

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ**

**«Владивостокский морской рыбопромышленный колледж»  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования**

**«Дальневосточный государственный технический  
рыбохозяйственный университет»**

**(«ВМРК» ФГБОУ ВО «ДАЛЬРЫБВТУЗ»)**

---

**КУРС ЛЕКЦИЙ**

**ПД.01 Физика**

для специальности

15.02.06

Монтаж и техническая эксплуатация холодильно-компрессорных машин и  
установок (по отраслям)

Владивосток  
2021

ОДОБРЕН

Цикловой комиссией  
естественнонаучных и  
математических дисциплин

Председатель:

 Сухомлинова А.А.


(подпись)

Протокол №1 от 01.09. 2021 г.

Автор:

преподаватель «ВМРК» ФГБОУ ВО «Дальрыбвтуз»

Кан В.А.

  
подпись

Курс лекций составлен в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины ПД.01 Физика, утвержденной зам. начальника колледжа по УВР 01.09.21 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ ЛЕКЦИЙ .....	6
Тема 1.1 Введение. Механическое движение. Относительность механического движения. Система отсчета.....	8
Тема 1.2 Характеристики механического движения: перемещение, скорость, ускорение.....	9
Тема 1.3 Виды движения и их графическое описание. ....	10
Тема 1.4 Равномерное прямолинейное движение (РПД). Характеристики, графики равномерного прямолинейного движения.....	12
Тема 1.5 Сложение скоростей, относительная скорость.....	14
Тема 1.6 Равноускоренное движение (РУД). Характеристики, графики кинематических величин равноускоренного прямолинейного движения. ....	15
Тема 1.7 Движение с постоянным ускорением свободного падения.....	17
Тема 1.8 Равномерное движение точки по окружности. ....	18
Тема 1.9 Взаимодействие тел. Принцип суперпозиции сил. Законы Ньютона. ....	20
Тема 1.10 Силы в природе: упругости, трения, сила тяжести. Закон всемирного тяготения...28	
Тема 1.11 Силы упругости. Деформация и силы упругости. Закон Гука. Сил трения. Роль сил трения. Вес тела.....	31
Тема 1.12 Импульс. Закон сохранения импульса. Определение реактивного движения. Виды реактивного движения. Расчет скорости движения тела при реактивном движении. Развитие ракетной техники. ....	31
Тема 1.13 Механическая работа и мощность силы.....	32
Тема 1.14 Энергия. Кинетическая энергия. ....	33
Тема 1.15 Работа силы тяжести и силы упругости. Сила всемирного тяготения. Консервативные силы. Потенциальная энергия. ....	34
Тема 1.16 Простые механизмы. КПД.....	39
Тема 1.17 Механические колебания и волны. Амплитуда, период, частота колебаний. Длина волны. Звуковые волны. Ультразвук и его использование в технике и медицине.....	42
Тема 2.1 Основы молекулярно-кинетической теории. Масса и размеры молекул.....	48
Тема 2.2 Число Авогадро. Абсолютная температура как мера средней кинетической энергии частиц. ....	51
Тема 2.3 Основы МКТ идеального газа. Объяснение агрегатных состояний вещества на основе атомно-молекулярных представлений. Тепловое движение. Модель идеального газа. ....	52
Тема 2.4 Изопроцессы.....	55
Тема 2.5 Первое начало термодинамики. Первый закон термодинамики.....	57
Тема 2.6 Принцип действия тепловых двигателей. КПД тепловых двигателей.....	60

Тема 3.1 Электрический заряд. Электризация тел. Взаимодействие зарядов. Два вида электрического заряда. ....	62
Тема 3.2 Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона. ....	65
Тема 3.3 Электрическое поле. Материальность электрического поля. Напряженность электрического поля. ....	68
Тема 3.4 Электростатическое поле точечного заряда. Напряженность точечного заряда. ....	71
Тема 3.5 Потенциал точечного заряда. Работа электростатического поля. ....	72
Тема 3.6 Энергия заряженного тела в электрическом поле. Разность потенциалов. Связь между напряженностью и напряжением. ....	75
Тема 3.7 Принцип суперпозиции электрических полей. Напряженность системы зарядов. Потенциал системы зарядов. ....	78
Тема 3.8 Потенциальная энергия системы зарядов. ....	82
Тема 3.9 Однородное электростатическое поле. Напряженность однородного электростатического поля. ....	84
Тема 3.10 Разность потенциалов однородного электростатического поля. ....	85
Тема 3.11 Проводники в электростатическом поле. Диэлектрики в электростатическом поле. Виды диэлектриков. ....	85
Тема 3.12 Энергия заряженного тела в электрическом поле. Разность потенциалов. Связь между напряженностью и напряжением. ....	89
Тема 3.13 Емкость. Единицы емкости. Конденсаторы. Энергия заряженного конденсатора. ....	92
Тема 3.14 Соединения конденсаторов. Энергия поля конденсаторов. Заряженная частица в поле конденсатора. ....	97
Тема 3.15 Постоянный ток. Характеристики электрического тока и электрической цепи. ...	101
Тема 3.16 Закон Ома для участка цепи и его следствия. ....	104
Тема 3.17 Соединение проводников. Расчет электрических цепей. ....	107
Тема 3.18 Работа и мощность постоянного тока. Электродвижущая сила. Закон Ома для полной цепи. ....	110
Тема 3.19 Магнитное поле. Постоянные магниты и магнитное поле тока. Сила Ампера, сила Лоренца. ....	116
Тема 3.20 Индукция магнитного поля. Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции и закон электромагнитной индукции. ....	122
Тема 3.21 Вихревое электрическое поле. Правило Ленца. Заряженные частицы в электрическом и магнитном полях. ....	125
Тема 3.22 Закон электромагнитной индукции. Изменение магнитного потока. ....	131
Тема 3.23 Самоиндукция. Индуктивность. Энергия магнитного поля тока. ....	133
Тема 3.24 Колебания и волны. ....	137

Тема 3.25 Свободные электромагнитные колебания. Колебательный контур. Формула Томсона. Принцип действия электрогенератора. Трансформатор.....	139
Тема 3.26 Электромагнитное поле и электромагнитные волны. Скорость электромагнитных волн.....	150
Тема 4.1 Свет как электромагнитная волна. Интерференция и дифракция света. Поляризация света.....	153
Тема 4.2 Законы отражения и преломления света. Формула тонкой линзы.....	155
Тема 5.1 Световые кванты. Гипотеза Планка о квантах. Фотоэффект. Фотон. Световое давление. Импульс фотона.....	161
Тема 5.2 Физика атома, атомного ядра. Строение атома: планетарная модель атома. Поглощение и испускание света атомом. Квантовая энергия. Модель Бора.....	165
Тема 5.3 Строение атомного ядра. Энергия расщепления. Ядерные силы, ядерные реакции.....	168
Тема 5.4 Энергия связи. Дефект масс. Ядерный реактор. Термоядерные реакции.....	171
ЛИТЕРАТУРА.....	176

## ПЕРЕЧЕНЬ ЛЕКЦИЙ

№ п/п	Наименование занятий	Кол-во часов
1	Тема 1.1 Введение. Механическое движение. Относительность механического движения. Система отсчета.	2
2	Тема 1.2 Характеристики механического движения: перемещение, скорость, ускорение.	2
3	Тема 1.3 Виды движения и их графическое описание.	2
4	Тема 1.4 Равномерное прямолинейное движение (РПД). Характеристики, графики равномерного прямолинейного движения.	2
5	Тема 1.5 Сложение скоростей, относительная скорость.	2
6	Тема 1.6 Равноускоренное движение (РУД). Характеристики, графики кинематических величин равноускоренного прямолинейного движения.	2
7	Тема 1.7 Движение с постоянным ускорением свободного падения.	2
8	Тема 1.8 Равномерное движение точки по окружности.	2
9	Тема 1.9 Взаимодействие тел. Принцип суперпозиции сил. Законы Ньютона.	2
10	Тема 1.10 Силы в природе: упругости, трения, сила тяжести. Закон всемирного тяготения.	2
11	Тема 1.11 Силы упругости. Деформация и силы упругости. Закон Гука. Сил трения. Роль сил трения. Вес тела.	2
12	Тема 1.12 Импульс. Закон сохранения импульса. Определение реактивного движения. Виды реактивного движения. Расчет скорости движения тела при реактивном движении. Развитие ракетной техники.	2
13	Тема 1.13 Механическая работа и мощность силы.	2
14	Тема 1.14 Энергия. Кинетическая энергия.	2
15	Тема 1.15 Работа силы тяжести и силы упругости. Сила всемирного тяготения. Консервативные силы. Потенциальная энергия.	2
16	Тема 1.16 Простые механизмы. КПД.	2
17	Тема 1.17 Механические колебания и волны. Амплитуда, период, частота колебаний. Длина волны. Звуковые волны. Ультразвук и его использование в технике и медицине.	2
18	Тема 2.1 Основы молекулярно-кинетической теории. Масса и размеры молекул.	2
19	Тема 2.2 Число Авогадро. Абсолютная температура как мера средней кинетической энергии частиц.	2
20	Тема 2.3 Основы МКТ идеального газа. Объяснение агрегатных состояний вещества на основе атомно-молекулярных представлений. Тепловое движение. Модель идеального газа.	2
21	Тема 2.4 Изопроцессы.	2
22	Тема 2.5 Первое начало термодинамики. Первый закон термодинамики.	2
23	Тема 2.6 Принцип действия тепловых двигателей. КПД тепловых двигателей.	2
24	Тема 3.1 Электрический заряд. Электризация тел. Взаимодействие зарядов. Два вида электрического заряда.	2
25	Тема 3.2 Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона.	2
26	Тема 3.3 Электрическое поле. Материальность электрического поля. Напряженность электрического поля.	2
27	Тема 3.4 Электростатическое поле точечного заряда. Напряженность точечного заряда.	2

28	Тема 3.5 Потенциал точечного заряда. Работа электростатического поля.	2
29	Тема 3.6 Энергия заряженного тела в электрическом поле. Разность потенциалов. Связь между напряженностью и напряжением.	2
30	Тема 3.7 Принцип суперпозиции электрических полей. Напряженность системы зарядов. Потенциал системы зарядов.	2
31	Тема 3.8 Потенциальная энергия системы зарядов.	2
32	Тема 3.9 Однородное электростатическое поле. Напряженность однородного электростатического поля.	2
33	Тема 3.10 Разность потенциалов однородного электростатического поля.	2
34	Тема 3.11 Проводники в электростатическом поле. Диэлектрики в электростатическом поле. Виды диэлектриков.	2
35	Тема 3.12 Энергия заряженного тела в электрическом поле. Разность потенциалов. Связь между напряженностью и напряжением.	2
36	Тема 3.13 Электроемкость. Единицы электроемкости. Конденсаторы. Энергия заряженного конденсатора.	2
37	Тема 3.14 Соединения конденсаторов. Энергия поля конденсаторов. Заряженная частица в поле конденсатора.	2
38	Тема 3.15 Постоянный ток. Характеристики электрического тока и электрической цепи.	2
39	Тема 3.16 Закон Ома для участка цепи и его следствия.	2
40	Тема 3.17 Соединение проводников. Расчет электрических цепей.	2
41	Тема 3.18 Работа и мощность постоянного тока. Электродвижущая сила. Закон Ома для полной цепи.	2
42	Тема 3.19 Магнитное поле. Постоянные магниты и магнитное поле тока. Сила Ампера, сила Лоренца.	2
43	Тема 3.20 Индукция магнитного поля. Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции и закон электромагнитной индукции.	2
44	Тема 3.21 Вихревое электрическое поле. Правило Ленца. Заряженные частицы в электрическом и магнитном полях.	2
45	Тема 3.22 Закон электромагнитной индукции. Изменение магнитного потока.	2
46	Тема 3.23 Самоиндукция. Индуктивность. Энергия магнитного поля тока.	2
47	Тема 3.24 Колебания и волны.	2
48	Тема 3.25 Свободные электромагнитные колебания. Колебательный контур. Формула Томсона. Принцип действия электрогенератора. Трансформатор.	2
49	Тема 3.26 Электромагнитное поле и электромагнитные волны. Скорость электромагнитных волн.	2
50	Тема 4.1 Свет как электромагнитная волна. Интерференция и дифракция света. Поляризация света.	2
51	Тема 4.2 Законы отражения и преломления света. Формула тонкой линзы.	2
52	Тема 5.1 Световые кванты. Гипотеза Планка о квантах. Фотоэффект. Фотон. Световое давление. Импульс фотона.	2
53	Тема 5.2 Физика атома, атомного ядра. Строение атома: планетарная модель атома. Поглощение и испускание света атомом. Квантовая энергия. Модель Бора.	2
54	Тема 5.3 Строение атомного ядра. Энергия расщепления. Ядерные силы, ядерные реакции.	2
55	Тема 5.4 Энергия связи. Дефект масс. Ядерный реактор. Термоядерные реакции.	2
	Итого:	110

## **Тема 1.1 Введение. Механическое движение. Относительность механического движения. Система отсчета.**

**Цель: Ввести понятие о макроскопических телах; дать определение механического движения; познакомить учащихся с теоретическим и экспериментальными методами; ввести понятие системы отсчёта; сформировать представление о механике как системе знаний, которая имеет границы применимости.**

Введение учащихся в мир механических явлений и систему знаний, которая этот мир описывает. С самого начала такое разделение объектов изучения и моделей носит принципиальный характер.

Механическое движение – как физическое явление. Определение механического движения. Относительность механического движения. Система отсчета.

На основе повторения изученного материала при совместной деятельности преподаватель организует введение учащихся в мир механических явлений и систему знаний, которая этот мир описывает.

С самого начала такое разделение объектов изучения и моделей носит принципиальный характер.

1. В настоящее время физика – это развитая система знаний о наиболее простых и фундаментальных явлениях материального мира. Прежде всего эта система знаний представлена физическими теориями. Их много, но наиболее общих и принципиальных четыре: механика, молекулярная физика, электродинамика, квантовая физика.

2. В окружающем мире человек выделяет.

такие характеристики свойств объектов, как физические величины, с помощью эксперимента измеряются, получают количественное выражение. Но они могут быть рассчитаны и теоретически на основе законов, формул связи. (Приводят примеры.)



3. Механика изучает движение макроскопических тел - материальных объектов от атомов до звёзд. Но механика изучает не любое движение макроскопических тел, а только их перемещение в пространстве с течением времени.

4. Ввести понятие о системе отсчёта как модели свойств пространства и времени, как средство описания движения. Многовековой опыт людей позволяет выделить основные свойства пространства нашего мира: непрерывность, одинаковость свойств по одному направлению и разным направлениям, трёхмерность. Время течёт непрерывно, однонаправленно, одинаково в разных точках пространства в механике.

### **Тема 1.2 Характеристики механического движения: перемещение, скорость, ускорение.**

**Цель: Ввести представление о модели макроскопического тела; формулировать основную задачу кинематики (механики); дать классификацию механических движений по траектории и скорости; сформировать умения выделять механическое движение и описывать его в системе отсчёта.**

Существует достаточно много характеристик движения. Но для простой классификации движений нам надо вспомнить две характеристики — траекторию и скорость. Траектория - это линия, по которой движется материальная точка. Выделяют движения:

- а) прямолинейное и криволинейное;
- б) равномерное и неравномерное.

В беседе рассматривают вопросы: какое из указанных движений самое простое? Какое движение называют неравномерным? Как движется шарик по жёлобу? Как движется мел по доске? Привести примеры неравномерного движения.

Решение простых задачи ([1], задачи из раздела 1.1). Доказать построением, что описание положения материальной точки зависит от выбора системы отсчёта.

### Тема 1.3 Виды движения и их графическое описание.

**Цель: Повторить свойства и определить характеристики равномерного движения материальной точки; сформировать умения выделять такой вид движения и характеризовать его.**

Введение понятия скорости.

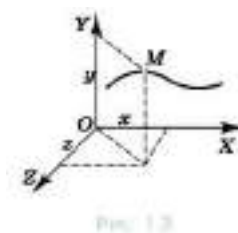
Получение уравнения движения материальной точки в векторной ( $\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}t$ ) и скалярной ( $x = x_0 + v_x t$ ) формах, причём при прямолинейном движении систему отсчёта выбираем из одной оси, а значит, получаем одно уравнение движения.

Вспомните из курса физики основной школы физические величины, которыми можно описать механическое движение тела.

Если тело можно считать точкой, то для описания его движения нужно научиться рассчитывать положение точки в любой момент времени относительно выбранного тела отсчёта.

Существует несколько способов описания, или, что одно и то же, задания движения точки. Рассмотрим два из них, которые наиболее часто применяются.

Координатный способ. Будем задавать положение точки с помощью координат (рис. 1.3). Если точка движется, то её координаты изменяются с течением времени. Так как координаты точки зависят от времени, то можно сказать, что они являются функциями времени.



Математически это принято записывать в виде:

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1.1)$$

Если уравнения движения известны, то для каждого момента времени мы сможем рассчитать координаты точки, а, следовательно, и её положение относительно выбранного тела отсчёта. Вид уравнений (1.1) для каждого конкретного движения будет вполне определённым.

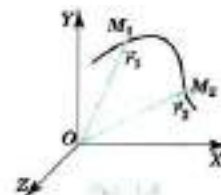
Основной задачей кинематики является определение уравнений движения тел. Количество выбираемых для описания движения координат зависит от условий задачи. Если движение точки происходит вдоль прямой, то достаточно одной координаты и, следовательно, одного уравнения, например,  $x(t)$ . Если движение происходит на плоскости, то его можно описать двумя уравнениями —  $x(t)$  и  $y(t)$ . Уравнения (1.1) описывают движение точки в пространстве.

