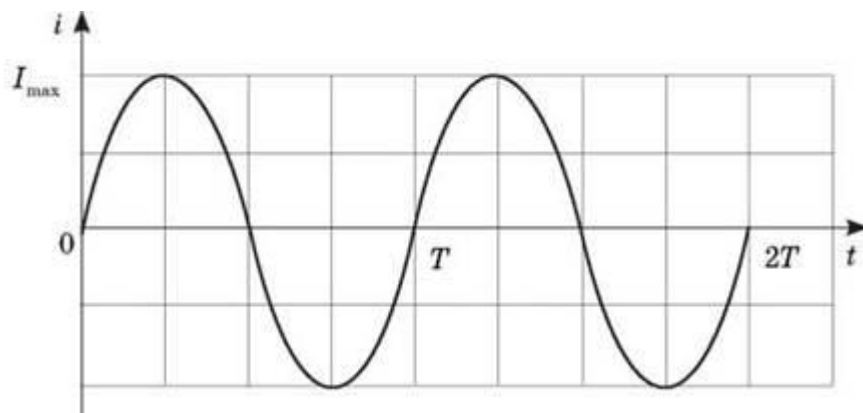
Таким образом, рассматриваемая рамка является источником ЭДС, что испытывает гармонических колебаний амплитудой $\mathcal{E}_{\max} = \omega BS$. Если рамка содержит N витков проводника, амплитуда ЭДС увеличивается в N раз:

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

Чтобы воспользоваться полученной ЭДС, необходимо присоединить подвижные концы рамки до неподвижных контактов внешнего электрического круга. Можно сделать так, чтобы металлическое кольцо от каждого из концов рамки скользило по своему неподвижному контакту (щетке). Тогда щетки можно рассматривать как полюса источника тока. Если присоединить к этим полюсам резистор, сопротивление R которого во много раз превышает сопротивление рамки и контактов, напряжение на нем будет равно ЭДС в рамке $u(t) = \omega NBS \sin \omega t$, а сила тока в резисторе будет:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = \frac{\omega NBS}{R} \sin \omega t.$$

На рисунке показан график зависимости силы тока от времени ($I_{\max} = \omega NBS$).



Период переменного тока: $T = \frac{2\pi}{\omega}$, частота: $\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$.

3. Генератор переменного тока

Простейший генератор переменного тока представляет собой металлический сердечник, в пазы которого вложена обмотка. Концы обмотки соединены с кольцами. Сердечник с обмоткой вращается в магнитном поле неподвижного постоянного магнита или электромагнита. Вращающуюся часть генератора называют ротором, неподвижную — статором.

Скорость вращения ротора можно уменьшить, если использовать электромагнит, который имеет несколько пар магнитных полюсов. Частота ν переменного тока связана с частотой вращения ротора генератора ν_{\max} соотношением: $\nu = p\nu_{\max}$, где p — число пар магнитных полюсов генератора.

4. Условия возникновения резонанса в электрической цепи

В идеальном колебательном контуре могут существовать свободные электромагнитные колебания, собственная частота которых определяется по формуле Томсона:

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Соединим колебательную систему с источником переменного напряжения — генератором. ЭДС генератора будет создавать в контуре переменный электрический ток, частота которого будет совпадать с частотой изменения ЭДС, то в контуре возникнут вынужденные электромагнитные колебания.

Если изменять емкость конденсатора или индуктивность катушки, изменяя тем самым собственную частоту колебаний контура, то можно заметить, что:

1) во время приближения собственной частоты контура к частоте изменения внешней ЭДС амплитуда вынужденных колебаний силы тока будет увеличиваться;

2) чем больше активное сопротивление контура, тем слабее выражен всплеск амплитуды колебаний силы тока.

Характер зависимости силы тока от частоты при постоянном значении напряжения U можно предсказать на основе анализа закона Ома для цепи переменного тока:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

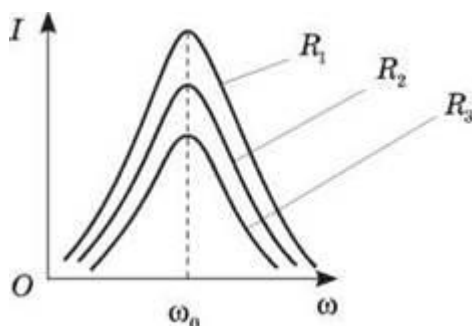
Амплитуда силы тока будет максимальной для минимального полного сопротивления. Сопротивление R не зависит от частоты, а минимальное значение квадрата разности ωL и $1/\omega C$ равно нулю. Поэтому максимальная амплитуда силы тока возникает, если:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Это равенство справедливо, если частота вынужденных колебаний совпадает с частотой собственных колебаний в контуре:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0 \quad \text{або} \quad \nu = \nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Резонанс напряжений заключается в резком увеличении амплитудного значения силы тока I_{\max} при условии, что частота ν_0 переменного напряжения совпадает с частотой ν_0 собственных колебаний в контуре из катушки и конденсатора.



На рисунке показана зависимость $I_{\max}(\nu)$ при разных значениях активного сопротивления цепи. Резонанс является «острым» (то есть график функции $I_{\max}(\nu)$ имеет узкий высокий

максимум) при малых значениях активного сопротивления. А когда активное сопротивление очень велико, то резонанс вообще не наблюдают.

5. Использование резонанса

Явление электрического резонанса широко используется в радиотехнике: в схемах настройки радиоприемников, усилителей, генераторов высокочастотных колебаний. Например, радиоволны от различных передающих станций возбуждают в антенне радиоприемника переменные токи различных частот. Но только в случае резонансных колебаний силы тока в контуре будут значительными. Настройка контура на нужную частоту обычно осуществляется путем изменения емкости конденсатора.

На явлении резонанса основана работа многих измерительных приборов (например, резонансный волномер).

В некоторых случаях резонанс в электрической цепи может нанести значительный ущерб. Если круг не рассчитан на работу в условиях резонанса, то возникновение резонанса приведет к аварии. Чрезмерно высокие токи могут перегреть провода. Высокие напряжения приведут к пробое изоляции.

6. Почему напряжение необходимо изменять

Активное сопротивление провода определяется материалом, из которого он изготовлен, и

его размерами: $R = \rho \frac{l}{S}$. Для уменьшения сопротивления проводов надо или уменьшать удельное сопротивление материала, или увеличивать площадь поперечного сечения провода.

Увеличение площади поперечного сечения приводит к значительному увеличению массы проводов. Можно уменьшать удельное сопротивление, но это полностью не решает проблемы, поскольку передачи значительной мощности $P = UI$ при относительно незначительном напряжении требует достаточно высокой силы тока.

Если ту же мощность передавать значительного напряжения (соответственно, из-за малой силы тока), то потери энергии значительно уменьшаются. Поэтому прежде чем передавать энергию на большие расстояния, необходимо повышать напряжение. И наоборот: после того как энергия дошла до потребителя, напряжение необходимо снижать.

Такие изменения напряжения обеспечивают с помощью трансформаторов.

Трансформатор — устройство, применяемое для повышения или понижения напряжения переменного тока.

Далее рассмотрим устройство трансформатора.

7. Принцип действия трансформатора

Переменный ток в первичной обмотке создает переменное магнитное поле. Благодаря стальному сердечнику вторичную обмотку, намотанную на тот же сердечник, пронизывает практически такое же переменное магнитное поле, что и первичную.

Поскольку все витки пронизаны тем же переменным магнитным потоком, вследствие явления электромагнитной индукции в каждом витке генерируется одно и то же напряжение. Поэтому отношение напряжений U_1 и U_2 на первичной и вторичной обмотках равно отношению числа витков в них:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Изменение напряжения трансформатором характеризует коэффициент трансформации.

Коэффициент трансформации — величина, равная отношению напряжений в первичной и вторичной обмотках трансформатора:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Повышающий трансформатор — трансформатор, увеличивающий напряжение ($U_2 > U_1$). У повышающего трансформатора число витков N_2 во вторичной обмотке должно быть больше числа витков N_1 в первичной обмотке, т. е. $k < 1$.

Понижающий трансформатор — трансформатор, уменьшающий напряжение ($U_2 < U_1$). У понижающего трансформатора число витков во вторичной обмотке должно быть меньше числа витков в первичной обмотке, т. е. $k > 1$.

8. Холостой ход трансформатора

Работа ненагруженного трансформатора называется холостым ходом.

Первичная обмотка трансформатора подключена к источнику переменного тока напряжением \dot{u} . При этом в обмотке возникает ЭДС самоиндукции e_1 . Падение напряжения на первичной обмотке равно: $i_1 r_1 = u_1 + e_1$, где r_1 — сопротивление обмотки, которое мы будем считать очень маленьким. Поэтому в любой момент времени: $u_1 \approx -e_1$, следовательно, для действующих значений можно записать:

$$U_1 \approx \xi_1.$$

Для второй обмотки: $u_2 + e_2 = 0$, $u_2 = -e_2$, $U_2 = \xi_2$.

Таким образом, в режиме холостого хода выполняется равенство:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\xi_1}{\xi_2} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

9. Работа трансформатора под нагрузкой

Если к вторичной обмотке трансформатора присоединить нагрузку, то в ней возникнет электрический ток, что вызывает уменьшение магнитного потока в сердечнике и, как следствие, уменьшению ЭДС самоиндукции в первичной обмотке. В результате сила тока в первичной обмотке увеличится, и магнитный поток возрастет до первоначального значения. Чем больше сила тока во вторичной обмотке и мощность, которую он отдает потребителю, тем больше сила тока в первичной обмотке и мощность, потребляемая от источника. Поскольку потери энергии в трансформаторе малы, то $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$, откуда $U_1 / U_2 = I_2 / I_1$.

Это означает, что в повышающем трансформаторе $U_1 < U_2$ и $I_1 > I_2$, а в понижающем трансформаторе $U_1 > U_2$ и $I_2 > I_1$.

В трансформаторе, как и в любом техническом устройстве, существуют потери энергии.

Отношение мощности, которую трансформатор отдает потребителю электрической энергии, к мощности, которую трансформатор потребляет из электрической сети, называют КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1}.$$

10. Затухающие колебания

Реальный колебательный контур оказывает некоторое сопротивление электрическому току. Поэтому часть переданной контура энергии непрерывно превращается во внутреннюю энергию проводов, рассеивается в окружающем пространстве. Чем больше сопротивление контура, тем быстрее затухают колебания. Если сопротивление контура очень велико, колебания вообще могут и не возникнуть — конденсатор разрядится, но перезарядки не произойдет.

Чтобы колебания не затухали, необходимо пополнять энергию контура, заряжая конденсатор от источника постоянного тока. Но если источник будет все время подключен к конденсатору, то конденсатор только будет обмениваться энергией с источником. Чтобы этого не происходило, контур может быть подключен к источнику только в те моменты, когда обкладка конденсатора, присоединенная к положительному полюсу источника тока, заряжена положительно. Во время колебаний знак заряда на обкладках периодически меняется, следовательно, ключ должен замыкать и размыкать круг с частотой, равной частоте электромагнитных колебаний контура, то есть несколько миллионов в секунду. Замыкать с такой частотой механический ключ нельзя, поэтому в радиотехнике используют транзистор.

Закрепление изученного материала по теме «Переменный ток»

1. Виток площадью 4см^2 расположен перпендикулярно к линиям индукции магнитного однородного поля. Чему равна индуцированная в витке ЭДС, если за время $0,05\text{с}$ магнитная индукция равномерно убывает с $0,5$ до $0,1\text{Тл}$?
2. По катушке течёт ток 5А . При какой индуктивности катушки энергия её магнитного поля будет равна $6,0\text{Дж}$?
3. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $0,0000025\text{Гн}$ и конденсатора ёмкостью $0,005\text{мкФ}$. Определить период электрических колебаний в контуре.
4. Сила тока в цепи изменяется по закону $i=0,85\sin(314t+0,651)$. Определить действующее значение силы тока, его начальную фазу и частоту. Чему равна сила тока в цепи в момент времени $0,08\text{с}$?
5. Цепь переменного тока состоит из последовательно соединённых, конденсатора ёмкостью 100мкФ , катушки индуктивностью $0,2\text{Гн}$, резистора сопротивлением 20Ом , найти действующее значение силы тока и разность фаз между напряжением и током. Действующее напряжение 75В , частота 50Гц .
6. Используя данные задачи №4, постройте график зависимости силы тока от времени.
7. Трансформатор понижает напряжение от значения 22кВ до значения 110В . Во вторичной его обмотке 110 витков. Сколько витков содержится в его первичной обмотке?