Векторный способ. Положение точки можно задать, и с помощью радиус-вектора. Радиус-вектор — это направленный отрезок, проведённый из начала координат в данную точку.

При движении материальной точки радиус-вектор, определяющий её положение, с течением времени изменяется (поворачивается и меняет длину; рис. 1.4), т. е. является функцией времени:

$$\vec{r} = \vec{r}(t) \quad (1.2)$$

На рисунке 1.4 радиус-вектор  $\vec{r}$  определяет положение точки в момент времени  $t_1$ , а радиус-вектор  $\vec{r}_2$  — в момент времени  $t_2$ . Если оно известно, то мы можем для любого момента времени рассчитать радиус-вектор точки, а значит, определить её положение. Таким образом, задание трёх скалярных уравнений (1.1) равносильно заданию одного векторного уравнения (1.2).



Итак, мы знаем, что положение точки в пространстве определяется её координатами или её радиус-вектором.

Модуль и направление любого вектора находят по его проекциям на оси координат. Чтобы понять, как это делается, вначале необходимо ответить на вопрос: что понимают под проекцией вектора на ось?

Изобразим какую-либо ось (рис. 1.5), например, ось ОХ. Опустим из начала А и конца В вектора  $\vec{a}$  перпендикуляры на ось ОХ. Точки А<sub>1</sub> и В<sub>1</sub> есть проекции соответственно начала и конца вектора  $\vec{a}$  на эту ось.

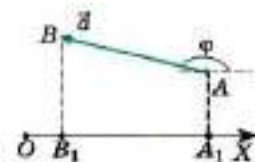


Рис. 1.5

Проекцию вектора мы будем обозначать той же буквой, что и вектор, но, во-первых, без стрелки над ней и, во-вторых, с индексом внизу, указывающим, на какую ось проецируется вектор. Так,  $a_x$  и  $a_y$  — проекции вектора  $\vec{a}$  на оси координат ОХ и ОУ.

Согласно определению проекции вектора, на ось можно записать:  $a_x = \pm|A_1B_1|$ . Проекция вектора на ось представляет собой алгебраическую величину. Она выражается в тех же единицах, что и модуль вектора.

Условимся считать проекцию вектора на ось положительной, если от проекции начала вектора к проекции его конца надо идти в положительном направлении оси проекций (рис. 1.6). В противном случае (см. рис. 1.5) она считается отрицательной.

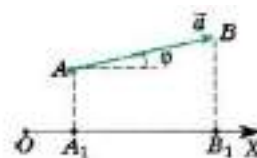


Рис. 1.6

Из рисунков 1.5 и 1.6 нетрудно увидеть, что проекция вектора на ось будет положительной, когда вектор составляет острый угол  $\varphi$  с направлением оси проекций, и отрицательной, когда вектор составляет с направлением оси проекции тупой угол  $\varphi$ .

#### Тема 1.4 Равномерное прямолинейное движение (РПД).

##### Характеристики, графики равномерного прямолинейного движения.

**Цель:** Познакомиться с понятием РПД, его характеристиками и графиками.

Один и тот же путь тело может пройти за разные промежутки времени.

Какая физическая величина характеризует быстроту движений тела?

Как, зная эту величину, определить положение тела?

На уроках физики вы довольно подробно изучали равномерное движение.

Равномерное движение может быть, как криволинейным, так и прямолинейным. Равномерное прямолинейное движение — самый простой вид движения. С него мы и начнём изучение движения в кинематике.

Скорость. Важной величиной, характеризующей движение точки, является её скорость. Некоторое представление о скорости каждый из нас имел и до начала изучения физики.

Черепаша перемещается с малой скоростью, человек движется с большей скоростью, автомобиль движется быстрее человека, а самолёт — ещё быстрее. Самой большой скорости относительно Земли человек достигает с помощью космических ракет.

В механике рассматривают скорость как векторную величину. А это означает, что скорость можно считать известной (заданной) лишь в том случае, если известны её модуль и направление.

Дадим определение скорости равномерного прямолинейного движения точки. Пусть точка, двигаясь равномерно и прямолинейно в течение промежутка времени  $\Delta t$ , переходит из положения  $M_1$  в положение  $M_2$  (рис. 1.9), совершив при этом перемещение  $\Delta\vec{r}$ .

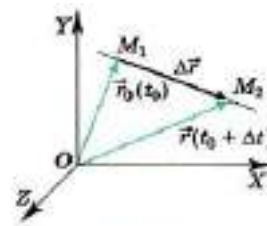


Рис. 1.9

Поделим перемещение  $\Delta\vec{r}$  на промежуток времени  $\Delta t$ , в течение которого это перемещение произошло. В результате получим вектор. (При делении вектора на число получаем вектор.) Этот вектор называют скоростью равномерного прямолинейного движения точки и обозначают буквой  $\vec{v}$ . Следовательно, можно записать:

$$\vec{v} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} \quad (1.3)$$

Так как промежуток времени  $\Delta t$  — величина положительная, то скорость направлена так же, как и перемещение  $\Delta\vec{r}$ . Выясним смысл модуля скорости

$$v = \frac{|\Delta\vec{r}|}{\Delta t}$$

Модуль перемещения  $|\Delta\vec{r}|$  есть расстояние, пройденное точкой за время  $\Delta t$ . А так как точка движется равномерно, то модуль отношения, а значит, и модуль скорости  $v$  есть величина, численно равная пути, пройденному точкой за единицу времени.

Уравнение равномерного прямолинейного движения точки. Пусть радиус-вектор  $\vec{r}_0$  задаёт положение точки в начальный момент времени  $t_0$ , а радиус-вектор  $\vec{r}$  — в момент времени  $t$ . Тогда  $\Delta t = t - t_0$ ,  $\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$ , и выражение для скорости принимает вид  $\vec{v} = \frac{\vec{r} - \vec{r}_0}{t - t_0}$ .

Если начальный момент времени  $t_0$  принять равным нулю, то  $\vec{v} = \frac{\vec{r} - \vec{r}_0}{t}$ .

Отсюда

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}t. \quad (1.4)$$

Последнее уравнение и есть уравнение равномерного прямолинейного движения точки, записанное в векторной форме. Оно позволяет найти радиус-вектор точки при этом движении в любой момент времени, если известны скорость точки и радиус-вектор, задающий её положение в начальный момент времени.

Вместо векторного уравнения (1.4) можно записать три эквивалентных ему уравнения в проекциях на оси координат.

Радиус-вектор  $\vec{r}$  является суммой двух векторов: радиус-вектора  $\vec{r}_0$  и вектора  $\vec{v}t$ . Следовательно, проекции радиус-вектора  $\vec{r}$  на оси координат должны быть равны сумме проекций этих двух векторов на те же оси. Рассмотрим случай, когда направления  $\vec{r}_0$  и  $\vec{v}$  совпадают.

### Тема 1.5 Сложение скоростей, относительная скорость.

**Цель:** Поставить задачу описания движения материальной точки в разных системах отсчёта; раскрыть относительность траектории, перемещения, скорости; ввести закон сложения скоростей; сформировать

**умение описывать движение материальной точки в разных системах отсчёта.**

В начале занятия ставятся вопросы: изменится ли движение, если мы будем описывать его в разных системах отсчёта? В любой ли системе отсчёта удобно описывать движение? При решении задач бывает необходимо перейти от описания движения в одной системе отсчёта к описанию движения в другой системе отсчёта. Как это сделать — вот учебная проблема занятия.

Изучение нового материала может быть представлено как решение задачи.

- Ставится задача описания движения тела в двух системах отсчёта: одна система связана с доской, другая — с движущейся прямолинейно и равномерно линейкой. Преподаватель с помощью учащегося демонстрирует движение тела прямолинейно вверх по оси  $OY$ .

- Последовательно в беседе решают задачи: как изменяются координаты тела в разных системах отсчёта? Одинакова ли траектория движения в разных системах отсчёта? Как определить перемещение?

На доске и в тетрадях отмечают положение тела в начале и конце движения, изображают векторы перемещения тела, перемещения подвижной системы отсчёта.

### **Тема 1.6 Равноускоренное движение (РУД). Характеристики, графики кинематических величин равноускоренного прямолинейного движения.**

**Цель: Продолжить изучение мгновенной скорости неравномерного движения и ускорения; сформировать умение описывать движение материальной точки с постоянным ускорением.**

Приведём последовательность рассмотрения материала.

1. Определение и повторение неравномерного движения.

Демонстрация опыта: движение шарика по жёлобу, падение мячика. Основное свойство прямолинейного неравномерного движения — изменение скорости.

Описание мгновенной скорости как скорости в данный момент времени. Как определить модуль и направление мгновенной скорости? На первую часть учебной проблемы дают теоретический ответ с помощью учебника, во второй части опираются на опыт.

2. Определение ускорения и равноускоренного движения материальной точки.

3. Скорость и уравнение движения материальной точки при равноускоренном движении. Из определения ускорения  $a$  получают выражение для скорости, потом находят проекцию ускорения на одну ось.

4. На доске изображены графики ускорения, скорости, координаты при прямолинейном равноускоренном движении материальной точки (рис. 5). Они кратко комментируются преподавателем.

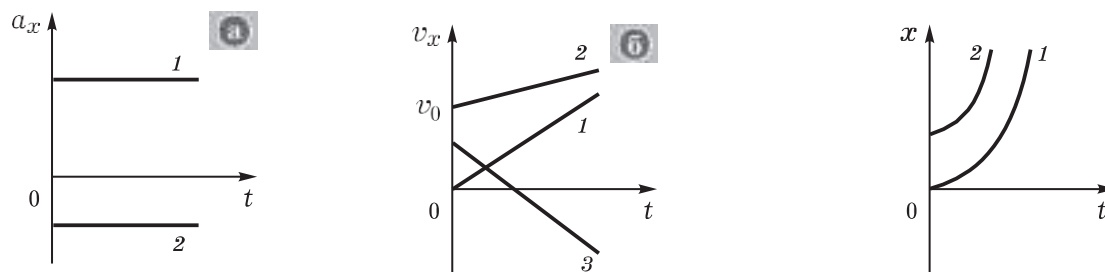


Рис. 5

Вопросы для подведения итогов: какое движение мы изучали? Просто ли выделить прямолинейное равноускоренное движение тела в природе? Приведите пример такого движения. Что характеризует ускорение? Как для равноускоренного движения рассчитывают скорость, координаты точки? Можно ли с помощью уравнения движения определить ускорение, если известны координаты движения точки, начальная скорость и время движения?



## **Тема 1.7 Движение с постоянным ускорением свободного падения.**

**Цель: Изучить характеристики свободного падения тела как частного случая ускоренного движения; продолжить формирование умений выделять и описывать простейшие механические явления.**

На Земле одним из распространённых видов механического движения является свободное падение тела. Что это за движение и как его описывать - учебные проблемы лекции.

Люди давно заметили, что все тела падают на Землю. Выделим и охарактеризуем подобное движение.

Демонстрация опыта: падение пластилинового шарика и ватки. Вопросы для организации беседы: каково начальное состояние тел?

(Ответ: одинаковое по высоте, с нулевой начальной скоростью.)  
Одинаково ли падают тела? (Ответ: нет - движение ускоренное, но ускорения разные).

Перед учёными встал вопрос: от чего это зависит? Опыт с падением тел провели в безвоздушном пространстве. Обнаружилось, что в безвоздушном пространстве разные тела падают с одинаковым ускорением. Почему?

(Ответ. Не мешает воздух.) При определении явления необходимо отвлекаться от воздуха.

Найти подходящую модель оказалось сравнительно просто. Это можно сделать, заменив тело моделью — материальной точкой. Так как у неё нет размеров, то воздух на движение такого объекта влияния не оказывает.

Движение материальной точки под действием притяжения Земли получило название свободного падения. (Заметим, что это - динамическое определение явления.) Можно ли наблюдать в условиях Земли свободное падение тел? (Ответ. Нет, нельзя. Но многие случаи падения тел хорошо описываются законами свободного падения.)

Каковы закономерности свободного падения — следующая учебная проблема урока. Она решается при рассмотрении конкретных задач.

Так как свободное падение -это движение материальной точки с ускорением  $\vec{g}$ , то для описания этого движения подходят соответствующие формулы кинематики. Применим их для трёх случаев свободного падения:

- а) движение с начальной скоростью, направленной по вертикали;
- б) движение с начальной скоростью, направленной по горизонтали;
- в) движение с начальной скоростью, направленной под углом к горизонту.

У доски сначала решают экспериментальную задачу по определению времени падения шарика со стола, затем коллективно рассматривают наиболее сложный вариант свободного падения.

Отработка изученного материала продолжается при решении задач в ходе самостоятельной работы, в результате которой несколько работ оценивается.

На высоте 20 м от поверхности земли вертикально вверх бросили тело со скоростью 10 м/с. С какой скоростью оно упадёт на землю?

Мальчик бросил горизонтально мяч из окна дома с высоты 20 м. С какой скоростью был брошен мяч, если он упал на расстоянии 6 м от дома?

### Тема 1.8 Равномерное движение точки по окружности.

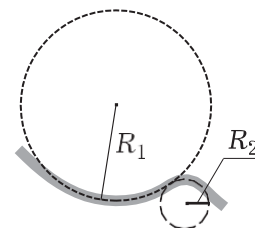
**Цель:** Изучить основные характеристики криволинейного движения на примере движения по окружности - траекторию, перемещение, скорость и центростремительное ускорение, период; сформировать умение решать задачи.

С целью формирования умений у доски объясняют решение одной из домашних задач. Параллельно решают новую задачу у.

С какой высоты горизонтально со скоростью 10 м/с было брошено тело, если дальность полёта составила 10 м?

Приведём развёрнутый план изучения нового материала.

В природе, очевидно, криволинейное движение тел более распространено, чем прямолинейное. Давайте приведём



примеры. Докажем, что криволинейное движение сложнее прямолинейного. Но сначала вновь выберем модель тела — материальную точку. Во-первых, при криволинейном движении материальной точки меняется не одна координата, во-вторых, скорость всё время меняет направление, а значит, движение всегда ускоренное. При изучении криволинейного движения движение на каждом участке можно представить движением по дуге окружности.

Поэтому обратимся к описанию движения материальной точки по окружности.

Рассмотрим важный, но частный случай криволинейного движения — равномерное вращение материальной точки по окружности.

Динамика изучает причины ускоренного движения тел — действия на них других тел, материальных объектов. Самым общим законом, который описывает результат действия одного тела на другое, является второй закон Ньютона. Он устанавливает связь между следующими характеристиками: силой, приложенной к телу, массой этого тела и его ускорением. Таким образом, появляется возможность по известным массе и силе определить ускорение, а затем и другие кинематические характеристики движения. При изучении законов Ньютона необходимо помнить, что они применимы для описания движения материальной точки в инерциальной системе отсчёта вне зависимости от природы действующей силы.

В целом при изучении динамики советуем ориентироваться на формирование следующих умений:

- выделять физические явления (объекты, их движения) и характеризовать их физическими величинами (массой, силой и др.);
- применять законы и принципы динамики для описания типичных механических движений (например, законы взаимодействия тел);
- планировать и проводить простейшие экспериментальные исследования (зависимости: силы трения от...; силы упругости от...; дальности

полёта от...), представлять (в виде графиков, таблиц, расчётов) и интерпретировать их результаты;

- различать методы научного познания (наблюдение, измерение, построение гипотез, моделирование, получение следствий) и применять их при описании механических явлений;

- определять характер знания (факт, гипотеза, закон, принцип, модель, технический объект и др.);

- применять полученные знания для объяснения окружающих явлений в природе и технике, оценивать границы применимости знаний (законов Ньютона, закона Гука, модели тела — материальной точки и др.);

- составлять простейшие задачи по образцу.

### **Тема 1.9 Взаимодействие тел. Принцип суперпозиции сил. Законы Ньютона.**

**Цель:** Раскрыть содержание принципа причинности; углубить понятие материальной точки; ввести понятия о взаимодействии тел и свободном теле; раскрыть суть инерциального движения как идеального движения; сформировать умения выделять взаимодействия и действия тел, качественно характеризовать их. Сформировать представление об инертности как свойстве тел; сформировать понятие о массе как о физической величине; раскрыть зависимость результата взаимодействия тел от их инертности. Определить связь между силой, действующей на тело, массой тела и его ускорением — ввести основной закон динамики; продолжить формирование умения описывать понятиями и законами наблюдаемые явления; раскрыть значение второго закона Ньютона, показать границы его применимости.

1. В динамике изучают причины механического движения тел, т.е. вскрывают природу механического движения, формулируют принцип причинности и на этой основе определяют характеристики движения.

Основоположником динамики является гениальный физик Исаак Ньютон. Он жил в XVII в. в Англии. Англия того времени из аграрной страны превращалась в индустриальную. Быстрый рост промышленности требовал новых технических изобретений. Но работа технических устройств нуждалась в научном обосновании. Так практика стимулировала развитие физики. Ньютон стал первым среди учёных того времени.

При каких условиях происходит ускоренное движение тел? Многочисленные наблюдения и опыты позволили сделать вывод: тело движется ускоренно, если на него действует другое тело или тела. В выводе учёных можно убедиться самому. Поставим простые опыты:

- а) мяч свободно падает на стол под действием Земли;
- б) карандаш начинает движение, т.е. изменяет свою скорость, под действием руки;
- в) магнит изменяет прямолинейное движение стального шарика;
- г) движение шайбы изменяется под действием клюшки. Кроме того, опыты убеждают: если первое тело действует на второе, то и второе действует на первое. Односторонних действий нет. Пронаблюдаем столкновение двух бильярдных шаров, отталкивание тележек с помощью пружины.

Вопросы для обсуждения: на основе чего можно доказать, что тела действуют друг на друга? К чему приводит действие одного тела на другое? Когда действие начинается (заканчивается)?

Выводы:

- а) явление взаимодействия тел — самое распространённое в природе; в природе нет односторонних действий;
- б) во взаимодействии всегда участвуют два (или более) тела, взаимодействие тел выражается в изменении скоростей их движений. Последний вывод уточняется с помощью опыта: воздушный шарик подвешен у стенки, действуем на него палочкой.

2. Масса — характеристика инертности тела.

Материальные, причинно-следственные связи при компенсации действий не исчезают.) Все ли системы отсчёта в равной степени удобны для использования? Докажите, что система отсчёта, связанная с вращающимся диском, не очень удобна для описания движения.

Зависят ли ускорения тел при взаимодействии от свойств самих тел — основная учебная проблема урока.

Преподаватель демонстрирует опыт по взаимодействию тележек.

Вопросы: как определить массу тела?

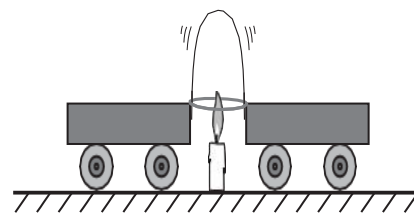
(Ответ. Надо её измерить, т. е. сравнить массу данного тела с эталонной массой). Эталон массы, т. е. тело, массу которого принимают за единицу, специально создают.) Как сравнить массу тела с эталонной массой? Первый способ — прямое взаимодействие тела и эталонного тела  $\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_1}{a_2}$ .

Вопросы для обсуждения:

изменяется ли состояние движения тележек (состояние покоя) при их взаимодействии? Куда направлено ускорение? Как это доказать? (В тетради выполняется рисунок.)

Одинаково ли изменяются скорости тележек при взаимодействии?

Вывод: при взаимодействии разные тела по-разному изменяют скорость: одни — в большей степени, другие — в меньшей; свойство тел по-разному изменять скорость при взаимодействии получило название инертности.



Фронтально повторяют вопросы: в чём выражается взаимодействие Земли и Луны? Что нужно знать для теоретического расчёта массы тела? Как экспериментально определить массу тела? Какое свойство тел характеризует масса?

Учебную проблему занятия формулируют при обсуждении вопросов: от чего зависит ускорение взаимодействующих тел? Зависит ли ускорение тела от силы, приложенной к нему? Умеем ли мы сравнивать действия одного тела на другое? Как охарактеризовать действие?

Для характеристики действия одного тела на другое вводят физическую величину — силу. Сила — векторная величина. Вектор силы характеризуется точкой приложения, направлением, модулем. Правило определения числа сил: есть действие, есть сила. Нередко в книгах и устной речи понятия «действие» и «сила» отождествляются. Ничего страшного в этом нет, но следует помнить: действие — реально существующее физическое явление, а сила — средство его описания.

Как и любую другую физическую величину, силу можно измерить, т. е. сравнить с эталонной силой. В качестве эталонной силы выбрана такая сила, которая за время 1 с изменяет скорость тела массой 1 кг на 1 м/с. Единицей силы является ньютон (1 Н). На практике силу измеряют динамометром (демонстрируется). Растянутая пружина оказывает определённое действие на тело. Силу этого действия можно принять за эталонную силу и значение силы определять по значению удлинения пружины.

2. Чаще всего на тело одновременно оказывается несколько действий. Каждое действие характеризуется силой. Можно ли все действия описать одной силой? Как определить эту силу, т. е. как складывать силы?

Во-первых, векторные величины складываются по другим правилам, нежели скалярные. Во-вторых, физический смысл имеет сложение сил, приложенных к одному телу. Вспомним простейшие случаи сложения сил — силы действуют в одном направлении или противоположных. Преподаватель и учащиеся подвешивают сначала один груз, а затем дополнительный. Обсуждают вопросы: сколько сил действует на крючок динамометра? Как они направлены? Можно ли заменить действие двух грузов действием одного груза? Как это практически сделать? (Преподаватель подвешивает гирю массой 1 кг.) В итоге преподаватель даёт определение: силу, которая оказывает на тело такое же действие, как и несколько одновременно приложенных сил, называют равнодействующей этих сил. (Подчеркнём, что сложение и

разложение сил в значительной мере математическая операция и полученные силы не описывают реальных действий.)

Как определить модуль и направление равнодействующей силы, если силы направлены противоположно? При каком условии равнодействующая двух сил равна нулю? Как будет изменяться равнодействующая сила при увеличении силы одной из сил? Как сложить две силы, действующие под углом друг к другу, — следующая учебная проблема урока. Урок начинается с краткого фронтального повторения по вопросам: какое явление называют инерциальным движением? В чём заключается основное свойство окружающих нас тел?

(Ответ. Во взаимодействии.)

Почему при изучении движения тела последнее моделируют материальной точкой? Что называют системой отсчёта?

(Ответ. Средство описания движения, состоящее из системы координат, тела отсчёта, часов.)

Для чего необходимы системы отсчёта?

(Ответ. Для описания движения тел: определения координат, траектории и т.п.)

Далее по указаниям учителя организуется выполнение простых экспериментальных заданий, для которых используется следующее оборудование: листок бумаги, ручка.

Задание 1. Расположите ручку перпендикулярно поверхности листка. Вопросы: изменяется ли состояние конца ручки относительно СО, связанной со столом? Изменяется ли состояние движения конца ручки в СО, связанной с листком бумаги, при движении последней? Как охарактеризовать эти состояния? Задание 2. Как изменяется состояние движения конца ручки в выбранных СО, если лист бумаги двигать прямолинейно и равномерно? Как доказать, что траектория движения тела зависит от того, в какой СО



рассматривается движение? Как это экспериментально показать? В каком случае траектория движения конца ручки — простая линия?

(Ответ. В СО, в которой тело покоится.) В какой СО удобнее описывать движение тела?

Изучение нового материала начинается с постановки учебной проблемы: в любой ли СО свободное тело находится в состоянии покоя или прямолинейного равномерного движения.

Вначале обсуждают вопрос: зависит ли состояние покоя тела от того, в какой СО оно рассматривается?

Организуется беседа по вопросам: как теоретически и экспериментально решить эту научную проблему? Одинаково ли, например, движение гири относительно СО, связанной со столом, и СО, связанной с бегущим человеком? Есть ли СО, относительно которых тело движется прямолинейно и равномерно? Каковы примеры таких СО? Чем отличается движение тела в этих СО? (При необходимости повторяются вопросы: что такое свободное тело? В каком случае тело находится в покое?)

Преподаватель делает обобщение: существуют такие системы отсчёта, относительно которых тело покоится или движется прямолинейно и равномерно, если на него не действуют другие тела или их действия компенсируются. Такие системы отсчёта получили название инерциальных.

Каковы же основные черты инерциальной системы отсчёта (ИСО)? Во-первых, движение свободного тела (или тела, действия на которое скомпенсированы) в такой системе отсчёта самое простое — покой или прямолинейное равномерное движение. В зависимости от ИСО модуль и направление скорости тела разные. Во-вторых, в ИСО изменение скорости движения тела происходит в результате действия окружающих тел. В других системах отсчёта — неинерциальных — ускорение тела зависит и от свойств самой системы отсчёта. В-третьих, в ИСО при одинаковых начальных условиях тела движутся одинаково. Последнее иллюстрируется мысленным опытом: мяч

из руки падает совершенно одинаково в классной комнате и вагоне, движущемся прямолинейно и равномерно. Гениальный итальянский физик Г. Галилей писал: «Камень всегда упадёт в одно и то же место корабля, неподвижен он или движется с какой угодно скоростью...» Утверждение о том, что механические явления при одинаковых начальных условиях протекают одинаково в ИСО, получило название принципа относительности Галилея.

3. В чём состоит значение принципа относительности? Как экспериментально его подтвердить?

Можно выбрать бесконечное множество разных инерциальных систем отсчёта и в любой из них изучать (описывать) механические явления. Отсюда весьма важный вопрос: одинаково ли будет описание явлений в разных ИСО, т. е. одинаковы ли будут законы? Принцип относительности отвечает утвердительно. Можно смело применять законы механики в любой ИСО! Но удобнее всё же пользоваться такой ИСО, в которой начальные координаты и скорости тела самые приемлемые для решения задачи.

Организуется выполнение простых фронтальных экспериментальных заданий с использованием следующего оборудования: два тела и два листка бумаги с изображёнными на них системами координат.

Задания:

а) установите тела в системах отсчёта так, чтобы их координаты были одинаковы;

б) приведите систему отсчёта 1 в состояние прямолинейного равномерного движения относительно другой системы отсчёта;

в) сравните координаты, скорости тел в «своих» системах отсчёта;

г) сравните координаты и скорости тела А в двух системах отсчёта, сделайте выводы.

Вопросы для обсуждения: являются ли системы отсчёта 1 и 2 инерциальными? Как это можно доказать? Одинаковы ли начальные координаты и скорости тел А и Б? Как движутся тела в «своих» системах

отсчёта? Одинаковы ли координаты (скорости, перемещения, траектории) тела А в системах отсчёта 1 и 2?

Вывод формулирует преподаватель: при одинаковых начальных условиях явление протекает одинаково (в нашем случае — покой) в разных инерциальных системах отсчёта, но кинематические характеристики движения зависят от системы отсчёта. (Желательно повторить формулы для расчёта перемещения, скорости.)

Вопросы для подведения итогов урока: какие новые знания о механических явлениях вы получили? Что такое ИСО? Что утверждает первый закон Ньютона? В чём суть принципа относительности?

#### 4. Второй закон Ньютона

Каково значение второго закона? Обсуждают вопросы: в любой ли системе отсчёта справедлив второй закон динамики? Как доказать, что он справедлив только в ИСО? Можно ли применить закон к вращающемуся телу?

(Ответ. Нет, так как разные точки тела движутся с разными ускорениями. Закон справедлив лишь для тел, которые можно моделировать материальной точкой).

Принцип суперпозиции сил.

Принцип суперпозиции сил рассматривается на основе решения задач

#### 5. Третий закон Ньютона — закон взаимодействия.

Продолжить формирование понятий «сила», «действие», «взаимодействие»; раскрыть содержание и значение третьего закона динамики; сформировать умения выделять взаимодействие тел и описывать его, используя третий закон Ньютона.

Изучение нового материала начинается с постановки учебной проблемы: как количественно описать явление взаимодействия тел.

Для описания взаимодействия тел необходимо знать:

а) как связаны между собой силы, действующие на тела;

б) как связаны ускорения взаимодействующих тел. На эти и некоторые другие вопросы отвечает третий закон Ньютона.

Сила — характеристика действия.

Ввести понятие силы как физической величины, характеризующей действие одного тела на другое; сформировать умения выделять действия тел, характеризовать действия силами (выделять и обозначать силы, складывать несколько сил, измерять силу).

Сила — векторная величина. Вектор силы характеризуется точкой приложения, направлением, модулем. Правило определения числа сил: есть действие, есть сила. Нередко в книгах и устной речи понятия «действие» и «сила» отождествляются. Ничего страшного в этом нет, но следует помнить: действие — реально существующее физическое явление, а сила — средство его описания.

Как и любую другую физическую величину, силу можно измерить, т. е. сравнить с эталонной силой. В качестве эталонной силы выбрана такая сила, которая за время 1 с изменяет скорость тела массой 1 кг на 1 м/с. Единицей силы является ньютон (1 Н). На практике силу измеряют динамометром (демонстрируется). Растянутая пружина оказывает определённое действие на тело. Силу этого действия можно принять за эталонную силу и значение силы определять по значению удлинения пружины.

Вопросы для отработки знаний: из чего состоит простейший динамометр (выдан учебный динамометр)? В каких единицах он градуирован? Как градуируют динамометр? Как измеряется неизвестная сила? Как, например, измерить силу тяжести предлагаемого груза?

### **Тема 1.10 Силы в природе: упругости, трения, сила тяжести. Закон всемирного тяготения.**

**Цель: познакомить с видами взаимодействий в природе и видами сил в механике; изучить действия деформированных тел и описать упругие деформации силой упругости и законом Гука, выяснить природу силы**

**упругости; сформировать умения вычислять и измерять силу упругости; усвоить логику научного познания — выделение явления, его описание. Совершенствовать знания о гравитационном взаимодействии; ввести физические величины «сила тяжести», «вес тела»; сформировать представление о явлении невесомости; сформировать умения выделять действие Земли на тела и характеризовать это действие.**

Для эффективного решения задач формирования мировоззрения необходимо постоянно выяснять причины явлений, их связи и др.

### 1. Сила упругости.

От чего зависит сила упругости — решение этой учебной проблемы обеспечивается с помощью эксперимента.

Опыт: к пружине последовательно подвешивают грузы массами 100 г и 200 г, измеряют удлинение и определяют силу упругости, на доске учащийся строит график, преподаватель записывает формулу закона для силы:  $F = kx$ .

Вопросы для организации беседы: как направлена сила упругости пружины при её растяжении? Куда она приложена? Изменяется ли сила упругости при изменении удлинения пружины? Как зависит значение силы  $F$  от значения удлинения  $x$ ? От чего зависит жёсткость  $k$ ?

(Ответ: от материала, от формы тела.) Иллюстрация: две пружины, одинаковые грузы, разное удлинение, разная жёсткость.

### 2. Сила трения.

Задача: изучить явление трения; ввести средства описания трения — силу трения, коэффициент трения; сформировать умения выделять и описывать явление трения.

Соппротивление движению одного тела по поверхности другого получило название трение скольжения. Сила трения скольжения зависит от силы нормального давления (или силы реакции опоры  $N$ ), от состояния и вида поверхностей (описывается коэффициентом трения скольжения  $\mu$ ) следующим образом:  $F = \mu N$ .

Существует ещё несколько разновидностей трения: трение покоя, трение качения, жидкое трение (при относительном движении тела и жидкости, газа). Рассмотрим особенности этих явлений.

### 3. Трение покоя.

Сила трения покоя непостоянна, она увеличивается вместе с увеличением внешней силы, силы тяги.) Существует ли предел увеличения силы трения покоя при увеличении силы тяги? (Демонстрируют опыт, вводят понятие максимальной силы трения покоя  $F_{max}$ ). От чего зависит максимальная сила трения покоя? (Демонстрируют известный опыт с увеличением силы трения покоя при увеличении нормального давления за счёт добавления груза).

### 4. Сила тяжести и вес тела. Невесомость.

На зависимости  $F = mg$ , или  $m = \frac{F}{g}$ , основан метод измерения массы тела.

### Закон всемирного тяготения.

Задача: изучить гравитационное взаимодействие тел и закон всемирного тяготения; ознакомить учащихся с логикой научного познания при открытии закона всемирного тяготения.

Открытие. Ньютон первым теоретически доказал, что между любыми телами существует взаимодействие — взаимное притяжение, нашёл точный количественный закон и успешно применил его для объяснения движения Луны и планет. Таким образом, предположения, гипотезы, догадки предшественников у Ньютона приобрели форму научной теории. Он писал: «Тяготение существует ко всем телам вообще и пропорционально массе каждого из них... все планеты тяготеют друг к другу... тяготение к каждой из них в отдельности обратно пропорционально квадрату расстояния от места до центра этой планеты...».

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

**Тема 1.11 Силы упругости. Деформация и силы упругости. Закон Гука. Сил трения. Роль сил трения. Вес тела.**

**Цель:** Совершенствовать знания о гравитационном взаимодействии; ввести физические величины «сила тяжести», «вес тела»; сформировать представление о явлении невесомости; сформировать умения выделять действие Земли на тела и характеризовать это действие.

1. Сила упругости:  $F = kx$ .
2. Сила трения:  $F = \mu N$ .
3. Сила тяжести и вес тела:  $F = mg$ ,
4. Закон всемирного тяготения:  $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$

**Тема 1.12 Импульс. Закон сохранения импульса. Определение реактивного движения. Виды реактивного движения. Расчет скорости движения тела при реактивном движении. Развитие ракетной техники.**

**Цель:** Ввести понятие импульса материальной точки; продолжить формирование умений выделять и описывать движение механической системы.

Законы сохранения — одно из самых мощных средств описания движения механической системы. Сохраняющаяся физическая величина всегда очень удобная характеристика. И учёные стремятся такие характеристики найти. В механике законы сохранения импульса и энергии являются следствиями законов Ньютона. Но затем по мере развития физики они приобретают статус фундаментальных законов.

Обсуждают вопросы: какое движение называют механическим? Движение каких объектов изучает механика? Что такое материальная точка? Как может двигаться материальная точка под действием силы?

Физическая величина  $p = mv$  получила название «импульс»; она характеризует движение тела, обладающего массой.

Импульс системы материальных точек равен сумме импульсов всех точек; импульсы суммируются по правилу сложения векторов.

Физическая величина  $p = mv$  получила название «импульс»; она характеризует движение тела, обладающего массой.

Импульс системы материальных точек равен сумме импульсов всех точек; импульсы суммируются по правилу сложения векторов.