Лекция 21. Волновые свойства света. Законы отражения и преломления

1. Идеи древних философов

Вопрос «Что такое свет?» чрезвычайно интересовало еще древних философов. Большинство из них придерживались той точки зрения, что свет создается внутри самого человека и излучается из его глаза. Одни философы рассматривали свет как определенные материальные лучи, соединяющие светящееся тело и человеческий глаз. Они считали, что открытый глаз испускает «флюиды» и ощупывает ими наблюдаемые предметы, будто тончайшими щупальцами. Другие считали, что с каждого предмета срываются оболочки, подобные самим предметам. Эти «образы» предметов, попадая в глаз, давали ощущение формы и цвета предметов.

2. Корпускулярная теория света Ньютона

Первой научной теорией, пытавшейся объяснить физическую природу света, была теория световых частиц, разработанная Ньютоном и изложенная в его книге «Оптика». Согласно этой теории свет представляет собой поток частиц, выпущенных светящимся телом во всех направлениях (перенос вещества). На основании корпускулярных представлений Ньютон объяснил большинство известных тогда оптических явлений: прямолинейное распространение света в однородной среде, отражения и преломления света.

3. Волновая теория света Гюйгенса

Согласно представлениям Гюйгенса свет — это волны, которые распространяются в особом, гипотетической среде — эфире, заполняющем все пространство и проникающем внутрь всех тел. Гюйгенс не рассматривал настоящего волнового процесса, его рассуждения касались лишь распространения волнового фронта. Он строго математически описал явление отражения и преломления волн, причем из его рассуждений следовало, что скорость света в более густом среде должна быть меньше, чем в воздухе.

1801 г. Юнг на основании волновых представлений очень просто и наглядно разъяснил интерференцию света.

1818. Френель независимо от Юнга подробно разработал теорию дифракции и интерференции света, показав при этом, что эти явления являются прямым следствием волновой природы света.

Окончательного удара по корпускулярной теории был нанесен опытами Фуко, измерил скорость света в воде, значение которой оказалось таким, как это следовало из волновой теории.

Волновая теория с единой точки зрения объяснила все известные тогда явления и предсказала ряд новых.

В течение более ста лет корпускулярная и волновая гипотезы о природе света существовали параллельно. Ни одна из них не могла одержать решающей победы. Лишь авторитет Ньютона побудило большинство ученых отдавать предпочтение корпускулярной теории.

4. Электромагнитная теория света

Во второй половине XIX века Максвелл доказал, что свет является частным случаем электромагнитных волн. Работами Максвелла были заложены основы электромагнитной теории света. После того как Герц экспериментально обнаружил электромагнитные волны, никаких сомнений относительно того, что при распространении свет ведет себя как волна, не осталось. 1899 г. П. М. Лебедев дал новое доказательство тождества световых и электромагнитных волн. Он обнаружил опытным путем, что свет оказывает давление на тела, на которые оно падает, и измерил это давление. Но по теории Максвелла, электромагнитные волны также оказывают подобное давление.

Таким образом, во второй половине XIX века была разработана электромагнитная теория света.

5. Квантовая теория света

В начале XX века представления о природе света начали коренным образом меняться. Неожиданно выяснилось, что отвергнутая корпускулярная теория все же имеет право на существование. 1900 г. немецкий физик Макс Планк предположил, что атомы тел поглощают и излучают энергию конечными порциями — квантами. А в 1905 г. Эйнштейн высказал мысль, что свет распространяется в пространстве в виде дискретных объектов — квантов света.

Таким образом, были обнаружены прерывистые, или, как говорят, квантовые свойства света.

6. Корпускулярно-волновой дуализм

Возникла чрезвычайная ситуация: явления интерференции и дифракции по-прежнему можно было объяснить, считая свет волной, а явления излучения и поглощения — считая свет потоком частиц.

В результате многочисленных обсуждений, поисков и исследований возникла современная теория света. Эта теория является синтезом корпускулярной и волновой теорий. В ее основу положена мысль, что свет одновременно имеет волновые и корпускулярные свойства.

7. Основные понятия геометрической оптики

Оптика представляет собой раздел физики, в котором изучают явления и закономерности, связанные с возникновением, распространением и взаимодействием с веществом электромагнитных волн видимого диапазона.

Геометрическая оптика — это раздел оптики, в котором изучают законы распространения света в прозрачных средах и принципы построения изображений в оптических системах без учета его волновых свойств света.

Основными понятиями геометрической оптики являются пучок и луч.

Луч — это линия, указывающая направление переноса световой энергии.

В быту мы часто называем световым лучом тонкий пучок света. Не существует бесконечно узких световых пучков; пучок света всегда имеет конечную ширину. Луч — это как бы ось пучка, а не сам пучок.

На практике все источники света имеют размеры. Светящаяся же точка является самым простым источником света, который может представить себе человек. Лучи света, выходящие из нее, нигде не пересекаются и представляют собой вполне упорядоченную световую картину.

Источник света, размерами которого в данных условиях можно пренебречь, называют **точечным источником света**.

Точечный источник света является физической моделью источника света, расстояние до которого во много раз больше размеров источника.

8. Закон прямолинейного распространения света

В основе геометрической оптики лежит ряд законов, установленных экспериментально. Один из них — закон прямолинейного распространения света: свет в пустоте или однородной среде распространяется прямолинейно.

Прямолинейность распространения света подтверждается образованием тени. Если взять точечный источник света, экран и между ними поместить непрозрачный предмет, то на экране появится темное изображение его очертаний — тень.

Тень — область пространства, в которую не попадает световая энергия от источника света.

Можно дать еще одно определение: тень — область пространства, из которой нельзя увидеть источник света.

Если же мы возьмем протяженный источник света, то на экране вокруг тени образуется еще и полутень, то есть область пространства, из которой источник света можно увидеть лишь частично. Или иначе:

полутень — область пространства, в которую световая энергия от источника света попадает частично.

Образованием тени и полутени объясняют солнечные и лунные затмения. В случае солнечного затмения полная тень от Луны падает на Землю. С этого места Земли Солнца не видно. Когда Луна, вращаясь вокруг Земли, попадает в ее тень, то наблюдают лунное затмение.

В тех местах Земли, куда упала тень, будет наблюдаться полное затмение Солнца. В местах полутени только часть Солнца будет закрыта Луной, то есть произойдет частичное затмение Солнца.

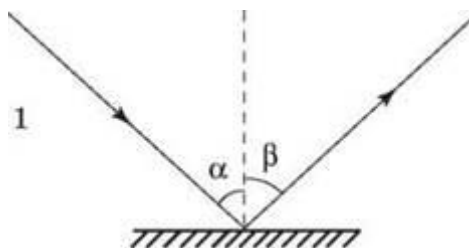
9. Отражения света

Предметы, которые отражают почти весь свет, падающий на них, кажутся нам обычно белыми, предметы же, которые поглощают почти весь свет, падающий на них, кажутся нам черными. Тела, которые отражают свет «лучше» других, мы вообще не видим! Это — зеркала.

Свет, отраженный от шероховатой поверхности, вообще не образует какого пучка и не имеет определенного направления: оно рассеивается и распространяется во всех направлениях. Такое отражение называется рассеянным (диффузионным).

Именно так отражается свет от большинства тел, благодаря чему мы можем видеть тела вокруг нас.

Если же поверхность гладкая, то отражение будет зеркальным, то есть отраженный свет образует узкий пучок. Угол α , образованный падающим лучом и перпендикуляром к поверхности, называется углом падения; угол β , образованный отраженным лучом и перпендикуляром к поверхности, называют углом отражения.



10. Закон отражения света

На границе раздела двух сред происходит нарушение закона прямолинейного распространения света. При этом после отражения луч света остается в той же плоскости, что и падающий луч. Для зеркального отражения света выполняется закон отражения света, установленный еще в III веке. н. э.

- Луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр к поверхности в точке падения лежат в одной плоскости.
- Угол отражения равен углу падения.

Ход лучей при отражении света имеет свойство обратимости: если точечный объект и его изображение поменять местами, то лучевая картина отражения не изменится; изменится при этом лишь направление лучей.

11. Явление преломления света

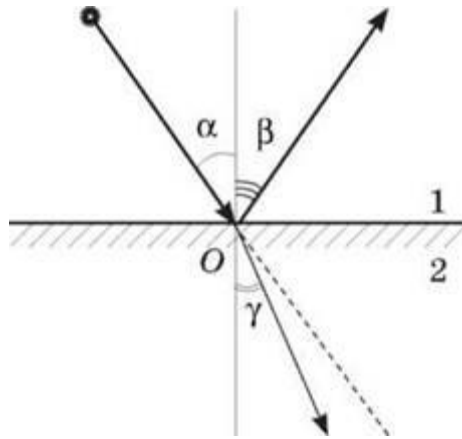
Из опытов следует, что при падении узкого пучка света на границу раздела двух сред пучок разделяется: одна его часть возвращается в первую среду (и это явление называется отражением света), а другая — проникает во вторую среду, изменив свое направление (это явление называется преломлением света).

В случае изменения угла падения пучка наблюдается изменение яркости отраженного и заломленного пучков: яркость одного увеличивается, а другого — уменьшается. Для нормального падения пучка света на плоскую границу преломления нет. В соответствии с увеличением угла падения увеличивается и угол преломления.

Количественный закон, описывающий преломление света, был установлен в 1621 году голландским ученым Снеллиусом.

12. Закон преломления света

Рассмотрим падение света из среды 1 на границу раздела с прозрачной средой 2 (например, из воздуха на поверхность воды). Если угол α падения луча на границу раздела отличный от нуля, то после перехода в среду 2 направление луча меняется.



Углом преломления γ называется угол между преломленным лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред.

В начале XVII века был открыт **закон преломления света**:

луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр к поверхности в точке падения луча лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения луча к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n.$$

Величина n называется относительным показателем преломления двух сред. Если среда 1 является вакуумом, то n называют абсолютным показателем преломления среды 2.

13. Показатель преломления

Физическая величина n_{21} называется относительным показателем преломления или показателем преломления второй среды относительно первой. Относительный показатель преломления показывает, во сколько раз скорость света v_1 в первой среде больше скорости света v_2 во второй среде: $n_{21} = v_1 / v_2$.

Именно изменение скорости распространения света в случае его перехода из одной прозрачной среды в другую является причиной преломления света.

Введем понятие оптической плотности среды: чем меньше скорость света в среде, тем больше ее оптическая плотность.

Физическую величину, которая определяет, во сколько раз скорость света в среде меньше, чем в вакууме, называют абсолютным показателем преломления среды.

Абсолютный показатель преломления среды n — это физическая величина, характеризующая оптическую плотность среды и равна отношению скорости света c в вакууме к скорости света v в среде:

$$n = \frac{c}{v}.$$

Абсолютный показатель преломления зависит от физического состояния среды (температуры, плотности и др.) и от свойств световой волны (длины или частоты).

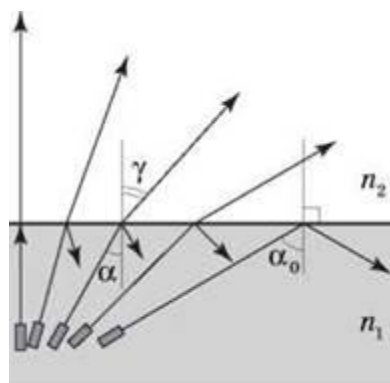
Необходимо обратить внимание: относительный показатель преломления равен $n_{21} = n_2 / n_1$.

14. Полное отражение

Если падающий луч направленный из оптически более густого среды в оптически менее

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} < 1.$$

густое (например, из воды в воздух), то $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} < 1$. Это означает, что в этом случае угол преломления γ больше угла падения α . В случае увеличения угла падения интенсивность отраженного луча увеличивается, а интенсивность заломленного луча уменьшается. И для такого угла падения α_0 , когда преломленный луч должен был бы идти вдоль поверхности раздела двух сред, то есть при $\gamma = 90^\circ$, преломленный луч полностью исчезает.



Этот угол падения α_0 называется предельным углом полного отражения, если угол падения равен этому углу или больше него, луч света полностью отражается от границы раздела двух сред. **Это явление называется полным отражением:** явление отражения света от оптически менее густого среды, при котором преломление отсутствует, а интенсивность отраженного света практически равна интенсивности падающего.