Реактивным называют движение тела под действием отделившихся от него с некоторой скоростью частей этого тела. На опытах показывают образ этого явления:

а) отклонение резиновой трубки с Г-образным наконечником при выливании воды;

б) движение воздушного шарика с соплом от стержня шариковой ручки по поверхности воды. Необходимо на основе закона сохранения импульса вывести формулу для определения скорости ракеты:  $v_{об} = -\frac{m_r}{m_{об}} v_r$ . Почему эта формула является приближённой? Что мы понимаем под массой ракеты?

### **Тема 1.13 Механическая работа и мощность силы.**

**Цель:** Ввести понятия «механическая работа», «мощность»; сформировать умение рассчитывать работу и мощность.

Вопросы для повторения: что называют перемещением? Что характеризует сила? Как найти проекцию вектора на ось?

Основная задача механики — определение механического состояния тела (координат тела и скорости его движения) в любой момент времени. Механическое состояние тела не изменяется само по себе — необходимо взаимодействие, то есть наличие силы. Когда тело перемещается (изменяет свое механическое состояние) под действием силы, говорят, что данная сила совершает механическую работу.

Механическая работа (работа силы)  $A$  — физическая величина, характеризующая изменение механического состояния тела и равная



произведению модуля силы  $P$ , модуля перемещения  $z$  и косинуса угла  $\alpha$  между вектором силы и вектором перемещения:  $A = F_s \cos \alpha$ .

Единица работы в СИ — джоуль:  $[a]=1\text{Дж}=1\text{Н} \cdot \text{м}$

1 Дж равен механической работе, которую совершает сила 1 Н, перемещая тело на 1 м в направлении действия этой силы.

Работа силы — величина скалярная, однако она может быть положительной, отрицательной, равной нулю — в зависимости от того, куда направлена сила относительно направления движения тела. Мощность  $P$  (или  $M$ ) — физическая величина, характеризующая скорость выполнения работы и равная отношению работы  $A$  к интервалу времени  $t$ , за который эта работа выполнена:  $P = \frac{A}{t}$ .

Единица мощности в СИ — ватт: Дж.  $[P] = 1 \text{ Вт}$

Мощность  $P$  — это физическая величина, характеризующая скорость выполнения работы и равная отношению работы  $A$  к интервалу времени  $t$ , за который она выполнена:  $P = \frac{A}{t}$ .

### Тема 1.14 Энергия. Кинетическая энергия.

**Цель: Познакомиться с понятиями энергия и кинетической энергии.**

Кинетическая энергия — физическая величина, характеризующая механическое состояние движущегося тела и равная половине произведения массы  $m$  тела на квадрат скорости его движения:  $E_k = \frac{mv^2}{2}$ .

Работа равнодействующей всех сил, действующих на тело, равна изменению кинетической энергии тела:  $A = E_k - E_{k0} = \Delta E_k$ .

Если в начальный момент времени тело неподвижно ( $v_0 = 0$ ), то есть  $E_{k0} = 0$ , то теорема о кинетической энергии сводится к равенству:

$$A = E_k = \frac{mv^2}{2}$$

Кинетическая энергия тела, движущегося со скоростью  $v$ , равна работе, которую совершает сила, чтобы придать неподвижному телу данную скорость.

## Тема 1.15 Работа силы тяжести и силы упругости. Сила всемирного тяготения. Консервативные силы. Потенциальная энергия.

**Цель:** Получить формулу для вычисления работы силы тяжести; ввести понятие о консервативных силах; сформировать умение рассчитывать работу силы тяжести при разных движениях тела.

Определите работу силы, действующей на материальную точку при её движении вертикально вниз и под углом к горизонту.

Вопросы для организации беседы: как движется тело, отпущенное с какой-либо высоты? Почему? Как обычно моделируют тело при таком движении? Какая сила приложена к материальной точке? Как она направлена? Как определить работу этой силы? Какую закономерность можно подметить, получив формулы для вычисления работы в двух случаях?

Преподаватель вводит понятие о консервативных силах, коллективно обсуждается работа такой силы по замкнутой траектории.

$$A = mg(h_1 - h_2) = mgh_1 - mgh_2$$

При прямолинейном движении тела работа силы тяжести в каждом случае равна разности двух значений величины, зависящей от положений тела, определяемых высотами  $h_1$  и  $h_2$  над поверхностью Земли.

Более того, работа силы тяжести при перемещении тела массой  $t$  из одного положения в другое не зависит от формы траектории, по которой движется тело. Действительно, если тело перемещается вдоль кривой BC (рис. 5.11), то, представив эту кривую в виде ступенчатой линии, состоящей из вертикальных и горизонтальных участков малой длины, увидим, что на горизонтальных участках работа силы тяжести равна нулю, так как сила перпендикулярна перемещению, а сумма работ на вертикальных участках равна работе, которую совершила бы сила тяжести при перемещении тела по вертикальному отрезку

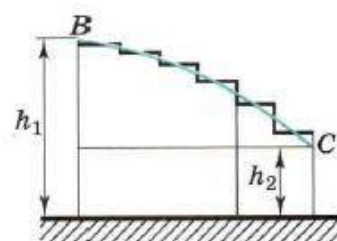


Рис. 5.11

длиной  $h_1 - h_2$ . Таким образом, работа силы тяжести при перемещении вдоль кривой BC равна:  $A = mgh_1 - mgh_2$ .

Мы показали, что работа силы тяжести не зависит от формы траектории, а зависит только от положений начальной и конечной точек траектории.

Определим работу  $A$  при перемещении тела по замкнутому контуру, например, по контуру BCDEB (рис. 5.12). Работа  $A_1$  силы тяжести при перемещении тела из точки В в точку D по траектории BCD:  $A_1 = mgh_2 - mgh_1$ , по траектории DEB:  $A_2 = mg(h_1 - h_2)$ .

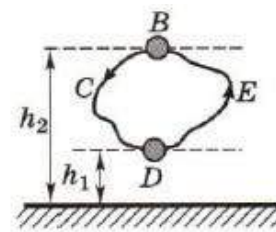


Рис. 5.12

Тогда суммарная работа  $A = A_1 + A_2 = mg(h_2 - h_1) + mg(h_1 - h_2) = 0$

При движении тела по замкнутой траектории работа силы тяжести равна нулю.

Итак, работа силы тяжести не зависит от формы траектории тела; она определяется лишь начальным и конечным положениями тела. При перемещении тела по замкнутой траектории работа силы тяжести равна нулю.

Силы, работа которых не зависит от формы траектории точки приложения силы и по замкнутой траектории равна нулю, называют консервативными силами.

Работа силы упругости. Вычислим работу, которую совершает сила упругости при перемещении некоторого груза.

На рисунке 5.13, а показана пружина, у которой один конец закреплён неподвижно, а к другому концу прикреплен шар. Совместим начало координат с центром шара, тогда координата шара будет равна удлинению пружины. Если пружина растянута, то она действует на шар с силой  $\vec{F}_1$  (рис. 5.13, б), направленной к положению равновесия шара, в котором пружина не деформирована. Начальное удлинение пружины равно  $x_1$ . Вычислим работу

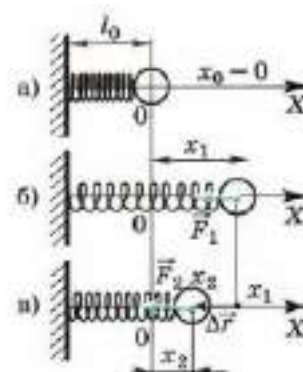


Рис. 5.13

силы упругости при перемещении шара из точки с координатой  $x_1$  в точку с координатой  $x_2$ . Из рисунка 5.13, в видно, что модуль перемещения равен:

$$|\Delta\vec{r}| = x_1 - x_2.$$

Мы рассматриваем случай, когда направления силы упругости и перемещения тела совпадают.

Для вычисления работы переменной силы упругости воспользуемся графиком зависимости модуля силы упругости от координаты шара (рис. 5.14).

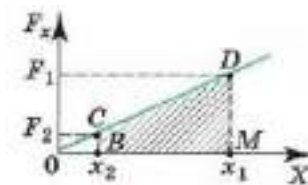


Рис. 5.14

Мы показали, что работа может быть определена по графику зависимости  $F_x$  от  $x$  и что эта работа численно равна площади заштрихованной фигуры (см. рис. 5.3, б).

В нашем примере работа силы упругости на перемещении  $x_1 - x_2$  точки её приложения численно равна площади трапеции BCMD. Следовательно,

$$A = \frac{F_1 + F_2}{2} (x_1 - x_2) = \frac{F_1 + F_2}{2} |\Delta\vec{r}| \quad (5.16)$$

Согласно закону Гука значения сил упругости  $F_1 = kx_1$  и  $F_2 = kx_2$ . Подставляя эти выражения в уравнение (5.16) и учитывая, что  $|\Delta\vec{r}| = x_1 - x_2$ , получаем

$$A = \frac{kx_1 + kx_2}{2} (x_1 - x_2) = \frac{k(x_1^2 - x_2^2)}{2}$$

Или окончательно

$$A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2} > 0 \quad (5.17)$$

Работа силы упругости при растяжении пружины, т. е. когда направление силы противоположно перемещению тела:  $A = -\frac{kx_1^2}{2} + \frac{kx_2^2}{2} < 0$ .

Если начальное и конечное состояния пружины совпадают, то суммарная работа силы упругости при деформации пружины равна нулю.

Во всех случаях движения тела под действием силы упругости мы пришли бы к той же формуле (5.17) для работы, т. е. работа силы упругости

зависит лишь от удлинения или сжатия пружины в начальном и конечном состояниях.

Таким образом, работа силы упругости не зависит от формы траектории и, так же, как и сила тяжести, сила упругости является консервативной.

Потенциальная энергия.

Согласно теореме об изменении кинетической энергии работа силы, действующей на тело, равна изменению его кинетической энергии:

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \Delta E_k \quad (5.18)$$

Если же силы взаимодействия между телами являются консервативными, то, используя явные выражения для сил, мы показали, что работу таких сил можно также представить в виде разности двух значений некоторой величины, зависящей от взаимного расположения тел (или частей одного тела):

$$A = mgh_1 - mgh_2 \text{ (для силы тяжести)}$$

$$A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2} \text{ (для силы упругости)} \quad (5.19)$$

Здесь высоты  $h_1$  и  $h_2$  определяют взаимное расположение тела и поверхности Земли, а удлинения  $x_1$  и  $x_2$  — взаимное расположение частей тела, например витков деформированной пружины.

Из формул (5.18) и (5.19) следует, что

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = mgh_1 - mgh_2 \text{ и } \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}$$

Величину, равную произведению массы  $m$  тела на ускорение свободного падения  $g$  и на высоту  $h$  тела над поверхностью Земли, называют потенциальной энергией тела в поле силы тяжести и обозначают  $E_{\text{п}}$ :

$$E_{\text{п}} = mgh \quad (5.20)$$

Запомни: Величину, равную половине произведения коэффициента упругости  $k$  тела на квадрат удлинения или сжатия  $x$ , называют потенциальной энергией упруго деформированного тела:

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2} \quad (5.21)$$

Введя понятие потенциальной энергии, мы получаем возможность выразить работу любых консервативных сил через изменение потенциальной энергии. Под изменением величины понимают разность между её конечным и начальным значениями, поэтому  $E_{\text{п}} = E_{\text{п2}} - E_{\text{п1}}$ .

Следовательно, оба уравнения (5.19) можно записать так:

$$A = E_{\text{п1}} - E_{\text{п2}} = -(E_{\text{п2}} - E_{\text{п1}}) = -\Delta E_{\text{п}} \quad (5.22)$$

откуда  $\Delta E_{\text{п}} = -A$ .

Например, при падении камня на Землю его потенциальная энергия убывает ( $\Delta E_{\text{п}} < 0$ ), но сила тяжести совершает положительную работу ( $A > 0$ ). Следовательно,  $A$  и  $\Delta E_{\text{п}}$  имеют противоположные знаки в соответствии с формулой (5.22).

Нулевой уровень потенциальной энергии. Согласно уравнению (5.22) работа консервативных сил определяет не саму потенциальную энергию, а её изменение.

Поскольку работа определяет лишь изменение потенциальной энергии, то только изменение энергии в механике имеет физический смысл. Поэтому можно произвольно выбрать состояние системы, в котором её потенциальная энергия считается равной нулю. Этому состоянию соответствует нулевой уровень отсчёта потенциальной энергии.

Ни одно явление в природе или технике не определяется значением самой потенциальной энергии. Важна лишь разность значений потенциальной энергии в конечном и начальном состояниях системы тел.

Выбор нулевого уровня производится по-разному и диктуется условиями данной задачи. Обычно в качестве состояния с нулевой потенциальной энергией выбирают состояние системы с минимальным значением энергии. Тогда потенциальная энергия всегда положительна или равна нулю.

Итак, потенциальная энергия системы «тело — Земля» — величина, зависящая от положения тела относительно Земли, равная работе консервативной силы при перемещении тела из точки, где оно находится, в

точку, соответствующую нулевому уровню потенциальной энергии системы. У пружины потенциальная энергия минимальна в отсутствие деформации, а у системы «камень — Земля» — когда камень лежит на поверхности Земли. Поэтому в первом случае, а во втором случае  $E_{\text{п}} = mgh$ .

Но к данным выражениям можно добавить любую постоянную величину  $C$ . При этом изменение потенциальной энергии, определяемое работой неконсервативной силы, останется прежним, не меняется.

Изолированная система тел стремится к состоянию, в котором её потенциальная энергия минимальна.

Если не удерживать тело, то оно падает на землю ( $h = 0$ ); если отпустить растянутую или сжатую пружину, то она вернётся в недеформированное состояние ( $x = 0$ ).

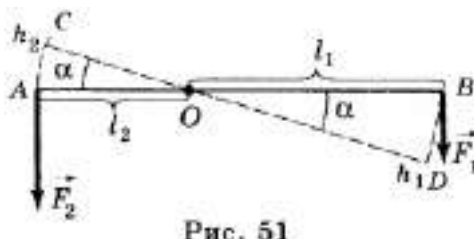
### Тема 1.16 Простые механизмы. КПД.

**Цель: Познакомиться с видами простых механизмов и КПД.**

1. Простые механизмы — приспособления, которые сконструировал и использовал человек, чтобы облегчить работу по перемещению тяжёлых предметов. К ним относят: рычаг, блок, наклонную плоскость. Разновидностями этих механизмов являются: клин, ворот и винт.

Все простые механизмы позволяют преобразовать силу, действующую на тело: либо уменьшить её, либо изменить её направление.

2. Рычаг — это стержень, вращающийся вокруг неподвижной опоры или оси (рис. 51). На рисунке показан рычаг, который может вращаться вокруг точки  $O$ , расположенный



между концами рычага. К одному концу рычага подвешен груз, действующий на рычаг с силой  $F_1$ , равной весу груза. Действуя на длинный конец рычага с силой  $F_2$ , человек поднимает груз. При этом сила  $F_1$  стремится повернуть рычаг по часовой стрелке, а груз  $F_2$  — против часовой стрелки.

Плечом силы называют кратчайшее расстояние (перпендикуляр) от точки опоры до линии действия силы. Так, плечом силы  $F_1$  является расстояние  $OA$  ( $l_1$ ), плечом силы  $F_2$  — расстояние  $OB$  ( $l_2$ ).

Из эксперимента следует, что рычаг находится в равновесии, если произведение силы, вращающей рычаг по часовой стрелке, и её плеча равно произведению силы, вращающей рычаг против часовой стрелки, и её плеча, т.е.  $F_1 l_1 = F_2 l_2$ . Произведение силы, действующей на рычаг, и её плеча называют моментом силы:  $F_1 = M$ . Соответственно, если рычаг находится в равновесии, то  $M_1 = M_2$ .

Условие равновесия рычага можно записать по-другому:  $\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$ . Это равенство означает, что рычаг находится в равновесии, если силы, действующие на него, обратно пропорциональны их плечам. Оно называется условием равновесия рычага.

Рычаг другого типа вращается вокруг точки, находящейся на конце рычага. Примером такого рычага может служить тачка. Когда используется такой рычаг, то вес груза направлен вниз, а человек действует на свободный конец рычага с силой, направленной вверх. Для такого рычага также справедливо условие равновесия, приведенное выше.

3. При подъеме груза работа силы, действующей на груз, равна  $A_1 = F_1 h_1$ , работа силы, приложенной к другому концу рычага, равна  $A_2 = F_2 h_2$ . Рассмотрение треугольников  $AOC$  и  $BOD$  позволяет сделать вывод о том, что они подобны и  $AOBO=ACBD$  или  $\frac{l_1}{l_2} = \frac{h_1}{h_2}$ . Поскольку  $F_1 l_1 = F_2 l_2$ , то  $F_1 h_1 = F_2 h_2$ , т.е.  $A_1 = A_2$ . Таким образом, рычаг, позволяя выиграть в силе, не даёт выигрыша в работе.

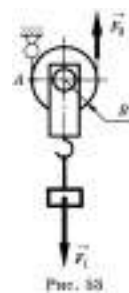
4. Ещё одним простым механизмом является блок. Блок — это колесо с желобом, по которому пропускается трос и которое может вращаться относительно оси  $O$  (см. рис.).



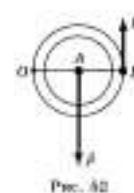


Если ось блока закреплена, то блок не перемещается, и он называется неподвижным.

Неподвижный блок можно рассматривать как рычаг, вращающийся вокруг точки, лежащей посередине рычага. Плечи такого рычага равны друг другу:  $OA = OB$ . В соответствии с условием равновесия рычага приложенные к блоку силы тоже равны:  $P = F$ . Следовательно, неподвижный блок не даёт выигрыша в силе, но он позволяет поднимать груз, прикладывая силу, направленную не вверх, а вниз, что облегчает перемещение груза.



Чтобы получить выигрыш в силе используют подвижный блок (рис. 53). К нему непосредственно прикрепляется груз, один конец троса закрепляется, а к другому прикладывают силу и, таким образом, перебирая трос, поднимают блок с грузом.

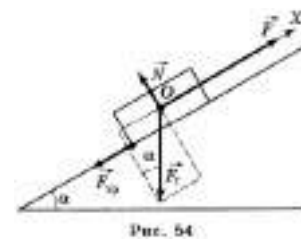


В этом случае точкой вращения блока является точка А (см. рис. 52). Плечи действующих сил равны соответственно:  $AO$  и  $AB$ , при этом  $AB = 2AO$ . В соответствии с условием равновесия рычага:

$P = 2F$ . Таким образом, подвижный блок даёт выигрыш в силе в 2 раза:  $F = \frac{P}{2}$ .

Измерив расстояние  $h_1$ , которое проходит груз, и расстояние  $h_2$ , на которое перемещается конец троса, можно обнаружить, что расстояние  $h_2 = 2h_1$ . Таким образом, подвижный блок даёт выигрыш в силе в 2 раза и в 2 раза проигрыш в пути. Соответственно, работа  $Ph_1 = Fh_2$ , т.е.  $A_1 = 2$ . Подвижный блок, так же, как и рычаг, не даёт выигрыша в работе.

5. Наклонная плоскость используется в том случае, если нужно поднять объемный тяжёлый груз на какую-либо высоту (рис. 54).



Например, нужно погрузить ящик с металлическими деталями в кузов грузовика. В этом случае кладут массивную доску так, что она образует наклонную плоскость, один конец которой находится на земле, а другой на грузовике, и по этой плоскости втаскивают ящик. Чтобы поднять ящик

вертикально вверх нужно приложить к нему силу, равную его весу  $P$ . Перемещая равномерно ящик по наклонной плоскости, в отсутствие трения прикладывают силу, равную  $F = P \sin \alpha$ , т.е. меньшую веса ящика, но при этом, выигрывая в силе, проигрывают в расстоянии. Работа по подъёму ящика по вертикали равна работе, совершаемой при его перемещении вдоль наклонной плоскости. Это справедливо, если сила сопротивления движению пренебрежимо мала. При наличии трения перемещение ящика вдоль наклонной плоскости требует совершения большей работы, чем при его движении вертикально вверх. В этом случае говорят о коэффициенте полезного действия (КПД) наклонной плоскости. Он равен отношению полезной работы ко всей совершённой работе:  $\text{КПД} = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{с}}} \cdot 100\%$ , где  $A_{\text{п}}$  — полезная работа,  $A_{\text{п}} = mgh$ ,  $A_{\text{с}}$  — совершённая работа при перемещении ящика вдоль наклонной плоскости,  $A_{\text{с}} = Fl$ , где  $F$  — приложенная сила,  $l$  — длина наклонной плоскости.

**Тема 1.17 Механические колебания и волны. Амплитуда, период, частота колебаний. Длина волны. Звуковые волны. Ультразвук и его использование в технике и медицине.**

**Цель: Познакомиться с видами механических колебаний и волн, их характеристиками.**

Механические колебания окружают нас повсюду: покачивание ветвей деревьев, вибрация струн музыкальных инструментов, колебания поплавка на волне, движение маятника в часах, биение сердца и т. д. Колебательное движение, одно из самых распространенных в природе, имеет ряд характерных признаков.

Какие физические величины характеризуют колебательное движение

Механические колебания — это движения тела (или системы тел), происходящие около некоторого положения равновесия и точно или приблизительно повторяющиеся через равные интервалы времени.

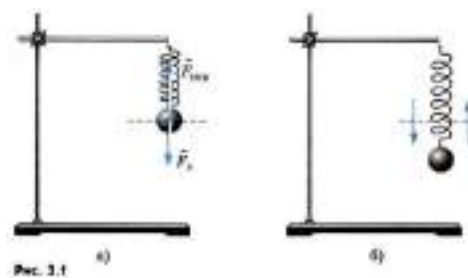
Колебательное движение, как и любое другое движение, характеризуется такими физическими величинами, как скорость, ускорение, координата {смещение}.

Смещение  $x$  — это расстояние от положения равновесия до точки, в которой в данный момент времени находится колеблющееся тело.

При колебаниях механическое состояние тела непрерывно изменяется. Если координата и скорость движения тела повторяются через равные интервалы времени, такие колебания называют периодическими. Существует ряд физических величин, характеризующих именно периодические колебания, в частности амплитуда, период, частота.

Колебательные движения, или просто колебания, широко распространены в природе. Заставить предмет колебаться, т. е. совершать повторяющиеся движения, очень просто.

Подвесим пружину к штативу. К нижнему свободному концу пружины прикрепим металлический шарик. Пружина растянется, и сила упругости  $\vec{F}_{\text{упр}}$  уравнивает силу



тяжести  $\vec{F}_T$ , действующую на шарик (рис. 3.1, а). Если теперь вывести шарик из положения равновесия, слегка оттянув его вниз, и отпустить, то он начнет совершать движения — вверх-вниз, вверх-вниз и т. д. (рис. 3.1, б). Такого рода движения, при которых тело поочередно смещается то в одну, то в другую сторону, и называются колебаниями. С течением времени колебания постепенно ослабевают (затухают), и в конце концов шарик остановится.

Еще проще можно заставить шарик колебаться, если подвесить его на нити. В положении равновесия нить вертикальна и сила тяжести  $\vec{F}_T$ , действующая на шарик, уравнивается силой упругости  $\vec{F}_{\text{упр}}$  нити (рис. 3.2, а). Если шарик отклонить и затем отпустить, то он начнет качаться направо-

налево, налево-направо (рис. 3.2, б) до тех пор, пока колебания не затухнут. Шарик, подвешенный на нити, — это простейший маятник.

Нужно иметь в виду, что шарик, подвешенный на нити, будет представлять собой маятник лишь в том случае, если на него действует сила тяжести Земли. Создающий эту силу земной шар входит в колебательную систему, которую мы для краткости называем просто маятником.

Вообще же обычно маятником называют подвешенное на нити или закрепленное на оси тело, которое может совершать колебания под действием силы тяжести. При этом ось не должна проходить через центр тяжести тела. Маятником можно назвать линейку, подвешенную на гвоздь, люстру, коромысло рычажных весов и т.д. Что же является наиболее характерным признаком колебательного движения? Прежде всего это то, что при колебаниях движения тела повторяются или почти повторяются. Так, маятник, совершив один цикл колебаний, т. е. проделав путь от крайнего левого положения до крайнего правого и обратно, вновь совершает такой же цикл. Если движение повторяется точно, то его называют периодическим.

Механические колебания — это движения, которые точно или приблизительно повторяются через определенные интервалы времени.

Повторяются движения поршней в двигателе автомобиля, поплавок на волне, ветки дерева на ветру, нашего сердца. Все это различные примеры колебаний.

Свободные колебания. Группу тел, движение которых мы изучаем, называют в механике системой тел или просто системой. Напомним, что силы, действующие между телами системы, называют внутренними. Внешними силами называют силы, действующие на тела системы со стороны тел, не входящих в нее.

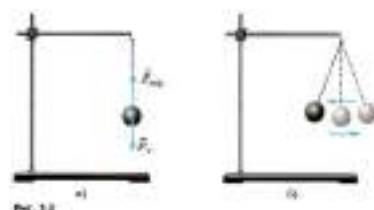
Самым простым видом колебаний являются свободные колебания. Свободными колебаниями называются колебания в системе под

действием внутренних сил, после того как система выведена из положения равновесия и предоставлена затем самой себе.

Колебания груза, прикрепленного к пружине, или груза, подвешенного на нити, — это примеры свободных колебаний. После выведения системы из положения равновесия создаются условия, при которых груз колеблется без воздействия внешних сил.

Однако с течением времени колебания затухают, так как на тела системы всегда действуют силы сопротивления. Под действием внутренних сил и сил сопротивления система совершает затухающие колебания.

Вынужденные колебания. Для того чтобы колебания не затухали, на тела системы должна действовать периодически изменяющаяся сила. Постоянная сила не может поддерживать колебания,



так как под действием этой силы может измениться только положение равновесия, относительно которого происходят колебания.

Вынужденными колебаниями называются колебания тел под действием внешних периодически изменяющихся сил.

Колебания бывают свободными, затухающими и вынужденными. Наибольшее значение имеют вынужденные колебания.

Динамика колебательного движения.

Для того чтобы описать количественно колебания тела под действием силы упругости пружины или колебания шарика, подвешенного на нити, воспользуемся законами механики Ньютона.

Уравнение движения тела, колеблющегося под действием силы упругости. Согласно второму закону Ньютона произведение массы тела  $m$  на ускорение его  $\vec{a}$  равно равнодействующей  $F$  всех сил, приложенных к телу:

$$m\vec{a} = \vec{F}. \quad (3.1)$$

Это — уравнение движения. Запишем уравнение движения для шарика, движущегося прямолинейно вдоль горизонтали под действием силы

упругости  $\vec{F}$  пружины (см. рис. 3.3). Направим ось ОХ вправо. Пусть начало отсчета координат соответствует положению равновесия шарика (см. рис. 3.3, а).

В проекции на ось ОХ уравнение движения (3.1) можно записать так:  $ma_x = F_{x \text{ упр}}$ , где  $a_x$  и  $F_{x \text{ упр}}$  соответственно проекции ускорения и силы упругости пружины на эту ось.

Согласно закону Гука, проекция  $F_{x \text{ упр}}$  прямо пропорциональна смещению шарика из положения равновесия. Смещение же равно координате  $x$  шарика, причем проекция силы и координата имеют противоположные знаки (см. рис. 3.3, б, в). Следовательно,

$$F_{x \text{ упр}} = -kx, \quad (3.2)$$

Разделив левую и правую части уравнения (3.2) на  $m$ , получим

$$a_x = -\frac{k}{m}x \quad (3.4)$$

Так как масса  $m$  и жесткость  $k$  — постоянные величины, то их отношение  $\frac{k}{m}$  также постоянная величина.

Мы получили уравнение, описывающее колебания тела под действием силы упругости. Оно очень простое: проекция  $a_x$  ускорения тела прямо пропорциональна его координате  $x$ , взятой с противоположным знаком.

Уравнение движения математического маятника. При колебаниях шарика на нерастяжимой нити он все время движется по дуге окружности, радиус которой равен длине нити  $l$ . Поэтому положение шарика в любой момент времени определяется одной величиной — углом  $\alpha$  отклонения нити от вертикали. Будем считать угол  $\alpha$  положительным, если маятник отклонен вправо от положения равновесия, и отрицательным, если он отклонен влево (см. рис. 3.5). Касательную к траектории будем считать направленной в сторону положительного отсчета углов.

Обозначим проекцию силы тяжести на касательную к траектории маятника через  $F_\tau$ . Эта проекция в момент, когда нить маятника отклонена от положения равновесия на угол  $\alpha$ , равна:

$$F_\tau = -mg \sin \alpha. \quad (3.5)$$

Знак «-» здесь стоит потому, что величины  $F_\tau$  и  $a$  имеют противоположные знаки. При отклонении маятника вправо ( $\alpha > 0$ ) составляющая силы тяжести  $F_\tau$  направлена влево и ее проекция отрицательна:  $F_\tau < 0$ . При отклонении маятника влево ( $\alpha < 0$ ) эта проекция положительна:  $F_\tau > 0$ .

Обозначим проекцию ускорения маятника на касательную к его траектории через  $a_\tau$ . Эта проекция характеризует быстроту изменения модуля скорости маятника.

Согласно второму закону Ньютона

$$ma_\tau = F_\tau, \text{ или}$$

$$ma_\tau = -mg \sin \alpha. \quad (3.6)$$

Разделив левую и правую части этого уравнения на  $m$ , получим

$$a_\tau = -g \sin \alpha. \quad (3.7)$$

Ранее предполагалось, что углы отклонения нити маятника от вертикали могут быть любыми. В дальнейшем будем считать их малыми. При малых углах, если угол измерен в радианах,

$$\sin \alpha \approx \alpha.$$

Следовательно, можно принять

$$a_\tau = -g\alpha. \quad (3.8)$$

Если угол  $\alpha$  мал, то проекция ускорения примерно равна проекции ускорения на ось ОХ:  $a_\tau \approx a_x$  (см. рис. 3.5). Из треугольника АВО для малого угла  $\alpha$  имеем:

$$\alpha = \frac{x}{l} \quad (3.9)$$

Подставив это выражение в равенство (3.8) вместо угла  $\alpha$ , получим

$$a_{\tau} = -\frac{g}{l}x \quad (3.10)$$

Это уравнение имеет такой же вид, что и уравнение (3.4) для ускорения шарика, прикрепленного к пружине. Следовательно, и решение этого уравнения будет иметь тот же вид, что и решение уравнения (3.4). Это означает, что движение шарика и колебания маятника происходят одинаковым образом. Смещения шарика на пружине и тела маятника от положений равновесия изменяются со временем по одному и тому же закону, несмотря на то, что силы, вызывающие колебания, имеют различную физическую природу. Умножив уравнения (3.4) и (3.10) на  $m$  и вспомнив второй закон Ньютона  $ma_x = F_{x \text{ рез}}$ , можно сделать вывод, что колебания в этих двух случаях совершаются под действием сил, равнодействующая которых прямо пропорциональна смещению колеблющегося тела от положения равновесия и направлена в сторону, противоположную этому смещению.

Уравнение (3.4), как и (3.10), на вид очень простое: ускорение прямо пропорционально координате (смещению от положения равновесия).

## **Тема 2.1 Основы молекулярно-кинетической теории. Масса и размеры молекул.**

### **Цель: Познакомиться с основами МКТ.**

Какие физические объекты (системы) изучает молекулярная физика?

Как различить механические и тепловые явления? Приведите примеры тепловых явлений, происходящих в классе, дома, на улице.

В основе молекулярно-кинетической теории строения вещества лежат три утверждения: 1) вещество состоит из частиц; 2) эти частицы беспорядочно движутся; 3) частицы взаимодействуют друг с другом.

Каждое утверждение строго доказано с помощью опытов.

Свойства и поведение всех без исключения тел определяются движением взаимодействующих друг с другом частиц: молекул, атомов или ещё более малых образований — элементарных частиц.



Оценка размеров молекул. Для полной уверенности в существовании молекул надо определить их размеры. Проще всего это сделать, наблюдая расплывание капельки масла, например, оливкового, по поверхности воды. Масло никогда не займёт всю поверхность, если мы возьмём достаточно широкий сосуд (рис. 8.1). Нельзя заставить капельку объёмом  $1 \text{ мм}^3$  расплыться так, чтобы она заняла площадь поверхности более  $0,6 \text{ м}^2$ . Предположим, что при растекании масла по максимальной площади оно образует слой толщиной всего лишь в одну молекулу — «мономолекулярный слой». Толщину этого слоя нетрудно определить и тем самым оценить размеры молекулы оливкового масла.



Рис. 8.1

Объём  $V$  слоя масла равен произведению его площади поверхности  $S$  на толщину  $d$  слоя, т. е.  $V = Sd$ . Следовательно, линейный размер молекулы оливкового масла равен:  $d = \frac{V}{S} = \frac{0,001 \text{ см}^3}{6000 \text{ см}^2} \approx 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ см}$ .



Рис. 8.2

Современные приборы позволяют увидеть и даже измерить отдельные атомы и молекулы. На рисунке 8.2 показана микрофотография поверхности кремниевой пластины, где бугорки — это отдельные атомы кремния. Подобные изображения впервые научились получать в 1981 г. с помощью сложных туннельных микроскопов.

Размеры молекул, в том числе и оливкового масла, больше размеров атомов. Диаметр любого атома примерно равен  $10^{-8} \text{ см}$ . Эти размеры так малы, что их трудно себе представить. В таких случаях прибегают к помощи сравнений.

Вот одно из них. Если пальцы сжать в кулак и увеличить его до размеров земного шара, то атом при том же увеличении станет размером с кулак.

Число молекул. При очень малых размерах молекул число их в любом макроскопическом теле огромно. Подсчитаем примерное число молекул в капле воды массой  $1 \text{ г}$  и, следовательно, объёмом  $1 \text{ см}^3$ .

Диаметр молекулы воды равен примерно  $3 \cdot 10^{-8}$  см. Считая, что каждая молекула воды при плотной упаковке молекул занимает объём  $(3 \cdot 10^{-8} \text{ см})^3$ , можно найти число молекул в капле, разделив объём капли ( $1 \text{ см}^3$ ) на объём, приходящийся на одну молекулу:

$$N = \frac{V_{\text{вещества}}}{V_{\text{молекулы}}} = \frac{1 \text{ см}^3}{(3 \cdot 10^{-8})^3 \text{ см}^3} \approx 3,7 \cdot 10^{22}$$

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

$$m_{0 H_2O} = \frac{m}{N} = \frac{1 \text{ г}}{3,7 \cdot 10^{22}} \approx 2,7 \cdot 10^{-23} \text{ г} \quad (8.1)$$

Массу такого же порядка имеют молекулы других веществ, исключая огромные молекулы органических веществ; например, белки имеют массу, в сотни тысяч раз большую, чем масса отдельных атомов. Но всё равно их массы в макроскопических масштабах (граммах и килограммах) чрезвычайно малы.