Таким образом, преломление не сможет происходить, если $\alpha > \alpha_0$,

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

где $\alpha_0 = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$ — предельный угол полного отражения.

Например, угол полного отражения для границы раздела вода-воздух равен 49° , для границы стекло-воздух этот угол равен 39° , а для границы алмаз-воздух $\alpha_0 = 24^\circ$.

Явление полного отражения используется, например, в световодах при передаче световых сигналов в тонких стеклянных нитях («волоконная оптика»). За счет многократного полного отражения свет может быть направлено любым (прямым или изогнутым) путем.



Волоконно-оптические устройства используют в медицине как эндоскопы — зонды, которые вводят в различные внутренние органы для непосредственного визуального наблюдения.

В настоящее время волоконная оптика вытесняет металлические проводники в системах передачи информации.

Полное отражение используют в призматических биноклях, перископах, зеркальных фотоаппаратах, а также в свето-обертувачах (катафотах), которые обеспечивают безопасную стоянку и движение автомобилей.

Закрепление изученного материала по теме «Геометрическая оптика»

1. Солнца падают под углом 37° к гладкой поверхности воды. Найти в градусах угол отражения.
2. Зеркало повернули на угол $44,8^\circ$ относительно оси, проходящей через его плоскость. Найти в градусах угол поворота отраженного зеркалом луча, если направление падающего луча постоянно.
3. Определить показатель преломления стекла относительно жидкости, если скорость распространения света в стекле равна $2 \cdot 10^8$ м/с, а в жидкости – $2,5 \cdot 10^8$ м/с.
4. Изображение предмета, расположенного на расстоянии 80 см от тонкой рассеивающей линзы, наблюдается на расстоянии 48 см от нее. Найдите модуль фокусного расстояния рассеивающей линзы.

2 вариант

1. Высота Солнца над горизонтом равна 36° . Найти в градусах минимально возможный угол отражения солнечных лучей от вертикальных оконных стекол.
2. Луч света падает на пластинку под углом 18° к нормали. Найти в градусах угол между мысленным продолжением падающего луча и отраженным лучом.
3. световой луч распространяется в среде с показателем преломления 1,5. Определить время, за которое свет пройдет расстояние 1 км.
4. Определить увеличение, даваемое линзой, фокусное расстояние которой равно $F=0,26$ м, если предмет отстоит от нее на расстояние $d=30$ см.

Лекция 22. Интерференция, дифракция, дисперсия

1. Опыты Ньютона по разложению белого света в спектр

В 1666 году Исаак Ньютон направил тонкий пучок солнечного света на стеклянную призму. За призмой наблюдалось разложение белого света в цветной спектр: семь основных цветов — красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый плавно переходили друг в друга. Малейшего отклонения от первоначального направления падения испытывают красные лучи, а наибольшего — фиолетовые.

Ньютон пришел к выводу, что белый свет имеет сложную структуру, т. е. белый свет содержит электромагнитные волны разных частот.

Второй важный вывод Ньютона заключается в том, что свет различного цвета характеризуется разными показателями преломления в определенной среде. Это означает, что абсолютный показатель преломления n_f для фиолетовых цветов больше, чем для красного n_r . Зависимость показателя преломления света от его цвета Ньютон назвал дисперсией (от латинского слова *dispersio* — «рассеивание»).

2. Дисперсия света

Согласно волновой теории цвета света определяются частотой электромагнитной волны, которой является свет. Наименьшую частоту имеет красный цвет, наибольшую — фиолетовый. Анализируя опыты Ньютона, и опираясь на волновую теорию света, можно сделать вывод: показатель преломления света зависит от частоты световой волны.

Различным скоростям распространения волн соответствуют разные абсолютные показатели преломления среды ($n = c/v$).

Явление разложения света в спектр, обусловленное зависимостью абсолютного показателя преломления среды от частоты световой волны, называют дисперсией света.

Учитывая, что длина волны обратно пропорциональна частоте ($\lambda = c/v$), можно утверждать, что абсолютный показатель преломления уменьшается в соответствии с увеличением длины световой волны.

Отсюда следует то, что в случае заданной частоты длина волны больше в той среде, где скорость волны больше.

Во время перехода из одной среды в другую скорость v распространения световой волны изменяется, но частота ν , а следовательно, и цвет света остаются неизменными. Поэтому, согласно формуле $v = \lambda\nu$, изменяется длина световой волны. Во время перехода в среду с большей оптической плотностью длина волны, как и ее скорость, уменьшается:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

Опыты доказали, что цвет определяет именно частота световой волны, поэтому, например, длина волны красного света в воде меньше, чем в вакууме (или воздухе).

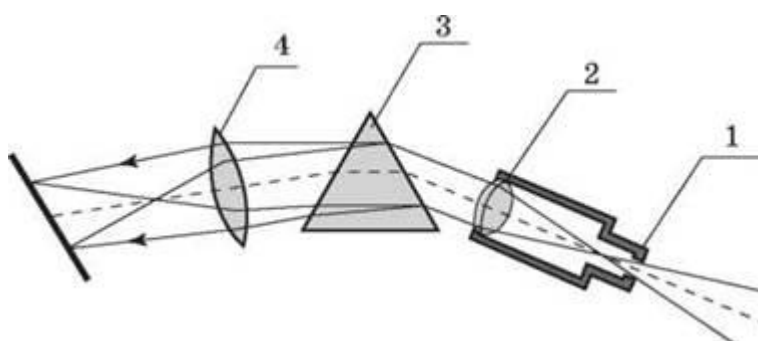
3. Спектроскоп

Совокупность частот световых волн, содержащихся в излучении какого-либо вещества, называют спектром излучения этого вещества.

Спектральный анализ — метод определения химического состава вещества по его спектру.

Спектральный состав света изучают с помощью спектральных аппаратов. Обычно спектральный аппарат состоит из трех основных частей: коллиматора, призмы и зрительной трубы (или линзы и экрана).

Коллиматор представляет собой узкую трубку, на одном конце которой расположена ширма со щелью 1, что находится в фокусе линзы 2.



Узкий параллельный пучок света направлен на призму 3. После преломления, то из призмы выходят пучки, каждый из которых отклоняется на некоторый угол. Если пучки фокусирует объективная линза 4 на фотопластинке или экране, то такой прибор называется спектрографом. Если вместо линзы и экрана используют зрительную трубу, то прибор называют спектроскопом.

4. Окраска предметов

Поскольку белый свет является составным, то есть представляет собой совокупность различных цветов, окраска предметов может возникать по двум причинам:

1) Исключение какого-либо цвета (или цветов) из состава белого света при поглощении веществом световых волн с определенной длиной волны. В результате отраженный от вещества или преломленный свет приобретает окраску. Например, зеленый цвет листьев растений обусловлен тем, что хлорофилл, который входит в их состав, поглощает в основном красные лучи. Все другие цвета спектра лист отражает, но белый свет после исключения из его состава красных цветов глаз воспринимает как зеленый.

2) Разделение цветов в пучке белого света из-за того, что волны разной длины волны преломляются или рассеиваются веществом по-разному, а также в результате интерференции или дифракции. Например:

- вследствие того, что волны разной длины волны преломляются по-разному, пучок белого света после преломления в призме разлагается в цветной спектр;
- при интерференции лучей, отраженных двумя поверхностями тонкой пленки, возникает радужная окраска (мыльные пузыри, крылья насекомых);
- поскольку волны разной длины волны по-разному рассеиваются на скоплениях молекул в воздухе, цвет неба становится голубым;
- радуга также объясняется разделением цветов во время преломления света капельками воды.

5. Волновые свойства света

Поскольку волны не взаимодействуют друг с другом, то каждая область пространства, куда приходят две или несколько волн, будет принимать участие в колебаниях, вызванных каждой волной в отдельности.

Для того чтобы найти результирующее смещение в определенной точке пространства, нужно найти смещение, вызванное каждой волной, а затем добавить их.

Сложение в пространстве волн, при которых образуется постоянное во времени распределение амплитуд результирующих колебаний, называется интерференцией (от латинских слов *inter* — «взаимно, между собой» и *ferio* — «удар, поражаю»).

Интерференцией волн называется явление усиления колебаний в одних точках пространства и ослабление в других в результате наложения двух или нескольких волн, приходящих в эти точки.

Поскольку свет имеет электромагнитную природу, то в случае распространения световой волны в каждой точке пространства происходит периодическое изменение напряженности и магнитной индукции электромагнитного поля. Если через любую точку пространства распространяются две световые волны, то напряженности полей векторно суммируются. Результирующая напряженность будет характеризовать световую энергию, которая приходит в определенную точку.

Чем больше напряженность, тем больше энергия, которая поступает. Точно так же складываются и векторы магнитной индукции. В случае, когда направления напряженностей полей двух световых волн совпадают, результирующая напряженность увеличивается, и в этих точках наблюдается максимальное увеличение освещенности. И наоборот, когда напряженности полей направлены противоположно, результирующая напряженность уменьшается и свет гасится светом.

Необходимо обратить внимание на следующее: при интерференции энергия не исчезает — происходит ее перераспределение в пространстве.

Для того чтобы в определенных точках пространства все время могло происходить усиление или ослабление результирующих колебаний, необходимо, чтобы выполнялись два условия, которые называются условиями когерентности:

- 1) волны должны иметь одинаковую частоту;
- 2) неизменное смещение фаз в каждой точке пространства.

Волны, соответствующие условиям когерентности, называют когерентными.

Когерентные источники — это источники, которые имеют одинаковую частоту и неизменное смещение фаз во времени.

6. Дифракция света

Наличие четкой тени за освещенным объектом казалась весомым доказательством прямолинейного распространения света. Однако чем дальше находится от объекта его тень, тем более расплывчатыми становятся ее очертания.

Если на пути пучка света поставить небольшое непрозрачное тело, размеры которого сопоставимы с длиной световой волны, то свет, огибая края этого тела, будет отклоняться от прямолинейного распространения.

Опыты итальянского ученого Гримальди в середине XVII века. свидетельствовали о том, что даже в однородной среде свет не всегда распространяется прямолинейно: вблизи краев препятствий оно загибается, отклоняясь от прямолинейного распространения.

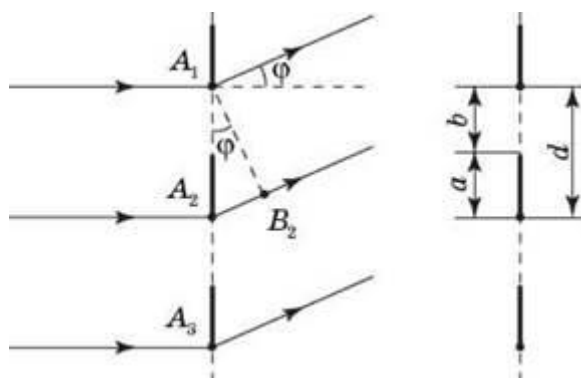
Дифракция света — это явление огибания границ непрозрачных тел — краев отверстий, узких щелей и экранов, то есть нарушение прямолинейности света.

Дифракция почти не заметна, когда ширина проема намного превышает длину волны. Зато когда ширина проема намного меньше длины волны, дифракция наиболее заметна. По этой причине нельзя получить пучок света, толщина которого меньше длины волны.

7. Дифракционная решетка

Дифракционная решетка — это спектральный прибор, используемый для разложения света в спектр и измерения длины волны.

Назовем периодом d дифракционной решетки суммарную ширину щели и непрозрачного промежутка: $d = a + b$.



Рассмотрим вторичные световые волны от точек A_1 и A_2 , которые распространяются под углом ϕ к направлению первичной волны. Разность хода этих волн:

$$A_2B_2 = d \sin \phi.$$

Следовательно, условие взаимного усиления двух вторичных волн имеет вид:

$$d \sin \phi = k\lambda,$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$

Если это условие выполняется, то соответствующие волны от точек $A_3, A_4, \dots A_n$ тоже имеют одинаковые фазы с рассматриваемыми волнами. Таким образом, равенство $d \sin \phi = k\lambda$ является условием максимума освещенности. Значение координат

порядок дифракционного максимума. Во всех направлениях, для которых угол φ не соответствует полученной формуле, световые волны практически не распространяются.