Относительная молекулярная масса. Так как массы молекул очень малы, удобно использовать в расчётах не абсолютные значения масс, а относительные.

По международному соглашению массы всех атомов и молекул сравнивают с  $\frac{1}{12}$  массы атома углерода (так называемая углеродная шкала атомных масс).

Относительной молекулярной (или атомной) массой  $M_r$  вещества называют отношение массы  $m_0$  молекулы (или атома) данного вещества к массе  $\frac{1}{12}$  атома углерода:  $M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0(C)}}$  (8.2)

Относительные атомные массы всех химических элементов точно измерены. Складывая относительные атомные массы элементов, входящих в состав молекулы вещества, можно вычислить относительную молекулярную массу вещества. Например, относительная молекулярная масса углекислого

газа  $CO_2$  приближённо равна 44, так как относительная атомная масса углерода практически равна 12, а кислорода примерно 16:  $M_{r(CO_2)} = 12 + 2 \cdot 16 = 44$ .

## **Тема 2.2 Число Авогадро. Абсолютная температура как мера средней кинетической энергии частиц.**

**Цель: Познакомиться с числом Авогадро, абсолютной температурой.**

Число Авогадро, постоянная Авогадро — физическая величина, численно равная количеству специфицированных структурных единиц (атомов, молекул, ионов, электронов или любых других частиц) в 1 моле вещества. Постоянная Авогадро в Международной системе единиц СИ согласно изменениям определений основных единиц СИ есть целое число, точно равное  $N_A \approx 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$ .

Средняя кинетическая энергия молекул газа при тепловом равновесии. Возьмём сосуд, разделённый пополам перегородкой, проводящей тепло. В одну половину сосуда поместим кислород, а в другую — водород, имеющие разную температуру. Спустя некоторое время газы будут иметь одинаковую температуру, не зависящую от рода газа, т. е. будут находиться в состоянии теплового равновесия. Для определения температуры выясним, какая физическая величина в молекулярно-кинетической теории обладает таким же свойством.

Из курса физики основной школы известно, что, чем быстрее движутся молекулы, тем выше температура тела. При нагревании газа в замкнутом сосуде давление газа возрастает. Согласно же основному уравнению молекулярно-кинетической теории (9.7) давление газа  $p$  прямо пропорционально средней кинетической энергии поступательного движения молекул:  $p = \frac{2}{3} n \bar{E}$ .

Так как концентрация молекул газа  $n = \frac{N}{V}$  то из уравнения (9.7) получаем  $p = \frac{2N}{3V} \bar{E}$ , или  $p \frac{V}{N} = \frac{2}{3} \bar{E}$  или, согласно формуле (8.8),  $\frac{pMV}{mN_A} = \frac{2}{3} \bar{E}$ .

При тепловом равновесии, если давление и объём газа массой  $m$  постоянны и известны, то средняя кинетическая энергия молекул газа должна иметь строго определённое значение, как и температура.

Можно предположить, что при тепловом равновесии именно средние кинетические энергии молекул всех газов одинаковы.

Конечно, это пока только предположение. Его нужно экспериментально проверить. Практически такую проверку произвести непосредственно невозможно, так как измерить среднюю кинетическую энергию молекул очень трудно. Но с помощью основного уравнения молекулярно-кинетической теории её можно выразить через макроскопические параметры:

$$\bar{E} = \frac{3 pV}{2 N} = \frac{3 pMV}{2 mN_A} \quad (9.8)$$

Если кинетическая энергия действительно одинакова для всех газов в состоянии теплового равновесия, то и значение давления  $p$  должно быть тоже одинаково для всех газов при  $\frac{V}{N} = \text{const.}$

### **Тема 2.3 Основы МКТ идеального газа. Объяснение агрегатных состояний вещества на основе атомно-молекулярных представлений.**

#### **Тепловое движение. Модель идеального газа.**

##### **Цель: Познакомиться основами МКТ идеального газа.**

Идеальный газ. У газа при обычных давлениях расстояние между молекулами во много раз превышает их размеры. В этом случае силы взаимодействия молекул пренебрежимо малы и кинетическая энергия молекул много больше потенциальной энергии взаимодействия. Молекулы газа можно рассматривать как материальные точки или очень маленькие твёрдые шарики. Вместо реального газа, между молекулами которого действуют силы взаимодействия, мы будем рассматривать его модель — идеальный газ.

Идеальный газ — это теоретическая модель газа, в которой не учитываются размеры молекул (они считаются материальными точками) и их

взаимодействие между собой (за исключением случаев непосредственного столкновения).

Естественно, при столкновении молекул идеального газа на них действует сила отталкивания. Так как молекулы газа мы можем согласно модели считать материальными точками, то размерами молекул мы пренебрегаем, считая, что объём, который они занимают, гораздо меньше объёма сосуда.

Напомним, что в физической модели принимают во внимание лишь те свойства реальной системы, учёт которых совершенно необходим для объяснения исследуемых закономерностей поведения этой системы.

Ни одна модель не может передать все свойства системы. Сейчас нам предстоит решить задачу: вычислить с помощью молекулярно-кинетической теории давление идеального газа на стенки сосуда. Для этой задачи модель идеального газа оказывается вполне удовлетворительной. Она приводит к результатам, которые подтверждаются опытом.

Давление газа в молекулярно-кинетической теории. Пусть газ находится в закрытом сосуде. Манометр показывает давление газа  $p_0$ . Как возникает это давление?

Каждая молекула газа, ударяясь о стенку, в течение малого промежутка времени действует на неё с некоторой силой. В результате беспорядочных ударов о стенку давление быстро

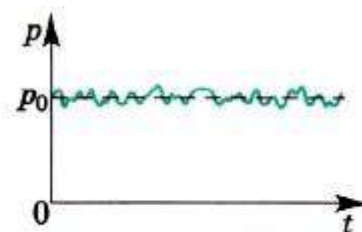


Рис. 9.1

меняется со временем примерно так, как показано на рисунке 9.1. Однако действия, вызванные ударами отдельных молекул, настолько слабы, что манометром они не регистрируются. Манометр фиксирует среднюю по времени силу, действующую на каждую единицу площади поверхности его чувствительного элемента — мембраны. Несмотря на небольшие изменения давления, среднее значение давления  $p_0$  практически оказывается вполне

определённой величиной, так как ударов о стенку очень много, а массы молекул очень малы.

Среднее давление имеет определённое значение как в газе, так и в жидкости. Но всегда происходят незначительные случайные отклонения от этого среднего значения. Чем меньше площадь поверхности тела, тем заметнее относительные изменения силы давления, действующей на данную площадь. Так, например, если участок поверхности тела имеет размер порядка нескольких диаметров молекулы, то действующая на неё сила давления меняется скачкообразно от нуля до некоторого значения при попадании молекулы на этот участок.

Среднее значение квадрата скорости молекул. Для вычисления среднего давления надо знать значение средней скорости молекул (точнее, среднее значение квадрата скорости). Это не простой вопрос. Вы привыкли к тому, что скорость имеет каждая частица. Средняя же скорость молекул зависит от того, каковы скорости движения всех молекул.

Чем отличается определение средней скорости тела в механике от определения средней скорости молекул газа?

С самого начала нужно отказаться от попыток проследить за движением всех молекул, из которых состоит газ. Их слишком много, и движутся они очень сложно. Нам и не нужно знать, как движется каждая молекула. Мы должны выяснить, к какому результату приводит движение всех молекул газа.

Характер движения всей совокупности молекул газа известен из опыта. Молекулы участвуют в беспорядочном (тепловом) движении. Это означает, что скорость любой молекулы может оказаться как очень большой, так и очень малой. Направление движения молекул беспрестанно меняется при их столкновениях друг с другом.

Скорости отдельных молекул могут быть любыми, однако среднее значение модуля этих скоростей вполне определённое.

В дальнейшем нам понадобится среднее значение не самой скорости, а квадрата скорости — средняя квадратичная скорость. От этой величины зависит средняя кинетическая энергия молекул. А средняя кинетическая энергия молекул, как мы вскоре убедимся, имеет очень большое значение во всей молекулярно-кинетической теории. Обозначим модули скоростей отдельных молекул газа через  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_N$ . Среднее значение квадрата скорости определяется следующей формулой:

$$\bar{v}^2 = \frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_N^2}{N} \quad (9.1)$$

где  $N$  — число молекул в газе.

Но квадрат модуля любого вектора равен сумме квадратов его проекций на оси координат  $Ox, Oy, Oz$ .

Из курса механики известно, что при движении на плоскости

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2$$

В случае, когда тело движется в пространстве, квадрат скорости равен:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2. \quad (9.2)$$

Средние значения величин  $v_x^2, v_y^2$  и  $v_z^2$  можно определить с помощью формул, подобных формуле (9.1). Между средним значением  $\bar{v}^2$  и средними значениями квадратов проекций существует такое же соотношение, как соотношение (9.2):

$$\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2 \quad (9.3)$$

Действительно, для каждой молекулы справедливо равенство (9.2). Сложив такие равенства для отдельных молекул и разделив обе части полученного уравнения на число молекул  $N$ , мы придём к формуле (9.3).

## Тема 2.4 Изопроцессы.

**Цель: Познакомиться с изотермическими процессами.**

Процесс изменения состояния системы макроскопических тел (термодинамической системы) при постоянной температуре

называют изотермическим. Слово «изотермический» происходит от греческих слов *isos* — равный, одинаковый и *therme* — теплота.

Для поддержания температуры газа постоянной необходимо, чтобы он мог обмениваться теплом с большой системой — термостатом. Иначе при сжатии или расширении температура газа будет меняться. Термостатом может служить атмосферный воздух, если температура его заметно не меняется на протяжении всего процесса. Согласно уравнению состояния идеального газа (10.4), если масса газа не изменяется, в любом состоянии с неизменной температурой произведение давления газа на его объём остаётся постоянным:

$$pV = \text{const} \text{ при } T = \text{const}. \quad (10.6)$$

Этот вывод был сделан английским учёным Р. Бойлем (1627—1691) и несколько позже французским учёным Э. Мариоттом (1620—1684) на основе эксперимента. Поэтому он носит название закона Бойля—Мариотта.

Закона Бойля—Мариотта. Для газа данной массы произведение давления газа на его объём постоянно.

Закон Бойля—Мариотта справедлив обычно для любых газов, а также и для их смесей, например, для воздуха. Лишь при давлениях, в несколько сотен раз больших атмосферного, отклонения от этого закона становятся существенными.

Кривую, изображающую зависимость давления газа от объёма при постоянной температуре, называют изотермой.

Изотерма газа изображает обратно пропорциональную зависимость между давлением и объёмом. Кривую такого рода в математике называют гиперболой (рис. 10.1).

Различным постоянным температурам соответствуют различные изотермы. При повышении температуры газа давление согласно уравнению состояния (10.4) увеличивается, если  $V = \text{const}$ . Поэтому изотерма, соответствующая более

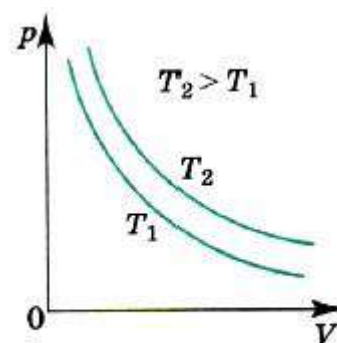


Рис. 10.1



высокой температуре  $T_2$ , лежит выше изотермы, соответствующей более низкой температуре  $T_1$  (см. рис. 10.1).

Для того чтобы процесс происходил при постоянной температуре, сжатие или расширение газа должно происходить очень медленно. Дело в том, что, например, при сжатии газ нагревается, так как при движении поршня в сосуде скорость и соответственно кинетическая энергия молекул после ударов о поршень увеличиваются, а, следовательно, увеличивается и температура газа. Именно поэтому для реализации изотермического процесса надо после небольшого смещения поршня подождать, когда температура газа в сосуде опять станет равной температуре окружающего воздуха.

Кроме этого, отметим, что при быстром сжатии давление под поршнем сразу становится больше, чем во всём сосуде. Если значения давления и температуры в различных точках объёма разные, то в этом случае газ находится в неравновесном состоянии, и мы не можем назвать значения температуры и давления, определяющие в данный момент состояние системы. Если систему предоставить самой себе, то температура и давление постепенно выравниваются, система приходит в равновесное состояние.

Равновесное состояние — это состояние, при котором температура и давление во всех точках объёма одинаковы.

Параметры состояния газа могут быть определены, если он находится в равновесном состоянии. Процесс, при котором все промежуточные состояния газа являются равновесными, называют равновесным процессом. Очевидно, что на графиках зависимости одного параметра от другого мы можем изображать только равновесные процессы.

## **Тема 2.5 Первое начало термодинамики. Первый закон термодинамики.**

**Цель: Познакомиться с законами термодинамики.**

Первый закон термодинамики — это частный случай закона сохранения энергии, главного закона природы. Он показывает, от каких причин зависит изменение внутренней энергии.

Закон сохранения энергии. К середине XIX в. многочисленные опыты доказали, что механическая энергия никогда не пропадает бесследно.

Падает, например, молот на кусок свинца, и свинец нагревается. Силы трения тормозят тела, которые при этом разогреваются.

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

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 всегда выполняется абсолютно точно, неизвестно ни одного случая, когда бы этот великий закон не выполнялся. Этот закон был открыт в середине XIX в. немецким учёным, врачом по образованию Р. Майером (1814—1878), английским учёным Дж. Джоулем (1818—1889) и получил наиболее точную формулировку в трудах немецкого учёного Г. Гельмгольца (1821—1894).

Первый закон термодинамики. Закон сохранения и превращения энергии, распространённый на тепловые явления, носит название первого закона термодинамики. В термодинамике рассматриваются тела, положение центра тяжести которых практически не меняется, т. е. тела, изменение механической энергии которых много меньше изменения их внутренней энергии. Механическая энергия таких тел остаётся постоянной, изменяться может лишь внутренняя энергия каждого тела.

До сих пор мы рассматривали процессы, в которых внутренняя энергия системы изменялась либо за счёт совершения работы, либо за счёт теплообмена с окружающими телами.

В общем случае при переходе системы из одного состояния в другое внутренняя энергия изменяется одновременно как за счёт совершения работы, так и за счёт передачи теплоты. Первый закон термодинамики формулируется именно для таких общих случаев.

Первый закон термодинамики: Изменение внутренней энергии системы при переходе её из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданной системе:

$$\Delta U = A + Q \quad (13.11)$$

Систему, которая не обменивается с внешней средой ни энергией, ни веществом, называют изолированной.

Если система является изолированной, то работа внешних сил равна нулю ( $A = 0$ ) и система не обменивается теплотой с окружающими телами ( $Q = 0$ ).

В этом случае согласно первому закону термодинамики

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 0, \text{ или } U_1 = U_2.$$

Внутренняя энергия изолированной системы остаётся неизменной (сохраняется).

Часто вместо работы  $A$  внешних тел над системой рассматривают работу  $A'$  системы над внешними телами. Учитывая, что  $A' = -A$ , первый закон термодинамики (13.11) можно записать так:

$$Q = \Delta U + A'. \quad (13.12)$$

Количество теплоты, переданной системе, идёт на изменение её внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами.

Невозможность создания вечного двигателя. Из первого закона термодинамики следует невозможность создания вечного двигателя первого рода, т. е. устройства, способного совершать неограниченную работу без затрат топлива или каких-либо других материалов. Если к системе не поступает тепло ( $Q = 0$ ), то работа  $A'$  согласно уравнению (13.12) может быть совершена только за счёт убыли внутренней энергии:

$$A' = -\Delta U.$$

После того как запас энергии окажется исчерпанным, двигатель перестанет работать.

Работа и количество теплоты — характеристики процесса изменения внутренней энергии. В данном состоянии система всегда обладает определённой внутренней энергией.

Но нельзя говорить, что в системе содержится определённое количество теплоты или работы. Как работа, так и количество теплоты являются величинами, характеризующими изменение внутренней энергии системы в результате того или иного процесса.

Внутренняя энергия системы может измениться на одно и то же значение как за счёт совершения системой работы, так и за счёт передачи окружающим телам какого-либо количества теплоты. Например, нагретый газ в

цилиндре может уменьшить свою энергию остывая, без совершения работы (рис. 13.7). Но он может потерять точно такое же количество энергии, поднимая поршень, без отдачи теплоты окружающим телам. Для этого стенки цилиндра и поршень должны быть теплонепроницаемыми (рис. 13.8).



## Тема 2.6 Принцип действия тепловых двигателей. КПД тепловых двигателей.

**Цель: Познакомиться с принципом действия тепловых двигателей. и формулой для вычисления КПД теплового двигателя.**

Запасы внутренней энергии в земной коре и океанах можно считать практически неограниченными. Но для решения практических задач располагать запасами энергии ещё недостаточно. Необходимо так же уметь за счёт энергии приводить в движение станки на фабриках и заводах, средства транспорта, тракторы и другие машины, вращать роторы генераторов электрического тока и т. д. Человечеству нужны двигатели — устройства,

способные совершать работу. Большая часть двигателей на Земле — это тепловые двигатели.

Тепловые двигатели — это устройства, превращающие внутреннюю энергию топлива в механическую работу.

Принцип действия тепловых двигателей. Для того чтобы двигатель совершал работу, необходима разность давлений по обе стороны поршня двигателя или лопастей турбины. Во всех тепловых двигателях эта разность давлений достигается за счёт повышения температуры рабочего тела (газа) на сотни или тысячи градусов по сравнению с температурой окружающей среды. Такое повышение температуры происходит при сгорании топлива.