Положение максимумов света не зависит от числа щелей, а зависит только от длины волны. Чем меньше длина волны излучения, тем меньшему значению угла соответствует положение максимума. Таким образом, видимое оптическое излучение растягивается в спектр так, что внутренним краем его является фиолетовый, а внешним — красное оптическое излучение. Значение $k = 0$ соответствует максимуму за направлением $\varphi = 0$ для всех длин волн. Поэтому нулевой спектр представляет собой белое изображение щели.

Закрепление изученного материала по теме «Волновая оптика»

1. Разность хода между волнами от двух когерентных источников в воздухе 2 мкм. Найдите разность хода между этими же волнами в воде.
2. Как изменится картина дифракционного спектра, если решетку с периодом 0,02 мм заменить решеткой с периодом 0,01 мм? Ответ объясните.
3. На дифракционную решетку с периодом 0,01 мм падает монохроматический свет с длиной волны 500 нм. На каком расстоянии от дифракционной решетки находится экран, если расстояние между максимумами второго порядка 20 см?
4. Два когерентных источника испускают монохроматический свет с длиной волны 0,6 мкм. Определить, на каком расстоянии от точки, расположенной на экране на равном расстоянии от источников, будет первый максимум освещенности. Экран удален от источников на 3 м, расстояние между источниками 0,5 мм.
5. Показатель преломления воды для красного света равен 1,329, а для фиолетового света он равен 1,344. Для какого цвета скорость света в воде больше и во сколько раз? $\lambda = 750$ нм)? Ответ объясните. $\lambda = 500$ нм), а затем осветили красным светом ($\lambda = 3$). Как изменилась картина дифракционного спектра, если дифракционную решетку сначала освещали зеленым светом (
6. Найдите наибольший порядок спектра для желтой линии натрия с длиной волны 580 нм, если период дифракционной решетки 3 мкм.
7. При наблюдении интерференции света от двух когерентных источников монохроматического света с длиной волны 600 нм расстояние на экране от центрального до второго максимума составляет 12 см. Рассчитайте расстояние между источниками света, если расстояние до экрана 2 м.

Раздел 4. Основы специальной теории относительности

Лекция 23. Основы специальной теории относительности

Специальная (или *частная*) *теория относительности* (СТО) представляет собой современную физическую теорию пространства и времени. Наряду с квантовой механикой, СТО служит теоретической базой современной физики и техники. СТО часто называют *релятивистской теорией*, а специфические явления, описываемые этой теорией, — *релятивистскими эффектами*. Эти эффекты наиболее отчетливо проявляются при скоростях движения тел, близких к скорости света в вакууме $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с. Специальная теория относительности была создана А. Эйнштейном (1905 г.). Предшественниками Эйнштейна, очень близко подошедшими к решению проблемы, были нидерландский физик Х. Лоренц и выдающийся французский физик А. Пуанкаре.

1. Постулаты СТО

Классическая механика Ньютона прекрасно описывает движение макротел, движущихся с малыми скоростями ($v \ll c$). В нерелятивистской физике принималось как очевидный факт существование единого мирового времени t , одинакового во всех системах отсчета. В основе

классической механики лежит **механический принцип относительности** (или **принцип относительности Галилея**): **законы динамики одинаковы во всех инерциальных системах отсчета**. Этот принцип означает, что законы динамики **инвариантны** (т. е. неизменны) относительно **преобразований Галилея**, которые позволяют вычислить координаты движущегося тела в одной инерциальной системе (K), если заданы координаты этого тела в другой инерциальной системе (K'). В частном случае, когда система K' движется со скоростью v вдоль положительного направления оси x системы K (рисунок), преобразования Галилея имеют вид:

$$x = x' + vt, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'.$$

Предполагается, что в начальный момент оси координат обеих систем совпадают.

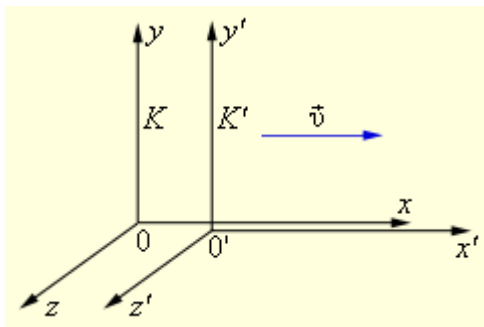


Рисунок -
Две инерциальные системы отсчета K и K'

Из преобразований Галилея следует классический **закон преобразования скоростей** при переходе от одной системы отсчета к другой:

$$u_x = u'_x + v, \quad u_y = u'_y, \quad u_z = u'_z.$$

Ускорения тела во всех инерциальных системах оказываются одинаковыми:

$$a_x = a'_x, \quad a_y = a'_y, \quad a_z = a'_z \quad \text{или} \quad \vec{a}$$

Следовательно, уравнение движения классической механики (второй закон

$$m \vec{a} = \vec{F}$$

Ньютона) не меняет своего вида при переходе от одной инерциальной системы к другой.

К концу XIX века начали накапливаться опытные факты, которые вступали в противоречие с законами классической механики. Большие затруднения возникли при попытках применить механику Ньютона к объяснению распространения света. Предположение о том, что свет распространяется в особой среде – эфире, было опровергнуто многочисленными экспериментами. Американский физик А. Майкельсон сначала самостоятельно в 1881 году, а затем совместно с Э. Морли (тоже американец) в 1887 году пытался обнаружить движение Земли относительно эфира («эфирный ветер») с помощью интерференционного опыта.

В этом опыте одно из плеч интерферометра Майкельсона устанавливалось параллельно направлению орбитальной скорости Земли ($v = 30$ км/с). Затем прибор поворачивался на 90° , и второе плечо оказывалось ориентированным по направлению орбитальной скорости. Расчеты показывали, что если бы неподвижный эфир существовал, то при повороте прибора интерференционные полосы должны были сместиться на расстояние, пропорциональное $(v/c)^2$. Опыт Майкельсона–Морли, неоднократно повторенный впоследствии с все более возрастающей

точностью, дал отрицательный результат. Анализ результатов опыта Майкельсона–Морли и ряда других экспериментов позволил сделать вывод о том, что представления об эфире как среде, в которой распространяются световые волны, ошибочно. Следовательно, для света не существует избранной (абсолютной) системы отсчета. Движение Земли по орбите не влияет на оптические явления на Земле.

Исключительную роль в развитии представлений о пространстве и времени сыграла теория Максвелла. К началу XX века эта теория стала общепризнанной. Предсказанные теорией Максвелла электромагнитные волны, распространяющиеся с конечной скоростью, уже нашли практическое применение – в 1895 году А. С. Поповым было изобретено радио. Но из теории Максвелла следует, что скорость распространения электромагнитных волн в любой инерциальной системе отсчета имеет одно и то же значение, равное скорости света в вакууме. Это значит, что уравнения, описывающие распространение электромагнитных волн, не инвариантны относительно преобразований Галилея. Если электромагнитная волна (в частности, свет) распространяется в системе отсчета K' (рис. 4.1.1) в положительном направлении оси x' , то в системе K свет должен, согласно галилеевской кинематике распространяться со скоростью $c + v$, а не c .

Итак, на рубеже XIX и XX веков физика переживала глубокий кризис. Выход был найден Эйнштейном ценой отказа от классических представлений о пространстве и времени. Наиболее важным шагом на этом пути явился пересмотр используемого в классической физике понятия абсолютного времени. Классические представления, кажущиеся наглядными и очевидными, в действительности оказались несостоятельными. Многие понятия и величины, которые в нерелятивистской физике считались абсолютными, т. е. не зависящими от системы отсчета, в эйнштейновской теории относительности переведены в разряд относительных.

Так как все физические явления происходят в пространстве и во времени, новая концепция пространственно-временных закономерностей не могла не затронуть в итоге всю физику.

В основе специальной теории относительности лежат два принципа или постулата, сформулированные Эйнштейном в 1905 г.

1. **Принцип относительности:** все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой. Это означает, что во всех инерциальных системах физические законы (не только механические) имеют одинаковую форму. Таким образом, принцип относительности классической механики обобщается на все процессы природы, в том числе и на электромагнитные. Этот обобщенный принцип называют **принципом относительности Эйнштейна**.

2. **Принцип постоянства скорости света:** скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета. Скорость света в СТО занимает особое положение. Это предельная скорость передачи взаимодействий и сигналов из одной точки пространства в другую.

Эти принципы следует рассматривать как обобщение всей совокупности опытных фактов. Следствия из теории, созданной на основе этих принципов, подтверждались бесконечными опытными проверками. СТО позволила разрешить все проблемы «доэйнштейновской» физики и объяснить «противоречивые» результаты известных к тому времени экспериментов в области электродинамики и оптики. В последующее время СТО была подкреплена экспериментальными

данными, полученными при изучении движения быстрых частиц в ускорителях, атомных процессах, ядерных реакций и т. п.

Постулаты СТО находятся в явном противоречии с классическими представлениями. Рассмотрим такой мысленный эксперимент: в момент времени $t = 0$, когда координатные оси двух инерциальных систем K и K' совпадают, в общем начале координат произошла кратковременная вспышка света. За время t системы сместятся относительно друг друга на расстояние vt , а сферический волновой фронт в каждой системе будет иметь радиус ct (рисунок), так как системы равноправны и в каждой из них скорость света равна c .

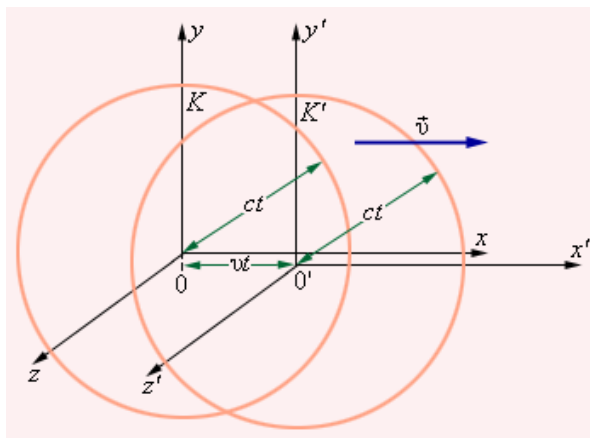


Рисунок -
Кажущееся противоречие постулатов СТО

С точки зрения наблюдателя в системе K центр сферы находится в точке O , а с точки зрения наблюдателя в системе K' он будет находиться в точке O' . Следовательно, центр сферического фронта одновременно находится в двух разных точках.

Причина возникающего недоразумения лежит не в противоречии между двумя принципами СТО, а в допущении, что положение фронтов сферических волн для обеих систем относится к **одному и тому же моменту времени**. Это допущение заключено в формулах преобразования Галилея, согласно которым время в обеих системах течет одинаково: $t = t'$. Следовательно, постулаты Эйнштейна находятся в противоречии не друг с другом, а с формулами преобразования Галилея. Поэтому на смену галилеевых преобразований СТО предложила другие формулы преобразования при переходе из одной инерциальной системы в другую – так называемые преобразования Лоренца, которые при скоростях движения, близких к скорости света, позволяют объяснить все релятивистские эффекты, а при малых скоростях ($v \ll c$) переходят в формулы преобразования Галилея. Таким образом, новая теория (СТО) не отвергла старую классическую механику Ньютона, а только уточнила пределы ее применимости. Такая взаимосвязь между старой и новой, более общей теорией, включающей старую теорию как предельный случай, носит название принципа соответствия.

Закрепление изученного материала по теме «Специальная теория относительности»

1. Ион, обладающий скоростью $0,6c$, испускает фотон в направлении, противоположном
2. С космического корабля, удаляющегося от Земли со скоростью $0,75c$, стартует ракета в направлении движения корабля. Скорость ракеты относительно Земли $0,96c$. Какова скорость ракеты относительно корабля?
3. Внешнее электрическое поле совершает работу $0,26$ МэВ по ускорению электрона. С какой скоростью будет двигаться электрон, если его начальная скорость $0,5c$?

4. Ион, получивший в ускорителе скорость $v=0.8c$, испускает фотон в направлении своего движения. Какова скорость фотона относительно иона?
5. Два лазерных импульса излучаются в вакууме навстречу друг другу. С какой скоростью они распространятся друг относительно друга?
6. Две галактики разбегаются от центра Вселенной в противоположных направлениях с одинаковыми скоростями $0,8c$ относительно центра. С какой скоростью они удалятся друг от друга?
7. Ракета движется со скоростью $0,968c$. Во сколько раз время, измеренное в ракете, отличается от времени, измеренного по неподвижным часам?
8. Какую работу (в МэВ) надо совершить для увеличения скорости электрона от $0,7c$ до $0,9c$?