Одна из основных частей двигателя — сосуд, наполненный газом, с подвижным поршнем. Рабочим телом у всех тепловых двигателей является газ, который совершает работу при расширении. Обозначим начальную температуру рабочего тела (газа) через  $T_1$ . Эту температуру в паровых турбинах или машинах приобретает пар в паровом котле. В двигателях внутреннего сгорания и газовых турбинах повышение температуры происходит при сгорании топлива внутри самого двигателя. Температуру  $T_1$  называют температурой нагревателя.

Роль холодильника. По мере совершения работы газ теряет энергию и неизбежно охлаждается до некоторой температуры  $T_2$ , которая обычно несколько выше температуры окружающей среды. Её называют температурой холодильника. Холодильником является атмосфера или специальные устройства для охлаждения и конденсации отработанного пара — конденсаторы. В последнем случае температура холодильника может быть немного ниже температуры окружающего воздуха.

Таким образом, в двигателе рабочее тело при расширении не может отдать всю свою внутреннюю энергию на совершение работы. Часть тепла неизбежно передаётся холодильнику (атмосфере) вместе с отработанным паром или выхлопными газами двигателей внутреннего сгорания и газовых турбин.

Эта часть внутренней энергии топлива теряется. Тепловой двигатель совершает работу за счёт внутренней энергии рабочего тела. Причём в этом процессе происходит передача теплоты от более горячих тел (нагревателя) к более холодным (холодильнику). Принципиальная схема теплового двигателя изображена на рисунке 13.13.

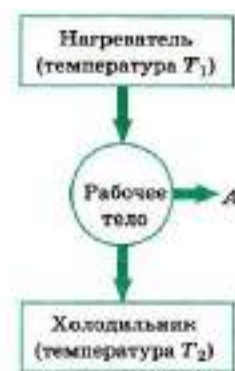


Рис. 13.13

Рабочее тело двигателя получает от нагревателя при сгорании топлива количество теплоты  $Q_1$ , совершает работу  $A'$  и передаёт холодильнику количество теплоты  $Q_2 < Q_1$ .

Для того чтобы двигатель работал непрерывно, необходимо рабочее тело вернуть в начальное состояние, при котором температура рабочего тела равна  $T_1$ . Предположите, при какой температуре рабочее тело (газ) следует возвращать в исходное состояние, чтобы работа за цикл была больше нуля.

### **Тема 3.1 Электрический заряд. Электризация тел. Взаимодействие зарядов. Два вида электрического заряда.**

**Цель:** Познакомиться с понятиями электрического заряда, электризации тел, видами электрического заряда и их взаимодействиями.

Вначале рассмотрим наиболее простой случай, когда электрически заряженные тела находятся в покое.

Раздел электродинамики, посвящённый изучению условий равновесия электрически заряженных тел, называют электростатикой.

Со словами электричество, электрический заряд, электрический ток вы встречались много раз и успели к ним привыкнуть. Но попробуйте ответить на вопрос: «Что такое электрический заряд?» Само понятие заряд — это основное, первичное понятие, которое не сводится на современном уровне развития наших знаний к каким-либо более простым, элементарным понятиям.

Попытаемся сначала выяснить, что понимают под утверждением: «Данное тело или частица имеет электрический заряд».

Все тела построены из мельчайших частиц, которые неделимы на более простые и поэтому называются элементарными.

Элементарные частицы имеют массу и благодаря этому притягиваются друг к другу согласно закону всемирного тяготения. С увеличением расстояния между частицами сила тяготения убывает обратно пропорционально квадрату этого расстояния. Большинство элементарных частиц, хотя и не все, кроме того, обладают способностью взаимодействовать друг с другом с силой, которая также убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, но эта сила во много раз превосходит силу тяготения.

Так, в атоме водорода, изображённом схематически на рисунке 14.1, электрон притягивается к ядру (протону) с силой, в 1039 раз превышающей силу гравитационного притяжения.



Если частицы взаимодействуют друг с другом с силами, которые убывают с увеличением расстояния так же, как и силы всемирного тяготения, но превышают силы тяготения во много раз, то говорят, что эти частицы имеют электрический заряд. Сами частицы называются заряженными.

Бывают частицы без электрического заряда, но не существует электрического заряда без частицы.

Взаимодействие заряженных частиц называется электромагнитным.

Электрический заряд определяет интенсивность электромагнитных взаимодействий, подобно тому как масса определяет интенсивность гравитационных взаимодействий.

Электрический заряд элементарной частицы — это не особый механизм в частице, который можно было бы снять с неё, разложить на составные части и снова собрать. Наличие электрического заряда у электрона и других частиц означает лишь существование определённых силовых взаимодействий между ними.

Мы, в сущности, ничего не знаем о заряде, если не знаем законов этих взаимодействий. Знание законов взаимодействий должно входить в наши представления о заряде. Эти законы непросты, и изложить их в нескольких словах невозможно. Поэтому нельзя дать достаточно удовлетворительное краткое определение понятию электрический заряд.

Два знака электрических зарядов. Все тела обладают массой и поэтому притягиваются друг к другу. Заряженные же тела могут как притягивать, так и отталкивать друг друга. Этот важнейший факт, знакомый вам, означает, что

В природе есть частицы с электрическими зарядами противоположных знаков; в случае зарядов одинаковых знаков частицы отталкиваются, а в случае разных притягиваются.

Заряд элементарных частиц — протонов, входящих в состав всех атомных ядер, называют положительным, а заряд электронов — отрицательным. Между положительными и отрицательными зарядами внутренних различий нет. Если бы знаки зарядов частиц поменялись местами, то от этого характер электромагнитных взаимодействий несколько бы не изменился.

Элементарный заряд. Кроме электронов и протонов, есть ещё несколько типов заряженных элементарных частиц. Но только электроны и протоны могут неограниченно долго существовать в свободном состоянии. Остальные же заряженные частицы живут менее миллионных долей секунды. Они рождаются при столкновениях быстрых элементарных частиц и, просуществовав ничтожно малое время, распадаются, превращаясь в другие частицы. К частицам, не имеющим электрического заряда, относится нейтрон. Его масса лишь незначительно превышает массу протона. Нейтроны вместе с протонами входят в состав атомного ядра. Если элементарная частица имеет заряд, то его значение строго определено.

Заряженные тела. Электромагнитные силы в природе играют огромную роль благодаря тому, что в состав всех тел входят электрически заряженные



частицы. Составные части атомов — ядра и электроны — обладают электрическим зарядом.

Непосредственно действие электромагнитных сил между телами не обнаруживается, так как тела в обычном состоянии электрически нейтральны.

Атом любого вещества нейтрален, так как число электронов в нём равно числу протонов в ядре. Положительно и отрицательно заряженные частицы связаны друг с другом электрическими силами и образуют нейтральные системы.

Макроскопическое тело заряжено электрически в том случае, если оно содержит избыточное количество элементарных частиц с каким-либо одним знаком заряда. Так, отрицательный заряд тела обусловлен избытком числа электронов по сравнению с числом протонов, а положительный — недостатком электронов.

Для того чтобы получить электрически заряженное макроскопическое тело, т. е. наэлектризовать его, нужно отделить часть отрицательного заряда от связанного с ним положительного или перенести на нейтральное тело отрицательный заряд.

Это можно сделать с помощью трения. Если провести расчёской по сухим волосам, то небольшая часть самых подвижных заряженных частиц — электронов перейдёт с волос на расчёску и зарядит её отрицательно, а волосы зарядятся положительно.

### **Тема 3.2 Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона.**

**Цель: Познакомиться с законами сохранения электрического заряда и законом Кулона.**

Приступим к изучению количественных законов электромагнитных взаимодействий. Основной закон электростатики — закон взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел.

Основной закон электростатики был экспериментально установлен Шарлем Кулоном в 1785 г. и носит его имя.

Если расстояние между телами во много раз больше их размеров, то ни форма, ни размеры заряженных тел существенно не влияют на взаимодействия между ними.

Вспомните, что и закон всемирного тяготения тоже сформулирован для тел, которые можно считать материальными точками.

Заряженные тела, размерами и формой которых можно пренебречь при их взаимодействии, называются точечными зарядами.

Сила взаимодействия заряженных тел зависит от свойств среды между заряженными телами. Пока будем считать, что взаимодействие происходит в вакууме. Опыт показывает, что воздух очень мало влияет на силу взаимодействия заряженных тел, она оказывается почти такой же, как и в вакууме.

Опыты Кулона. Идея опытов Кулона аналогична идее опыта Кавендиша по определению гравитационной постоянной. Открытие закона взаимодействия электрических зарядов было облегчено тем, что эти силы оказались велики и благодаря этому не нужно было применять особо чувствительную аппаратуру, как при проверке закона всемирного тяготения в земных условиях. С помощью крутильных весов удалось установить, как взаимодействуют друг с другом неподвижные заряженные тела.

Крутильные весы состоят из стеклянной палочки, подвешенной на тонкой упругой проволочке (рис. 14.3). На одном конце палочки закреплён маленький металлический шарик *a*, а на другом — противовес *c*. Ещё один металлический шарик *b* закреплён неподвижно на стержне, который, в свою очередь, крепится на крышке весов.



При сообщении шарикам одноимённых зарядов они начинают отталкиваться друг от друга. Чтобы удержать их на фиксированном расстоянии,

упругую проволочку нужно закрутить на некоторый угол до тех пор, пока возникшая сила упругости не скомпенсирует кулоновскую силу отталкивания шариков. По углу закручивания проволочки определяют силу взаимодействия шариков.

Крутильные весы позволили изучить зависимость силы взаимодействия заряженных шариков от значений зарядов и от расстояния между ними. Измерять силу и расстояние в то время умели. Единственная трудность была связана с зарядом, для измерения которого не существовало даже единиц. Кулон нашёл простой способ изменения заряда одного из шариков в 2, 4 и более раза, соединяя его с таким же незаряженным шариком. Заряд при этом распределялся поровну между шариками, что и уменьшало исследуемый заряд в известном отношении. Новое значение силы взаимодействия при новом заряде определялось экспериментально.

Закон Кулона. Опыты Кулона привели к установлению закона, поразительно напоминающего закон всемирного тяготения.

Если обозначить модули зарядов через  $|q_1|$  и  $|q_2|$ , а расстояние между ними через  $r$ , то закон Кулона можно записать в следующей форме:

$$F = k \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \quad (14.2)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, численно равный силе взаимодействия единичных зарядов на расстоянии, равном единице длины. Его значение зависит от выбора системы единиц.

Такую же форму (14.2) имеет закон всемирного тяготения, только вместо заряда в закон тяготения входят массы, а роль коэффициента  $k$  играет гравитационная постоянная.

Легко обнаружить, что два заряженных шарика, подвешенные на нитях, либо притягиваются друг к другу, либо отталкиваются. Отсюда следует, что

Силы взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов направлены вдоль прямой, соединяющей эти заряды (рис. 14.4).

### **Тема 3.3 Электрическое поле. Материальность электрического поля.**

#### **Напряженность электрического поля.**

**Цель:** Познакомиться с понятиями электрическое поле, материальностью электрического поля, напряженностью электрического поля.

Закон взаимодействия неподвижных электрических зарядов был установлен экспериментально. Но оставался нерешённым вопрос о том, как осуществляется это взаимодействие.

Близкодействие. Если мы наблюдаем действие одного тела на другое, находящееся на некотором расстоянии от него, то, прежде чем допустить, что это действие прямое и непосредственное, мы склонны сначала исследовать, нет ли между телами какой-либо материальной связи: нитей, стержней и т. д. Если подобные связи есть, то мы объясняем действие одного тела на другое при помощи этих промежуточных звеньев.

Действие на расстоянии (дальнодействие). Так продолжалось до тех пор, пока Ньютон не установил закон всемирного тяготения. Последовавшие успехи в исследовании Солнечной системы настолько захватили воображение учёных, что они вообще в большинстве своём начали склоняться к мысли о бесполезности поисков каких-либо посредников, передающих взаимодействие от одного тела к другому.

Возникла теория прямого действия на расстоянии через пустоту.

Успехи в открытии законов взаимодействия электрических зарядов и токов не были неразрывно связаны с представлением о действии на расстоянии. Ведь опытное исследование самих сил не предполагает наличия определённых представлений о том, как эти силы передаются. В первую очередь нужно было найти математическое выражение для сил, а выяснить их природу можно было и потом.

1. Какая теория — дальнодействия или близкодействия — кажется вам более привлекательной? Почему?

2. Каковы сильные стороны теории дальнего действия по сравнению с теорией ближнего действия?

После длительной борьбы теория ближнего действия одержала окончательную победу

Идеи Фарадея. Решительный поворот к представлению о ближнем действии был сделан великим английским учёным Майклом Фарадеем, а окончательно завершён английским учёным Джеймсом Максвеллом.

По теории дальнего действия один заряд непосредственно чувствует присутствие другого. При перемещении одного из зарядов, например, А (рис. 14.8), сила, действующая на другой заряд — В, мгновенно изменяет своё значение. Причём ни с самим зарядом В, ни с окружающим его пространством никаких изменений не происходит.



Согласно идее Фарадея, электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый из них создаёт в окружающем пространстве электрическое поле.

Поле одного заряда действует на другой заряд, и наоборот. По мере удаления от заряда поле ослабевает. Первоначально эта идея выражала лишь уверенность Фарадея в том, что действие одного тела на другое через пустоту невозможно.

Доказательств существования поля не было. Такие доказательства и нельзя получить, исследуя лишь взаимодействие неподвижных зарядов. Успех к теории ближнего действия пришёл после изучения электромагнитных взаимодействий движущихся заряженных частиц. Вначале было доказано существование переменных во времени полей и только после этого был сделан вывод о реальности электрического поля неподвижных зарядов.

Скорость распространения электромагнитных взаимодействий. Основываясь на идеях Фарадея, Максвелл сумел теоретически доказать, что

электромагнитные взаимодействия должны распространяться в пространстве с конечной скоростью.

Это означает, что, если слегка передвинуть заряд А (см. рис. 14.8), то сила, действующая на заряд В, изменится, но не в то же мгновение, а лишь спустя некоторое время:

$$t = \frac{AB}{c} \quad (14.6)$$

где АВ — расстояние между зарядами, а с — скорость распространения электромагнитных взаимодействий, которая равна скорости света в вакууме, т. е. примерно 300 000 км/с. При перемещении заряда А электрическое поле вокруг заряда В изменится спустя время t. Значит, между зарядами в вакууме происходит какой-то процесс, в результате которого взаимодействие между ними распространяется с конечной скоростью. Правда, эксперимент по проверке равенства (14.6) при перемещении зарядов трудно осуществить из-за большого значения скорости с. Но в этом сейчас, после изобретения радио, нет нужды, электромагнитное поле обнаруживает себя как нечто реально существующее.

Что такое электрическое поле? Мы знаем, что электрическое поле существует реально: его свойства можно исследовать опытным путём. Но мы не можем сказать, из чего это поле состоит. Здесь мы доходим до границы того, что известно науке.

Дом состоит из кирпичей, плит и других материалов, которые, в свою очередь, состоят из молекул, молекулы — из атомов, атомы — из элементарных частиц. Более же простых образований, чем элементарные частицы, мы не знаем. Так же обстоит дело и с электрическим полем: ничего более простого, чем поле, мы не знаем.

Электрическое поле — это особое состояние материи, которое нельзя обнаружить нашими органами чувств. Его можно обнаружить, лишь помещая в него электрические заряды.

При изучении электрического поля мы сталкиваемся с особым видом материи, движение которой не подчиняется законам механики Ньютона. С открытием электрического поля впервые за всю историю науки появилась глубокая идея: существуют различные виды материи и каждому из них присущи свои свойства.

Главное свойство электрического поля — действие его на электрические заряды с некоторой силой.

По действию на заряд устанавливают факт существования поля, распределение его в пространстве, изучают все его характеристики.

Электрическое поле, созданное неподвижными зарядами, называют электростатическим.

Оно не меняется со временем. Электростатическое поле создаётся только электрическими зарядами. Оно существует в пространстве, окружающем эти заряды, и неразрывно с ними связано.

Если поле изменяется со временем, то такое поле называют переменным.

Многие свойства статических и переменных полей совпадают. Однако имеются между ними и существенные различия. Говоря о свойствах поля, мы будем называть это поле просто электрическим, если данное свойство в равной мере присуще как статическим, так и переменным полям.

### **Тема 3.4 Электростатическое поле точечного заряда. Напряженность точечного заряда.**

**Цель: Познакомиться с понятиями электростатического поля точечного заряда, напряженностью точечного заряда.**

Напряжённость поля точечного заряда. Найдём напряжённость электрического поля, создаваемого точечным зарядом  $q_0$ . По закону Кулона этот заряд будет действовать на положительный заряд  $q$  с силой  $F = k \frac{|q_0|q}{r^2}$ .