Раздел 5. Квантовая физика. Физика атома и атомного ядра

Лекция 24. Квантовая теория. Фотоэффект. Фотоны. Давление света

1. Противоречия между теорией и опытом

Одной из проблем, с которой физики столкнулись в конце XIX века, было установление закономерностей излучения абсолютно черного тела.

Абсолютно черное тело — это физическая модель тела, полностью поглощающего любое падающее на него излучение.

Экспериментально было получено распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела. Однако аналитический вид соответствующей к этому графика функции $W\lambda = f(\lambda)$ никому не был известен.

Более того, все попытки ученых получить экспериментально эту функцию заканчивались неудачей.

2. Гипотеза Планка

Чтобы достичь согласия между теорией и опытом, надо было принять, что свет излучается и поглощается отдельными порциями (квантами). Это означало, что свет обладает свойствами не только волны, но и частиц.

14 декабря 1900 г. немецкий физик Макс Планк выступил на заседании Немецкого физического общества с докладом, посвященным проблеме распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела. Предложенное им решение проблемы стало первым шагом в создании современной физики микромира.

Свет излучается и поглощается веществом не непрерывно, а отдельными порциями — квантами.

Причем энергия такого кванта определялась величиной $E = h\nu$, где h — постоянная Планка.

По современным данным $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·сек.

Однако в то время не было прямых экспериментальных доказательств существования квантов излучения. В результате идею Планка большинство физиков восприняли как «ловкий фокус», что не имел серьезных научных оснований.

После открытия Планка начала развиваться новая, самая современная и глубокая физическая теория — квантовая теория. Развитие ее не завершено и по сей день.

3. Фотоны

Планк сначала решил, что свет только излучается квантами, но распространяется и поглощается непрерывно. Ситуация коренным образом изменилась, когда Альберт Эйнштейн пришел к выводу, что монохроматическое излучение ведет себя так, будто состоит

из $N = W/h\nu$ независимых друг от друга квантов энергии величиной $h\nu$ каждый. Эйнштейн предположил, что дело не просто в квантах энергии, а в реальных частицах, из которых состоит любое электромагнитное излучение. Позже частицы света (кванты света) стали называть фотонами.

Фотоны имеют такие свойства:

1. Фотон является электрически нейтральной частицей; его заряд равен нулю.
2. Скорость движения фотона не зависит от выбора системы отсчета и всегда равна скорости света в вакууме.
3. Энергия фотона пропорциональна частоте электромагнитного излучения, квантом которого он является: $E = h\nu$.

4. Импульс фотона равен: $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$.

5. Масса фотона равна нулю.

4. Законы фотоэффекта

Фотоэффект был открыт в 1887 году Генрихом Герцем, однако первые экспериментальные исследования были выполнены русским ученым А. Г. Столетовым.

Явление взаимодействия света с веществом, сопровождающееся испусканием электронов, называют **фотоэффектом**.

Различают внешний фотоэффект, при котором фотоэлектроны вылетают за пределы тела, и внутренний фотоэффект, при котором электроны, вырванные светом из атомов, остаются внутри вещества.

Многочисленные эксперименты и наблюдения позволили сделать вывод: явление фотоэффекта практически безинерционно; интенсивность фотоэффекта зависит от рода металла, величины светового потока и спектрального состава излучения.

Законы фотоэффекта были экспериментально установлены профессором Московского университета А. Г. Столетовым:

- 1). Число фотоэлектронов, ежесекундно вырываются с поверхности металла, прямо пропорционально интенсивности света.
- 2). Максимальная начальная скорость фотоэлектронов увеличивается в случае увеличения частоты света, что падает, и не зависит от интенсивности света.
- 3). Для каждого вещества существует максимальная длина световой волны (красная граница фотоэффекта), при которой начинается фотоэффект. Облучение вещества световыми волнами большей длины фотоэффекта не вызывает.

Если первый закон фотоэффекта еще можно было объяснить, используя классическую электромагнитную теорию света, то следующие два закона прямо противоречили представлениям, которые существовали в то время. Понадобилось более 20 лет, чтобы разгадать эту загадку.

5. Применение фотоэффекта

Явление фотоэффекта широко применяют в науке и технике: оно позволяет осуществить непосредственное преобразование энергии света в электрическую энергию. Приборы, в основе принципа действия которых лежит явление фотоэффекта, называют фотоэлементами. В фотоэлементах энергия света управляет энергией электрического тока или преобразуется в нее.

Фотоэлементы используют для считывания информации (изображения, звука или данных с оптических дисков (cd-дисков), которые являются сегодня одной из самых распространенных форм записи и хранения информации.

Важным применением фотоэлементов является использование их для изготовления солнечных батарей на космических кораблях. Солнечные батареи используют сегодня и как источник электрического тока в жарких местностях: такую батарею размещают на крыше дома, а электроэнергия, которую она дает, питает кондиционеры, охлаждающие помещения. Таким образом, солнечная энергия, когда ее оказывается в избытке, сама же помогает ослабить нежелательные последствия этого избытка.

Применение фотоэффекта в технике:

- кино (воспроизведение звука);
- фототелеграф;
- фотометрия (для измерения силы света, яркости, освещенности);
- управления производственными процессами.

6. Почему свет оказывает давление

Для объяснения светового давления рассмотрим действие электромагнитной волны, падающей на металлическую пластину перпендикулярно ее поверхности. Под действием электрического поля волны свободные электроны будут двигаться с некоторой скоростью \vec{v} в направлении, противоположном направлению вектора напряженности \vec{E} . Со стороны магнитного поля волны на движущийся электрон действует сила Лоренца. Если, воспользовавшись правилом левой руки, определить направление силы Лоренца, то увидим, что он совпадает с направлением распространения волны. Суммарная сила Лоренца, действующая на электроны пластины, и является силой давления, а отношение этой силы к площади поверхности определяет давление электромагнитной волны.

Максвелл теоретически доказал, что давление, создаваемое электромагнитной волной на абсолютно непрозрачное тело можно определить по формуле:

$$p = (1 + R)w_{\text{ср}},$$

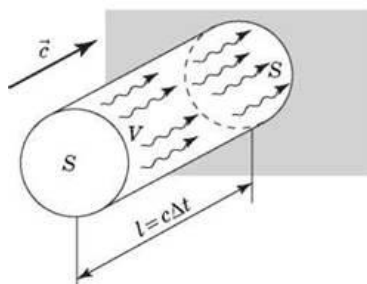
где R — коэффициент отражения, $w_{\text{ср}}$ — средняя плотность энергии волны.

Зеркальная поверхность полностью отражает свет, поэтому $R = 1$. Черная поверхность, наоборот, полностью поглощает свет, поэтому $R = 0$ и $p = w_{\text{ср}}$. Следовательно, давление, создаваемое светом на зеркальную поверхность вдвое больше, чем давление на черную поверхность.

Предсказанное Максвеллом существование светового давления было экспериментально подтверждено П. М. Лебедевым, который в 1900 г. измерил давление света на твердые тела, используя чувствительные крутильные весы. Теория и эксперимент совпали. Опыты Лебедева — экспериментальное свидетельство факта: фотоны имеют импульс.

7. Квантовое объяснение давления света

Пусть параллельный пучок монохроматического света падает на тело перпендикулярно его поверхности.



За интервал времени Δt на поверхность падает N фотонов. Каждый из поглощенных

фотонов передает телу импульс, равный $p_v = \frac{h\nu}{c}$, а каждый из отраженных — $p_v = \frac{2h\nu}{c}$.

Если R — коэффициент отражения фотонов, то RN фотонов отражается от тела, а $(1 - R)N$ — поглощается. Суммарный импульс, который передают телу все N фотонов, равна:

$$\Delta p = (1 - R)N \frac{h\nu}{c} + RN \frac{2h\nu}{c} = (1 + R) \frac{N h \nu}{c} = (1 + R) \frac{W}{c},$$

где $W = N h \nu$ — суммарная энергия всех фотонов.

Сила давления, согласно второму закону Ньютона, равна $F = \Delta p / \Delta t$, поэтому давление света определяют из соотношения:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\Delta p}{S \Delta t} = \frac{(1 + R)W}{c S \Delta t} = \frac{(1 + R)W}{V} = (1 + R)w,$$

где $w = \frac{W}{V}$ — объемная плотность энергии падающего света.

Таким образом, выражение для давления света, полученное в рамках квантовой теории, полностью совпадает с выражением для давления света, предсказанным теорией Максвелла.

Закрепление изученного материала по теме «Фотоэффект»

1. Вычислить энергию, которую несет один фотон инфракрасного света с длиной волны $\lambda = 10^{-5} \text{ м}$
2. Найдите работу выхода электронов из металла, для которого красная граница фотоэффекта равна $6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$.
3. Наибольшая длина волны, при которой происходит фотоэффект для калия равна $6,2 \cdot 10^{-5} \text{ см}$. Найдите работу выхода электронов из калия.
4. Определите энергию, массу и импульс фотонов для инфракрасных лучей $\lambda = 800 \text{ нм}$.
5. Определите наибольшую скорость электрона, вылетающего из металла цезия, при освещении его светом с длиной волны 400 нм .
6. Определите наибольшую длину волны световой волны, при которой возможен фотоэффект для платины $A = 8,5 \cdot 10^{19} \text{ Дж}$.
7. Определите энергию, массу и импульс фотонов для ультрафиолетовых $\lambda = 50 \text{ нм}$ лучей.
8. Красная граница фотоэффекта для металла равна $4,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$. Определите работу выхода электрона.
9. При освещении вольфрама с работой выхода $7,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ светом с длиной волны 200 нм максимальная скорость вылетевшего электрона _____ м/с?
10. Масса фотона с длиной волны $0,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ равна _____ кг.

Лекция 25. Строение атома. Открытие радиоактивности

1. Ядерная модель атома

Эксперименты, проведенные различными учеными на протяжении XIX столетия, доказали, что атом имеет сложную структуру. Физикам стало известно, что в состав атома входят электроны, которые имеют отрицательный заряд, хотя атом в целом является нейтральным.

Одну из первых моделей атома в 1903 г. предложил Томсон. Согласно модели Томсона, атомы представляют собой однородные шары из положительно заряженного вещества, в которых находятся электроны. Суммарный заряд электронов равен положительному заряду атома. Поэтому атом в целом электрически нейтрален.

Эта модель получила название «пудинг», потому что электроны были вкраплены в положительно заряженную среду, подобно изюму в пудинге.

Дальнейший прогресс в исследовании внутренней структуры атома был связан с именем английского физика Эрнеста Резерфорда.

Резерфорд предложил своим сотрудникам экспериментально проверить состоятельность модели атома Томсона. Пропуская через очень тонкую металлическую пленку узкий пучок быстрых α -частиц, экспериментаторы не должны были обнаружить сколько-нибудь заметного отклонения этих частиц. Резерфорд установил, что каждая α -частица, попадая на экран из сернистого цинка, вызывает вспышку света (см. рисунок).

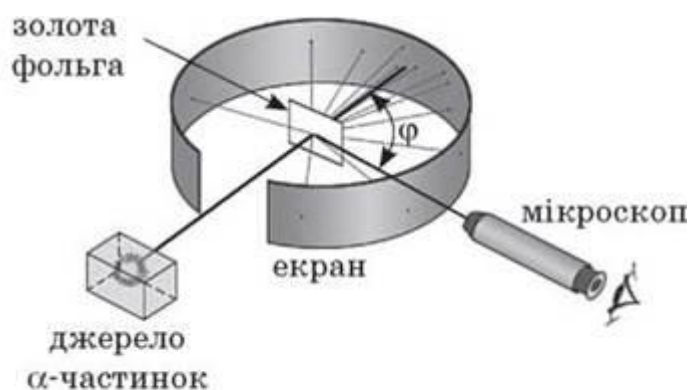


Схема досліду Резерфорда

Испытав рассеяние в золотой фольге, α -частицы ударились затем в экран и их регистрировали с помощью микроскопа. Совершенно неожиданно оказалось, что примерно одна α -частица из 20 000, падающих на золотую фольгу толщиной всего лишь $4 \cdot 10^{-5}$ см, возвращается назад в сторону источника.

Резерфорду понадобилось несколько лет, чтобы окончательно понять столь неожиданное рассеяние α -частиц на большие углы. Он пришел к выводу, что положительный заряд атома сосредоточен в очень малом объеме в центре атома, а не распределен по всему атому, как это было в модели Томсона.

Резерфорд смог определить размер атомного ядра. И оказалось, что атомное ядро в десятки тысяч раз меньше чем от собственно атома: размер ядра — около 10^{-14} – 10^{-15} м, в то время как размер атома — примерно 10^{-10} м.

Основываясь на своих опытах и расчетах, Резерфорд предложил планетарную (ядерную) модель атома:

- атомы любого элемента состоят из положительно заряженной части, получившей название ядра;
- в состав ядра входят положительно заряженные элементарные частицы — протоны (позднее было установлено, что и нейтральные нейтроны);
- вокруг ядра вращаются электроны, образующие так называемую электронную оболочку.

Сходство атома с Солнечной системой усиливалась тем, что закон Кулона, что «руководит» движением электронов, совпадает по форме с законом всемирного тяготения, что «руководит» движением планет: и в том, и в другом случае сила обратно пропорциональна квадрату расстояния.

2. Квантовые постулаты Бора

Согласно классической теории, система, состоящая из массивного положительно заряженного ядра и легких, отрицательно заряженных электронов, может быть устойчивой только в том случае, когда электроны находятся в движении. Таким образом, атом должен быть подобен миниатюрной Солнечной системы, в которой роль Солнца играет ядро, а планет — электрон.

Двигаясь по «планетарных» орбитам, электроны должны были бы путем излучения терять энергию движения и в результате быстро приближаться к ядру. Расчеты показывали, что электрон в атоме Водорода должен випроменити всю свою энергию за малую долю секунды. Однако в атоме этого не происходит.

Таким образом, в «атомных масштабах» противоречит опыту не только классическая электродинамика, но и классическая механика — основа основ всей классической физики.

Датский физик Нильс Бор дополнил планетарную модель атома положениями, которые призваны были устранить недостатки этой модели. В 1913 году опубликовал свою квантовую теорию атома. Основу этой теории составляют постулаты Бора.

Первый постулат Бора:

Ø Существуют особые состояния атома, в которых он не излучает энергию. Такие состояния называют стационарными состояниями.

Ø Стационарное состояние атома означает, что его электроны локализованы в пространстве и имеют определенную энергию.

Момент импульса тела определяется как $L = m v r$, где m — масса тела; v — модуль скорости его движения; r — расстояние до точки вращения тела. Итак, согласно первому постулату Бора, орбитальный момент импульса электрона может принимать только дискретные значения:

$$m_e v r_n = n \frac{h}{2\pi},$$

где m_e — масса электрона; v — скорость движения электрона; r_n — радиус стационарной орбиты атома; $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ (целые числа); h — постоянная Планка.

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}.$$

В ядерной физике часто используют величину

Второй постулат Бора:

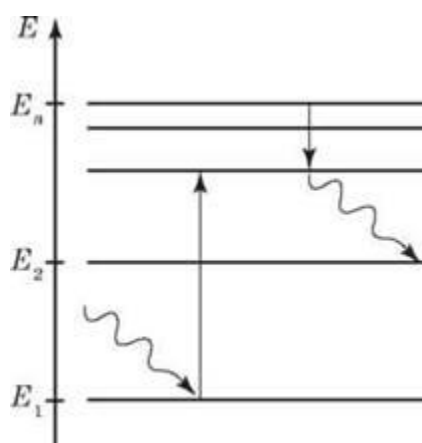
Ø Любое излучение атома связано с его переходом из одного стационарного энергетического состояния в другое.

Ø Для перехода атома из одного стационарного состояния в другое со значениями энергий E_1 и E_2 выполняется равенство:

$$h\nu = E_1 - E_2.$$

Для наглядной демонстрации энергетического состояния атома применяют специальные схемы. Каждый стационарный (разрешенный) состояние атома обозначают линией, которую называют энергетическим уровнем. Самый низкий уровень называют энергетическим уровнем

основного состояния. Выше него расположены другие разрешенные уровни. Переходы атома из одного состояния в другое изображаются вертикальными стрелками.



На рисунке показаны энергетические уровни атома Водорода. Из теории Бора следует

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}.$$

формула для энергии любого возбужденного состояния атома Водорода:

Все энергетические уровни соответствуют отрицательным значениям энергии: нулевое значение энергии соответствовало бы удалению электрона на бесконечно большое расстояние от ядра, т. е. ионизации атома. Самый низкий энергетический уровень соответствует основному состоянию атома, а все остальные — возбужденному. Для ионизации атома, находящегося в основном состоянии, необходимо передать ему энергию, равную $|E_1|$ (это так называемая энергия ионизации атома). Теория Бора дает правильное значение энергии ионизации атома Водорода: 13,55 эв.

Теперь можно объяснить, почему атомы являются стабильными: без поступления энергии извне они могут переходить только в состояние с меньшей энергией. Обычно атом находится в возбужденном состоянии недолго (около 10⁻⁸ с), после чего переходит в основное состояние. Если же атом находится в основном состоянии, то переходить ему некуда. Существование основного состояния (состояния с наименьшей энергией) является общим признаком квантовых систем.

Наибольший успех теория Бора имела применительно к атому Водорода, для которого оказалось возможным построить количественную теорию. Однако уже для следующего по сложности атома — Гелия — добиться количественного согласия с опытом не удалось, не говоря уже о более сложные атомы.

Дальнейшее развитие физики показало, что трудности теории Бора были связаны с ее внутренней противоречивостью, потому что в ней сочетались законы классической физики и противоречащие им постулаты Бора.

3. Линейчатые спектры излучения газов

Многочисленные исследования доказали, что в результате нагрева до высокой температуры пары любого химического вещества испускают свет, узкий пучок которого призма раскладывает на несколько пучков.

Линейчатые спектры — оптические спектры испускания и поглощения, состоящие из отдельных спектральных линий.

Линейчатый спектр испускания любого конкретного химического элемента не совпадает со спектром испускания других химических элементов и, соответственно, является «визитной карточкой» элемента.

Происходит и обратное явление: в случае пропускания белого света через пару вещества наблюдается возникновение темных линий на фоне сплошного спектра. Темные линии расположены точно в тех местах, где наблюдаются линии спектра испускания данного химического элемента. Такой спектр называется линейчатым спектром поглощения.

4. Молекулярные спектры излучения

Спектр молекулы состоит из большого числа отдельных линий, сливающихся в полосы, четкие с одного края и размытые с другого. В отличие от линейчатых спектров, полосатые спектры создают не атомы, а молекулы, не связанные или слабо связанные друг с другом. Серии очень близких линий группируются на отдельных участках спектра и заполняют целые полосы.

6. Открытие радиоактивности

Первые реальные свидетельства того, что можно превращать один элемент в другой, появились у физиков во время исследования радиоактивности. В конце XIX века появились факты, которые свидетельствовали, что атом имеет сложное строение. Особенно, это стало очевидно после того, как французский ученый Анри Беккерель в 1896 г. обнаружил, что соли урана являются источником неизвестного в то время излучения. В 1898 г. ученые Пьер Кюри и Мария Кюри-Склодовская открыли два новых химических элемента (радий и полоний), в которых излучение, аналогичное излучению урана, было значительно более сильным.

Радиоактивность — способность атомов некоторых химических элементов к самопроизвольному излучению.

Химические элементы, обладающие радиоактивностью, называются радиоактивными элементами.

7. Виды радиоактивного излучения

В 1899 г. Резерфорд, изучая ионизирующую способность радиоактивного излучения, обнаружил, что оно неоднородно и состоит из двух частей, которые он назвал альфа- и бета-лучами.

Ему удалось доказать, что в α -лучи являются потоком ядер атомов Гелия. Того же года А. Беккерель доказал, что β -лучи являются потоком электронов.

В 1900 г. французский физик П. Виллард установил, что в состав радиоактивного излучения входит и третья составляющая, которую он назвал γ -лучами. Изучение γ -лучей показало, что они представляют собой электромагнитные волны, длина которых меньше, чем у рентгеновских лучей. Таким образом, было установлено, что радиоактивное излучение состоит из α -, β - и γ -лучей.

В 1903 г. Е. Резерфорд и его сотрудник Ф. Содди указали на то, что явление радиоактивности сопровождается превращением одного химического элемента в другой, например радия в радон.

Явление радиоактивности всегда сопровождается выделением энергии. Оказалось, что 1 г радия выделяет 600 Дж энергии, которую относят к α -, β - и γ -излучениям.

Экспериментальные исследования показали, что на явление радиоактивности не оказывают влияния такие внешние действия, которые могли бы повлиять на электронную оболочку атома (нагрева, электрические и магнитные поля, химические соединения, агрегатное состояние и т. др.). Следовательно, радиоактивность обусловлена только структурой атома.

Выяснилось, что радиоактивность — это свойство некоторых атомных ядер самопроизвольно превращаться в другие ядра с испусканием частиц.

Таким образом, самопроизвольное излучение веществом α -, β - и γ -частиц, наряду с другими экспериментальными фактами, послужило основанием для предположения, что атомы вещества являются сложными по структуре.

8. Радиоактивный распад

Чем же объясняется радиоактивность? Какое происхождение радиоактивных лучей? И наконец, что же происходит с веществом во время радиоактивного распада? В 1902-1903 гг. Эрнест Резерфорд и его сотрудник, английский химик Фредерик Содди предположили, что радиоактивность связана с преобразованиями атомов радиоактивного вещества в другие атомы. Расчеты показывали, что радиоактивные вещества непрерывно в течение тысячелетий излучают небольшие количества энергии, практически не изменяясь. Так, в 1903 г. Пьер Кюри определил, что 1 г радия выделяет за 1 ч около 582 Дж энергии.

Откуда же берется энергия, на выделение которой не имеют никакого влияния все известные воздействия? Очевидно, при радиоактивности вещество претерпевает каких-то глубоких изменений, совершенно отличных от обычных химических превращений. Было сделано предположение, что преобразований претерпевают сами атомы.

После того как в 1911 г. Резерфордом была предложена ядерная модель атома, стало очевидным, что именно ядро претерпевает изменения при радиоактивных превращениях.

Таким образом, было выявлено, что в результате атомного превращения образуется совершенно новое вещество, что полностью отличается по своим физическим и химическим свойствам от первоначального вещества. Это новое вещество, однако, сама также неустойчива и претерпевает превращений с испусканием характерного радиоактивного излучения.

Радиоактивность представляет собой самопроизвольное превращение одних атомных ядер в другие, сопровождающееся испусканием различных частиц.

Лекция 26. Строение атомного ядра. Ядерные превращения

1. Открытие протона и нейтрона

Изучение состава ядра проводили экспериментально с помощью бомбардировки ядра α -частицами. Во время такой бомбардировки из ядра вылетали частицы, которые входят в его состав. Первой такой частицей, открытой Резерфордом в 1919 г. во время бомбардировки ядер, был протон, или ядро легкого изотопа атома Водорода.

Замеры показали, что протон имеет положительный заряд, равный по модулю заряду электрона, а масса протона приблизительно в 1800 раз больше массы электрона. Протоны встречаются в земных условиях в свободном состоянии как ядра атома Водорода.

1930 г. Боте и Беккер, обстреливая бериллий α -частицами, обнаружили сильно проникающее излучение. Сначала предположили, что ядро Бериллия, захватив α -частицу, превращается в возбужденное ядро Углерода, переход которого в нормальное состояние сопровождается испусканием жесткого γ -излучения.

1931 г. Ирен и Фредерик Жолио-Кюри обнаружили, что новое излучение интенсивно выбивает протоны из веществ, содержащих водород.

1932 г. английский физик Джеймс Чедвик, анализируя работы Боте и Беккера и супруги Жолио-Кюри, пришел к выводу, что наблюдаемые в различных газах пробеги и скорости ядер отдачи могут возникать во время столкновения этих ядер не с γ -квантами, а с частицами, масса которых приближается к массе протона. Поскольку эти частицы обладали большой

проникающей способностью и непосредственно не ионизовали газ, значит, они были электрически нейтральными. Ведь заряженная частица сильно взаимодействует с веществом и поэтому быстро теряет свою энергию. Новая частица была названа нейтроном.

Нейтроны в свободном виде при земных условиях практически не встречаются из-за их неустойчивости. Нейтрон достаточно быстро самопроизвольно распадается: среднее время жизни нейтрона около 15,3 минуты.

2. Протонно-нейтронная модель ядра

В 1932 году русский физик Д. Д. Иваненко и немецкий физик В. Гейзенберг предложили протонно-нейтронную модель ядра, справедливость которой была впоследствии подтверждена экспериментально.

Ядро атома любого химического элемента состоит из двух видов элементарных частиц: протонов и нейтронов.

Число протонов в ядре равно атомному номеру элемента Z в периодической системе элементов и называется зарядовым числом.

Число нейтронов в ядре обозначают N .

Сумма числа протонов Z и числа нейтронов N в ядре называют массовым числом и обозначают буквой A : $A = Z + N$.

Как единицу массы в атомной и ядерной физике используют атомную единицу массы (а. е. м.).

Атомная единица массы равна $1/12$ массы атома Углерода атомной массой $12 : 1$ а. е. м. = $1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг.

Если под X подразумевается символ химического элемента, то ядро любого химического элемента в общем виде обозначается так: A_ZX . Например, для Железа: $^{56}_{26}\text{Fe}$, для Азота: $^{14}_7\text{N}$, для Урана: $^{235}_{92}\text{U}$ и т. др. Протон и нейтрон обозначаются, соответственно, как ^1_1p и ^1_0n . Поскольку массовое число A представляет собой общее число протонов и нейтронов в ядре, то число нейтронов в ядре можно найти следующим образом:

$$N = A - Z.$$

Сотрудник Резерфорда Фредерик Содди обнаружил, что существуют ядра с тем же электрическим зарядом, но разной массой (их назвали изотопами).

Изотопы представляют собой ядра с одним и тем же значением Z , но различными массовыми числами A , т. е. с различным числом нейтронов N .

Например, водород имеет три изотопа: ^1_1H — протий (в ядре только один протон), ^2_1H — дейтерий (в ядре — протон и нейтрон), ^3_1H — тритий (в ядре — протон и два нейтрона).

В современной физике принято, что протон и нейтрон — два так называемых зарядовых состояния одной и той же частицы — нуклона (от лат. *nucleus* — «ядро»). Протон — нуклон в заряженном состоянии, нейтрон — в нейтральном. Используя этот термин, можно утверждать, что атомные ядра состоят из нуклонов.

3. Характеристика ядерных сил

Ядерные силы являются самыми мощными среди четырех известных на сегодня взаимодействий: гравитационного, слабого, электромагнитного и сильного.

Так как ядра весьма устойчивы, то протоны и нейтроны должны удерживаться внутри ядра какими-то силами, причем очень значительными. Что это за силы? Наверное, можно сказать, что это не гравитационные силы, которые слишком слабы. Устойчивость ядра не может быть объяснена также электромагнитными силами по той причине, что между одноименно заряженными протонами действует электрическое отталкивание. А нейтроны лишены электрического заряда.

Получается, между нуклонами в ядре действуют особые силы. Эти силы назвали ядерными.

Основные свойства ядерных сил

1). Ядерные силы являются короткодюрными. Замеры показали, что интенсивное взаимодействие между нуклонами происходит на расстояниях, которые равны размерам нуклонов. На больших расстояниях действуют только электромагнитные силы.

2). Ядерные силы являются очень мощными. Они в 1000 раз больше силы электростатического отталкивания двух протонов на близком расстоянии (примерно 10-15 м).

3). Ядерные силы являются силами притяжения. Поэтому они удерживают нуклоны внутри ядра.

4). Ядерные силы действуют между любыми нуклонами (протон ↔ протон; нейтрон ↔ нейтрон; протон ↔ нейтрон). Во всех этих случаях ядерные силы одинаковы.

5). Ядерные силы обладают свойством насыщения, которое заключается в том, что нуклон оказывается способным к ядерной взаимодействию одновременно лишь с небольшим числом нуклонов-соседей.

4. Энергия связи атомного ядра

О прочности того или иного образования судят учитывая то, насколько легко или трудно разрушить его: чем сложнее его разрушить, тем оно прочнее. Но разрушить ядро — это значит разорвать связи между его нуклонами, или, другими словами, выполнить работу против сил связи между ними.

В Энергию связи определяют минимальной энергией, которую нужно затратить для расщепления ядра на его составные части — нуклоны. Значение энергии связи ядра очень сложно рассчитать теоретически, однако здесь на помощь приходит открытое Эйнштейном соотношение между массой и энергией: тело в состоянии покоя массой m имеет энергию $E = mc^2$, где c — скорость света.

Если энергия тела изменяется на ΔE , то масса этого тела изменяется на $\Delta m = \Delta E/c^2$.

3. Дефект масс

Измерения масс ядер показывают, что масса покоя ядра $M_{\text{я}}$ меньше, чем сумма масс покоя составляющих его нуклонов:

$$M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n .$$

Разница $\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}$ называется дефектом масс. Дефект масс является мерой энергии связи атомного ядра. Если $\Delta E_{\text{св}}$ — энергия связи ядра, выделяющаяся при его

образовании, то соответствующая ей масса $\Delta M = \frac{\Delta E_{\text{св}}}{c^2}$ характеризует уменьшение суммарной

массы всех нуклонов при образовании ядра. Итак: $\Delta E_{\text{св}} = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}) \cdot c^2$.

Чем больше протонов в ядре, т. е. чем больше заряд Ze ядра, тем сильнее кулоновское отталкивание между протонами. Поэтому, для того чтобы они не разлетались под действием кулоновских сил, требуется большее число нейтронов для стабилизации ядра. При малых Z , число нейтронов $N \approx Z$, а при больших Z (в ядрах тяжелых элементов) даже значительное число нейтронов в ядре ($N \approx 1,6Z$) уже не может препятствовать его распаду. Последним стабильным ядром, имеет максимальное число протонов, является свинец ($Z = 82$). Для характеристики прочности ядер обычно берут энергию связи в расчете на один нуклон.

Энергия связи, приходящаяся на один нуклон, называется удельной энергией связи:

$$f = \frac{E_{\text{св}}}{A}.$$

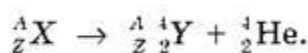
В справочных таблицах обычно приводят массы нуклидов — атомов определенного химического элемента, ядра которых содержат строго определенное количество протонов (Z) и нейтронов (N).

5. Правило смещения при α -распаде

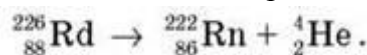
Найдем правило, согласно которому изменяются массовое и зарядовое числа ядра при α -распад (испускание α -частиц).

Преобразование атомных ядер, которые сопровождаются испусканием α -частиц, называются α -распадом.

Поскольку α -частица является ядром Гелия, уравнение α -распада в общем виде можно записать так:



Альфа-распад уменьшает массовое число на 4, а зарядовое число на 2, то есть перемещает элемент на две клетки к началу периодической системы. Например,

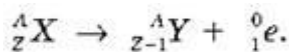


6. Правило смещения при β -распада

Во время β -распада ядра из него вылетает электрон. При этом общее число нуклонов в ядре остается прежним, то есть массовое число ядра не меняется. Заряд же ядра увеличивается на e , потому что электрон заряжен отрицательно.

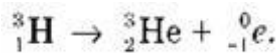
Преобразование атомных ядер, которые сопровождаются испусканием β -частиц, называются β -распадом.

Во время β -распада:



Бета-распад не изменяет массового числа, а зарядовое число увеличивает на 1, то есть смещает элемент на одну клетку ближе к концу периодической системы.

Например,



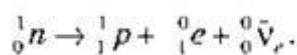
Может возникнуть вопрос: почему из ядра вылетают электроны, если оно состоит только из нуклонов, то есть протонов и нейтронов? Дело в том, что один из нейтронов ядра, выпустив электрон, превращается в протон.

α -распад и β -распад являются следствием двух законов сохранения, выполняющихся при радиоактивных превращениях, — сохранения электрического заряда и массового числа:

сумма зарядов (массовых чисел) продуктов распада равна заряду (массовому числу) исходного ядра.

Во время γ -излучения из ядра вылетает фотон, что не имеет электрического заряда. Число нуклонов при этом не меняется. Следовательно, при γ -излучения зарядовое число ядра не изменяется, т. е. ядро остается ядром того же самого химического элемента с тем же массовым числом.

Необходимо отметить, что при β -распаде, кроме электрона, вылетает еще одна частица — электронное антинейтрино ${}^0_0\bar{\nu}_e$, свойства которой мы рассмотрим позже.



Лекция 27. Законы радиоактивного распада. Элементарные часии

1. Период полураспада

Если взять закрытую стеклянную колбу, содержащую определенное количество радона, то окажется, что примерно за 57 с. количество радона в колбе уменьшится вдвое. Еще через 57 с количества радона, осталась, останется тоже половина, и т. др. Опыт показывает, что для каждого вида радиоактивных изотопов существует период полураспада — промежуток времени, в течение которого распадается половина начального числа атомов.

Будем обозначать период полураспада T .

Например, период полураспада изотопа Урана ${}^{238}92\text{U}$ равен 4,5 млрд. лет, а изотопа ${}^{235}92\text{U}$ — «всего» 700 млн. лет, то есть примерно в шесть с половиной раз меньше. Это различие в периоде полураспада объясняет, почему изотопа в земной коре в 140 раз меньше, чем ${}^{238}92\text{U}$: «вернувшись» во времени, можно надеяться, что этих изотопов Урана было поровну примерно 6 млрд. лет назад (примерно такой возраст Солнечной системы).

Период же полураспада радия ${}^{226}88\text{Ra}$, по геологическим меркам очень мал: всего лишь 1600 лет, то есть примерно в 3 млн. раз меньше, чем период полураспада ${}^{238}92\text{U}$. Радий существует на Земле только потому, что он во время радиоактивного распада урана постоянно образуется в небольших количествах.

Для характеристики радиоактивного распада часто используют величину, которую называют постоянной радиоактивного распада радионуклида и обозначают символом λ . Стала радиоактивного распада связана с периодом полураспада соотношением:

$$\lambda = \frac{0,69}{T}.$$

2. Закон радиоактивного распада

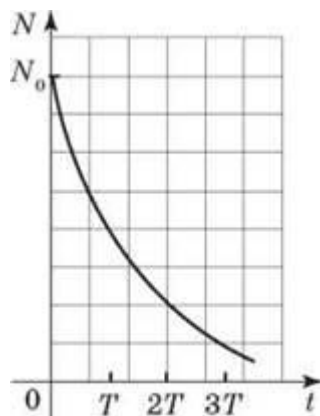
Найдем, по какому закону уменьшается со временем число атомов N определенного изотопа вследствие радиоактивного распада — иначе говоря, определим зависимость $N(t)$.

Обозначим число атомов в начальный момент ($t = 0$) N_0 , то есть $N(0) = N_0$. Через время $t = T$, равный периоду полураспада, число атомов будет вдвое меньше начального: $N(T) = N_0/2$.

После окончания каждого следующего промежутка времени T число атомов уменьшается вдвое, поэтому $N(2T) = N_0/2^2$, $N(3T) = N_0/2^3$ и так далее. Через время $t = nT$ останется $N(nT) = N_0 \cdot 2^{-n}$ атомов. Поскольку $n = t/T$, получаем закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}.$$

График зависимости $N(t)$ приведен на рисунке:



Период полураспада — постоянная величина, которая не может быть изменена такими доступными воздействиями, как охлаждение, нагрев, давление и т. др. Для урана период полураспада равен 4,5 млрд. лет, для радия — 1590 лет, для радона — 3,825 суток, для радия-С — $1,5 \cdot 10^{-4}$ сек.

Закон распада атомов не является законом, который управляет распадом одного атома, потому что нельзя предугадать, когда произойдет этот распад.

Распад атома не зависит от его возраста, то есть атомы «не стареют». Предсказать, когда произойдет распад данного атома, невозможно. Закон радиоактивного распада определяет среднее число атомов, распадающихся за определенный интервал времени. Закон радиоактивного распада является статистическим законом.

3. Связь постоянной полураспада с интенсивностью радиоактивного излучения

С практической точки зрения важной характеристикой процесса радиоактивного распада является скорость, с которой распадается тот или иной радионуклид.

Физическую величину, численно равную количеству распадов, которые происходят в определенном радионуклидном образце в единицу времени, называют активностью радиоактивного образца.

Активность радионуклидного образца обозначают символом A . Единица активности в СИ — беккерель (Бк).

1 Бк — это активность такого образца, в котором за 1 с. происходит 1 акт распада.

Но 1 Бк — это очень маленькая активность, поэтому используют внесистемную единицы активности — кюри (Ки):

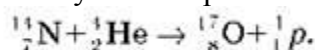
$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк.}$$

Если в этот момент времени в образце содержится некоторое количество N атомов радионуклида, то активность A этого радионуклидного образца можно вычислить по формуле:

$$A = \lambda N.$$

4. Ядерные реакции

1919. Резерфорд впервые осуществил искусственное превращение атомных ядер. При бомбардировке ядер азота α -частицами, которые испускает радий, ядро Азота превращалось в (нестабильное) ядро изотопа Кислорода и выпускался протон:

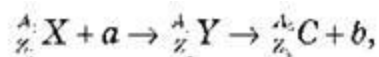


Изменения атомных ядер при взаимодействии их друг с другом или другими частицами называются **ядерными реакциями**.

Ядро представляет собой «густое образование», и когда в него попадает частица, то она не взаимодействует с каким-то одним нуклоном. Проникая в ядро, частица «застревает» в нем, причем энергия частицы передается не одному, а многим нуклонам.

Захват ядром частицы, попавшей в него, приводит к образованию промежуточного, так называемого составного ядра. В этом заключается первый этап ядерной реакции.

Второй этап ядерной реакции — превращения составного ядра происходит независимо от захвата падающей частицы. Оба этапа изображены схеме:



где A_1Z_1X — исходное ядро-мишень; a — налетающая частица; A_2Z_2Y — составное ядро; A_3Z_3C — ядро, что является продуктом ядерной реакции, b — частица, которая вылетает из ядра в результате реакции. Возможно протекание реакции в один этап.

Чтобы могла произойти ядерная реакция, необходимо, чтобы ядро и частица (или два ядра) сблизилась на очень малое расстояние — такое, чтобы между ними начали действовать ядерные силы, характеризуются малым радиусом действия.

Если обе начальные частицы положительно заряжены, то в случае их сближения между ними возникают большие электростатические силы отталкивания, для преодоления которых необходима большая начальная энергия частиц.

Открытие нейтрона в корне изменило представление об условиях протекания ядерных реакций — оказалось, что для этого не обязательно нужны частицы с большими кинетическими энергиями. Поскольку нейтрон не имеет электрический заряд, он не отталкивается от ядра и беспрепятственно проникает в него, вызывая ядерную реакцию.

Во время ядерных реакций обязательно выполняются различные законы сохранения (например, закон сохранения энергии, импульса, заряда, массы и др.).

Все ядерные реакции можно классифицировать:

- по виду взаимодействия:
 - а) под действием заряженных частиц;
 - б) под действием нейтронов.
- по энергетическим выходом:
 - а) с выделением энергии;
 - б) с поглощением энергии.

5. Термоядерная реакция

Ядерная энергия высвобождается не только в ядерных реакциях деления тяжелых ядер, но и в реакциях соединения легких атомных ядер. Так, например, масса покоя ядра Гелия значительно меньше суммы масс покоя двух ядер тяжелого Водорода, на которые можно разделить ядро Гелия.

Это означает, что при слиянии легких ядер масса покоя уменьшается, следовательно, должна выделяться значительная энергия. Но для соединения одноименно заряженных протонов необходимо преодолеть кулоновские силы отталкивания, что возможно при достаточно больших скоростях частиц, которые сталкиваются. Подобного рода реакции слияния легких ядер могут протекать только при очень высоких температурах. Поэтому они называются термоядерными.

Термоядерные реакции — это реакции слияния легких ядер при очень высокой температуры.

Необходимые условия для синтеза ядер Гелия из протонов имеются в недрах звезд. На Земле термоядерная реакция синтеза осуществляется при проведении экспериментальных термоядерных взрывов.

6. Какие частицы следует считать элементарными?

До сих пор мы оперировали в основном четырьмя частицами: электрон, протон, нейтрон и фотон. Но для объяснения экспериментов с облучением нейтронами протонов понадобилось предположение о существовании мезонов. Эту частичку «придумал» японский физик Х. Юкава. Исследования β -распада вынудили Паули «найти» частицу-фантом — нейтрино.

В 1928 году английский физик Поль Дирак, решая задачу о движении электрона со скоростью, приближенной к скорости света, высказал идею о возможности существования в природе античастицы электрона — позитрона.

Элементарные частицы, в точном значении этого термина, — это первичные, далее нераскладные частицы, из которых, по предположению, состоит вся материя.

Как заметил итальянский физик Энрико Ферми, понятие «элементарный» касается скорее уровня наших знаний, чем природы частиц. По мере того как развивалась наука, многие элементарных частиц переходили в разряд неэлементарных.

Элементарные частицы современной физики не удовлетворяют строгому определению элементарности, поскольку большинство из них по современным представлениям являются составными системами. Общее свойство этих систем заключается в том, что они не являются атомами или ядрами (исключение составляет протон). Поэтому иногда их называют субъядерными частицами.

7. Классификация элементарных частиц

Когда количество известных элементарных частиц достигло нескольких сотен, возникла необходимость создать классификацию частиц. Прежде всего, все частицы разделили по массе. По аналогии с Периодической системой химических элементов все элементарные частицы были разбиты на три группы.

В первой группе оказалась только одна частица — фотон с нулевой массой. Во вторую группу вошли относительно легкие частицы, которые были названы лептонами. Третья группа частиц — самых тяжелых — получила название адронов.

Дальнейшие исследования показали, что частицы объединены в группы не только через различия в их массах, но и согласно их способности к фундаментальным взаимодействиям. В электромагнитном взаимодействии участвуют все частицы, имеющие электрический заряд. Носителями электромагнитного взаимодействия являются фотоны.

В слабом взаимодействии участвуют все элементарные частицы, кроме фотонов. К адронам относят частицы, которые способны к сильному взаимодействию. Адронов больше, чем лептонов, но почти все адроны нестабильны. Адроны делятся на мезоны и барионы.

8. Кварки

Согласно теории американских физиков Гелл-Манна и Цвейга, все адроны состоят из кварков, а также антикварков.

В опытах по изучению рассеяния очень быстрых электронов на протонах и нейтронах было выяснено, что большая часть электронов проходит сквозь протоны и нейтроны, не несущие существенных отклонений, а незначительная их часть сильно рассеивается на каких-то центрах.

Этот результат похож на результат опытов Резерфорда по рассеянию α -частиц. Для объяснения таких свойств адронов в 1964 году была разработана модель, получившая название теории кварков.

Кварками ученые назвали три «действительно» элементарные частицы, из которых строятся все адроны. Чтобы объяснить свойства адронов, пришлось предположить существование шести различных кварков, которые обозначают u , d , s , c , b , t .

Все известные барионы можно «сконструировать», объединив три кварка разных цветов, а все известные мезоны — объединив один кварк и один антикварк. Кварковую теорию считают доказанной экспериментально. Все способы получить свободные кварки оказались неудачными. Теория объясняет это тем, что для освобождения кварка необходима огромная энергия. Если бомбардировать адроны все более быстрыми частицами, то энергия будет затрачиваться на рождение новых пар «кварк-антикварк», а освобождение отдельных кварков не будет происходить.

Согласно современным представлениям, именно шесть кварков и шесть лептонов являются наименьшими «кирпичиками» вещества. Как видим, природа имеет достаточно разнообразные «кирпичики». Остается еще много вопросов к природе. Один из них: чем объяснить спектр масс элементарных частиц? Поиск общих закономерностей продолжается...

Закрепление изученного материала по теме «Радиоактивные превращения»

1. Для нейтрального атома бора ${}^{10}_5\text{B}$ определите число нуклонов, протонов, нейтронов и электронов.
2. Полоний ${}^{210}_{84}\text{Po}$ испытывает α -распад. Запишите реакцию этого радиоактивного распада.

3. Ядро атома плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ испытывает 3 α - и 2 β - распада. Какое ядро получилось в результате? Запишите реакции.
4. Для нейтрального атома алюминия ${}_{13}^{27}\text{Al}$ определите число нуклонов, протонов, нейтронов и электронов.
5. Полоний ${}_{84}^{210}\text{Po}$ испытывает β -распад. Запишите реакцию этого радиоактивного распада.
6. Ядро атома плутония ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ испытывает 2 α - и 3 β - распада. Какое ядро получилось в результате? Запишите реакции.
7. Для нейтрального атома меди ${}_{29}^{64}\text{Cu}$ определите число нуклонов, протонов, нейтронов и электронов.
8. Плутоний ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ испытывает β -распад. Запишите реакцию этого радиоактивного распада.
9. Ядро атома полония ${}_{84}^{210}\text{Po}$ испытывает 3 α - и 4 β - распада. Какое ядро получилось в результате? Запишите реакции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее учебное-методическое пособие – это краткий конспект лекций по разделам «Механика», «Молекулярная физика и термодинамика», «Электродинамика», «Основы специальной теории относительности», «Квантовая физика. Физика атома и атомного ядра». Материал пособия разбит на 27 лекций. После каждой темы представлены задания для самоконтроля.

Курс лекций написан в соответствии с федеральным государственным стандартом среднего общего образования по дисциплине «Физика» и учебными программами подготовки квалифицированных рабочих, служащих по профессии 08.01.24 Мастер столярно-плотничных, паркетных и стекольных работ.

Учебно-методическое пособие состоит из пяти разделов.

Раздел 1. Механика

Раздел 2. Молекулярная физика и термодинамика

Раздел 3. Электродинамика

Раздел 4. Основы специальной теории относительности

Раздел 5. Квантовая физика. Физика атома и атомного ядра

Пособие может быть использовано при изучении курса физики студентами специальностей и профессий ТОП-50. Объем и степень глубины излагаемого в пособии материала соответствуют ФГОС СПО по ТОП-50. .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Виртуальная школа Кирилла и Мефодия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fizika.ru>
2. Генденштейн, Л.Э. Физика. Учебник для 10,11 кл. / Л. Э. Генденштейн, Ю. И. Дик. – М.: Просвещение, 2005. – 415 с.
3. Живая Физика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.int-edu.ru>
4. Кабардин, О.Ф. Экспериментальные задания по физике. 9—11 классы: учебное пособие для учащихся общеобразовательных учреждений / О. Ф. Кабардин, В.А. Орлов. – М.: Просвещение, 2001.- 234 с.
5. Кошкин, Н.И. Элементарная физика: Справочник / Н.И. Кошкин, Е. Н. Васильчикова. – М.: Высшая школа, 2003.- 145с.
6. Лабковский, В.Б. 220 задач по физике с решениями: книга для учащихся 10—11 кл. общеобразовательных учреждений / В. Б. Лабковский. – М.: Просвещение, 2006
7. Мякишев, Г. Я. Физика. 10 кл.: учебник / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский. – 21-е изд. – М.: Просвещение, 2014. – 316с.
8. Мякишев, Г. Я. Физика. 11 кл.: учебник / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский. – 21-е изд. – М.: Просвещение, 2014.– 394с
9. Открытая физика. Электронный учебник [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.physics.ru>
10. Рымкевич, А.П. Физика. Задачник. 10-11 кл. – 16-е изд. / А.П. Рымкевич. – М., 2012. – 192 с.
11. Самойленко, П.И. Сборник задач и вопросов по физике: учеб. пособие для СПО. – 9-е изд. / П. И. Самойленко. – М., 2012 – 238 с.
12. Самойленко, П.И. Физика: Учебник для средних специальных учебных заведений / П.И. Самойленко, А. В. Сергеев. – М.: Академия, 2014 – 345 с.
13. Сайт «Физика в анимациях. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.infoline.ru>
14. Трофимова, Т. И. Физика для профессий и специальностей технического и естественно-научного профилей: Решения задач / Т.И. Трофимова, А.В. Фирсов. — М., 2015. – 235с.
15. Трофимова, Т. И. Физика. Справочник / Т.И. Трофимова, А.В. Фирсов. — М., 2010. – 112с.
16. Физика для всех. Сайт С. Ловягина. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://physica-vsem.narod.ru>
17. Фирсов, А. В. Физика для профессий и специальностей технического и естественно-научного профилей: учебник для образовательных учреждений сред. проф. образования / под ред. Т. И. Трофимовой. — М., 2014. – 345 с.