Модуль напряжённости поля точечного заряда  $q_0$  на расстоянии  $r$  от него равен:

$$E = \frac{F}{q} = k \frac{|q_0|}{r^2} \quad (14.9)$$

Вектор напряжённости в любой точке электрического поля направлен вдоль прямой, соединяющей эту точку и заряд (рис. 14.14), и совпадает с силой, действующей на точечный

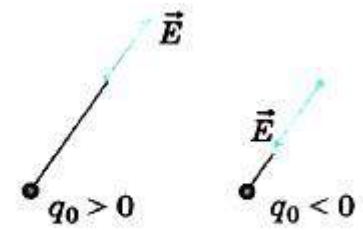
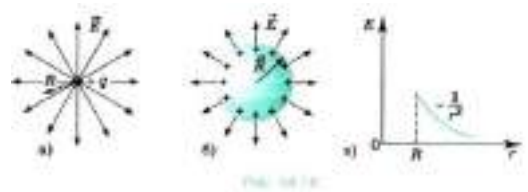


Рис. 14.14

положительный заряд, помещённый в данную точку. Силовые линии электрического поля точечного заряда, как следует из соображений симметрии, направлены вдоль радиальных линий (рис. 14.15, а).

Поле заряженного шара. Рассмотрим теперь вопрос об электрическом поле заряженного проводящего шара радиусом  $R$ . Заряд  $q$  равномерно распределён по поверхности шара. Силовые линии электрического поля, также из соображений симметрии, направлены вдоль продолжений радиусов шара (рис. 14.15, б).



Распределение в пространстве силовых линий электрического поля шара с зарядом  $q$  на расстояниях  $r \geq R$  от центра шара аналогично распределению силовых линий поля точечного заряда  $q$  (см. рис. 14.15, а). Следовательно, на расстоянии  $r \geq R$  от центра шара напряжённость поля определяется той же формулой (14.9), что и напряжённость поля точечного заряда, помещённого в центре сферы:

Внутри проводящего шара ( $r < R$ ) напряжённость поля равна нулю.

### Тема 3.5 Потенциал точечного заряда. Работа электростатического поля.

**Цель: Научиться с понятиями потенциала точечного заряда, работы электростатического поля.**

Напряжённость электрического поля.

Электрическое поле обнаруживается по силам, действующим на заряд. Можно утверждать, что мы знаем о поле всё, что нам нужно, если будем знать



силу, действующую на любой заряд в любой точке поля. Поэтому надо ввести такую характеристику поля, знание которой позволит определить эту силу.

Если поочерёдно помещать в одну и ту же точку поля небольшие заряженные тела и измерять силы, то обнаружится, что сила, действующая на заряд со стороны поля, прямо пропорциональна этому заряду. Действительно, пусть поле создаётся точечным зарядом  $q_1$ . Согласно закону Кулона (14.2) на точечный заряд  $q$  действует сила, пропорциональная заряду  $q$ . Поэтому отношение силы, действующей на помещаемый в данную точку поля заряд, к этому заряду для каждой точки поля не зависит от заряда и может рассматриваться как характеристика поля.

Отношение силы, действующей на помещаемый в данную точку поля точечный заряд, к этому заряду, называется напряжённостью электрического поля. Подобно силе, напряжённость поля — векторная величина; её обозначают буквой  $\vec{E}$ :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (14.7)$$

Отсюда сила, действующая на заряд  $q$  со стороны электрического поля, равна:

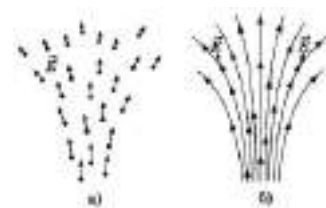
$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (14.8)$$

Направление вектора  $\vec{E}$  совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, и противоположно направлению силы, действующей на отрицательный заряд.

Единица напряжённости в СИ —  $\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ .

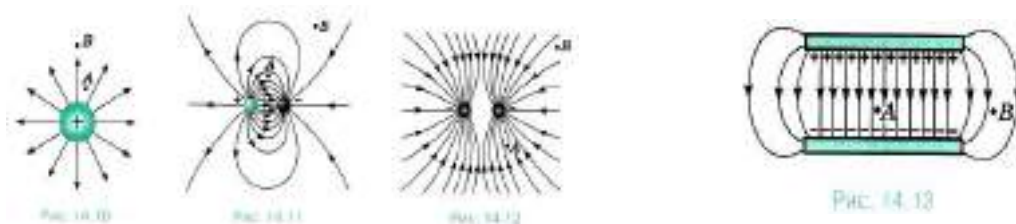
Силовые линии электрического поля.

Электрическое поле не действует на органы чувств. Его мы не видим. Однако мы можем получить некоторое представление о распределении поля, если нарисуем векторы напряжённости поля в нескольких точках пространства (рис. 14.9, а). Картина будет более наглядной, если нарисовать непрерывные линии. Линии, касательная в каждой точке которых совпадает с вектором



напряжённости электрического поля, называют силовыми линиями или линиями напряжённости поля (рис. 14.9, б).

Направление силовых линий позволяет определить направление вектора напряжённости в различных точках поля, а густота (число линий на единицу площади) силовых линий показывает, где напряжённость поля больше. Так, на рисунках 14.10—14.13 густота силовых линий в точках А больше, чем в точках В. Очевидно, что  $\vec{E}_A > \vec{E}_B$ .



Силовые линии можно сделать видимыми. Если продолговатые кристаллики изолятора (например, хинина) хорошо перемешать в вязкой жидкости (например, в касторовом масле) и поместить туда заряженные тела, то вблизи этих тел кристаллики выстроятся в цепочки вдоль линий напряжённости.

На рисунках приведены примеры линий напряжённости: положительно заряженного шарика (см. рис. 14.10), двух разноимённо заряженных шариков (см. рис. 14.11), двух одноимённо заряженных шариков (см. рис. 14.12), двух пластин, заряды которых равны по модулю и противоположны по знаку (см. рис. 14.13). Последний пример особенно важен.

На рисунке 14.13 видно, что в пространстве между пластинами силовые линии в основном параллельны и находятся на равных расстояниях друг от друга: электрическое поле здесь одинаково во всех точках.

Электрическое поле, напряжённость которого одинакова во всех точках, называется однородным.

В ограниченной области пространства электрическое поле можно считать приближённо однородным, если напряжённость поля внутри этой области меняется незначительно.

Силовые линии электрического поля не замкнуты, они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных. Силовые линии непрерывны и не пересекаются, так как пересечение означало бы отсутствие определённого направления напряжённости электрического поля в данной точке.

### **Тема 3.6 Энергия заряженного тела в электрическом поле. Разность потенциалов. Связь между напряженностью и напряжением.**

**Цель: Познакомиться с понятиями энергии заряженного тела в электрическом поле и разности потенциалов.**

Заряженные тела притягивают или отталкивают друг друга. При перемещении заряженных тел, например, листочков электроскопа, действующие на них силы совершают работу. Из механики известно, что система, способная совершить работу благодаря взаимодействию тел друг с другом, обладает потенциальной энергией. Значит, система заряженных тел обладает потенциальной энергией, называемой электростатической или электрической.

Энергия взаимодействия электронов с ядром в атоме и энергия взаимодействия атомов друг с другом в молекулах (химическая энергия) — это в основном электрическая энергия.

С точки зрения теории близкодействия на заряд непосредственно действует электрическое поле, созданное другим зарядом. При перемещении заряда действующая на него со стороны поля сила совершает работу. (В дальнейшем для краткости будем говорить просто о работе поля.) Поэтому можно утверждать, что заряженное тело в электрическом поле обладает энергией. Найдём потенциальную энергию заряда в однородном электрическом поле.

Работа при перемещении заряда в однородном электростатическом поле. Однородное поле создают, например, большие параллельные металлические

пластины, имеющие заряды противоположного знака. Это поле действует на заряд  $q$  с постоянной силой  $\vec{F} = q\vec{E}$ , подобно тому как Земля действует с постоянной силой  $\vec{F} = m\vec{g}$  на камень вблизи её поверхности.

Пусть пластины расположены вертикально (рис. 14.31), левая пластина В заряжена отрицательно, а правая — положительно. Вычислим работу, совершаемую полем при перемещении положительного заряда  $q$  из точки 1, находящейся на расстоянии  $d_1$  от левой пластины, в точку 2, расположенную на расстоянии  $d_2$  от неё. Точки 1 и 2 лежат на одной силовой линии. Электрическое поле при перемещении заряда совершит положительную работу:

$$A = qE(d_1 - d_2) = qE\Delta d \quad (14.12)$$

Работа по перемещению заряда в электрическом поле не зависит от формы траектории, подобно тому как не зависит от формы траектории работа силы тяжести.

Докажем это непосредственным расчётом.

Пусть перемещение заряда происходит по кривой (рис. 14.32). Разобьём эту кривую на малые перемещения. Сила, действующая на заряд, остаётся постоянной (поле однородно),

а угол  $\alpha$  между направлением силы и направлением перемещения будет изменяться. Работа на малом перемещении  $\Delta\vec{s}$  равна  $\Delta A = qE|\Delta\vec{s}|\cos\alpha$ . Очевидно, что  $|\Delta\vec{s}|\cos\alpha = \Delta d$  — проекция малого перемещения на горизонтальное направление. Суммируя работы на малых перемещениях, получаем  $A = qEd$ .

С помощью аналогичных рассуждений можно вывести формулу для работы кулоновской силы при перемещении заряда  $q_0$  из точки 1 в точку 2 в неоднородном поле неподвижного точечного заряда  $q$ . При этом должно быть



Рис. 14.31



Рис. 14.32

учтено, что сила  $F = k \frac{q_0 q}{r^2}$  зависит от расстояния до точечного заряда  $q$ . Для работы кулоновской силы в поле точечного заряда  $q$  справедливо выражение

$$A = kq_0q \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{q_0q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Мы видим, что работа зависит только от положения начальной ( $r_1$ ) и конечной ( $r_2$ ) точек траектории и не зависит от формы траектории.

Электростатическая сила, действующая на заряды, является так же, как и силы тяжести, тяготения и упругости, консервативной силой.

Потенциальная энергия. Поскольку работа электростатической силы не зависит от формы траектории точки её приложения, сила является консервативной, и её работа согласно формуле (5.22) равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком:

$$A = -(W_{п2} - W_{п1}) = -\Delta W_{п} \quad (14.13)$$

Сравнивая полученное выражение (14.12) с общим определением потенциальной энергии (14.13), видим, что  $\Delta W_{п} = W_{п2} - W_{п1} = -qEd$ . Считаем, что в точке 2 потенциальная энергия равна нулю. Тогда потенциальная энергия заряда в однородном электростатическом поле равна:

$$W_{п} = qEd, \quad (14.14)$$

где  $d$  — расстояние от точки 2 до любой точки, находящейся с точкой 2 на одной силовой линии.

Теперь получим формулу для потенциальной энергии заряда, находящегося в поле точечного заряда. Изменение потенциальной энергии заряда  $q_0$  при перемещении из точки 1 в точку 2 в неоднородном поле неподвижного точечного заряда  $q$  равно работе консервативной силы, взятой с обратным знаком:

$$\Delta W_{п} = -A = W_{п2} - W_{п1} = -\frac{q_0q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Если считать, что в бесконечно удалённой точке потенциальная энергия равна нулю (при  $r_2 \rightarrow \infty, W_{п2} \rightarrow 0$ ), то потенциальная энергия заряда  $q_0$  в некоторой точке, находящейся на расстоянии  $r$  от точечного заряда  $q$ ,

создающего поле:  $W_{\text{п}} = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$ . Потенциальная энергия прямо пропорциональна заряду  $q_0$ , внесённому в поле.

Отметим, что формула (14.14) подобна формуле  $W_{\text{п}} = mgh$  для потенциальной энергии тела. Но заряд  $q$  в отличие от массы может быть как положительным, так и отрицательным.

Если поле совершает положительную работу, то потенциальная энергия заряженного тела при его свободном перемещении в поле в точку 2 уменьшается:  $\Delta W_{\text{п}} < 0$ . Одновременно согласно закону сохранения энергии растёт его кинетическая энергия. И наоборот, если работа отрицательна (например, при свободном движении положительно заряженной частицы в направлении, противоположном направлению вектора напряжённости поля  $E$ ; это движение подобно движению камня, брошенного вверх), то  $\Delta W_{\text{п}} > 0$ . Потенциальная энергия растёт, а кинетическая энергия уменьшается; частица тормозится.

На замкнутой траектории, когда заряд возвращается в начальную точку, работа поля равна нулю:

$$A = -\Delta W_{\text{п}} = -(W_{\text{п}2} - W_{\text{п}1}) = 0.$$

Это — свойство полей консервативных сил.

### **Тема 3.7 Принцип суперпозиции электрических полей.**

**Напряженность системы зарядов. Потенциал системы зарядов.**

**Цель: Познакомиться с принципом суперпозиции электрических полей, понятиями напряженности системы зарядов и потенциала системы зарядов.**

Принцип суперпозиции полей. Если на тело действует несколько сил, то согласно законам механики, результирующая сила равна геометрической сумме этих сил:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots$$

На электрические заряды действуют силы со стороны электрического поля. Если при наложении полей от нескольких зарядов эти поля не оказывают никакого влияния друг на друга, то результирующая сила со стороны всех полей должна быть равна геометрической сумме сил со стороны каждого поля. Опыт показывает, что именно так и происходит на самом деле. Это означает, что напряжённости полей складываются геометрически.

В этом состоит принцип суперпозиции полей.

Согласно принципу суперпозиции полей для нахождения напряжённости поля системы заряженных частиц, в любой точке достаточно знать выражение (14.9) для напряжённости поля точечного заряда. Для определения направления векторов напряжённостей полей отдельных зарядов мысленно помещаем в выбранную точку положительный заряд.

На рисунке 14.16 показано, как определяется напряжённость поля  $\vec{E}$  в точке А, созданного двумя точечными зарядами  $q_1$  и  $q_2$ .

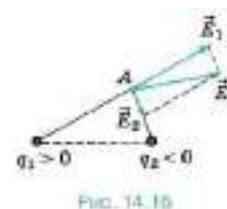


Рис. 14.16

В механике взаимное действие тел друг на друга характеризуют силой и потенциальной энергией. Электростатическое поле, осуществляющее взаимодействие между зарядами, также характеризуют двумя величинами. Напряжённость поля — это силовая характеристика. Теперь введём энергетическую характеристику — потенциал.

Потенциал поля. Работа любого электростатического поля при перемещении в нём заряженного тела из одной точки в другую также не зависит от формы траектории, как и работа однородного поля.

На замкнутой траектории работа электростатического поля всегда равна нулю. Поле, работа которого по перемещению заряда по замкнутой траектории всегда равна нулю, называют потенциальным.

Потенциальный характер, в частности, имеет электростатическое поле точечного заряда.

Работу потенциального поля можно выразить через изменение потенциальной энергии. Формула  $A = -(W_{п2} - W_{п1})$  справедлива для любого электростатического поля. Но только в случае однородного поля потенциальная энергия выражается формулой (14.14).

Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле пропорциональна заряду. Это справедливо как для однородного поля (см. формулу (14.14)), так и для неоднородного. Следовательно, отношение потенциальной энергии к заряду не зависит от помещённого в поле заряда.

Это позволяет ввести новую количественную характеристику поля — потенциал, не зависящую от заряда, помещённого в поле.

Для определения значения потенциальной энергии, как мы знаем, необходимо выбрать нулевой уровень её отсчёта. При определении потенциала поля, созданного системой зарядов, как правило, предполагается, что потенциал в бесконечно удалённой точке поля равен нулю.

Потенциалом точки электростатического поля называют отношение потенциальной энергии заряда, помещённого в данную точку, к этому заряду.

Согласно данному определению потенциал равен:

$$\varphi = \frac{W_{п}}{q} (W_{п} \rightarrow 0, r \rightarrow \infty) \quad (14.15)$$

Из этой формулы следует, что потенциал поля неподвижного точечного заряда  $q$  в данной точке поля, находящейся на расстоянии  $r$  от заряда, равен:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}.$$

Напряжённость поля  $\vec{E}$  — векторная величина. Она представляет собой силовую характеристику поля, которая определяет силу, действующую на заряд  $q$  в данной точке поля. А потенциал  $\varphi$  — скаляр, это энергетическая характеристика поля; он определяет потенциальную энергию заряда  $q$  в данной точке поля.

Если в примере с двумя заряженными пластинами в качестве точки с нулевым потенциалом выбрать точку на отрицательно заряженной пластине



(см. рис. 14.31), то согласно формулам (14.14) и (14.15) потенциал однородного поля в точке, отстоящей на расстоянии  $d$  от неё, равен:

$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{q} = Ed \quad (14.16)$$

Разность потенциалов. Подобно потенциальной энергии, значение потенциала в данной точке зависит от выбора нулевого уровня для отсчёта потенциала, т. е. от выбора точки, потенциал которой принимается равным нулю. Важно изменение потенциала не зависит от выбора нулевого уровня отсчёта потенциала.

Работа сил поля равна:

$$A = -(W_{\text{п}2} - W_{\text{п}1}) = -q(\varphi_2 - \varphi_1) = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU \quad (14.17)$$

Здесь

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 \text{ —} \quad (14.18)$$

разность потенциалов, т. е. разность значений потенциала в начальной и конечной точках траектории. Разность потенциалов называют также напряжением.

Согласно формулам (14.17) и (14.18) разность потенциалов между двумя точками оказывается равной:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q} \quad (14.19)$$

Если за нулевой уровень отсчёта потенциала принять потенциал бесконечно удалённой точки поля, то потенциал в данной точке равен отношению работы электростатических сил по перемещению положительного заряда из данной точки в бесконечность к этому заряду.

Единица разности потенциалов. Единицу разности потенциалов устанавливают с помощью формулы (14.19). В Международной системе единиц работу выражают в джоулях, а заряд — в кулонах.

Разность потенциалов между двумя точками численно равна единице, если при перемещении заряда в 1 Кл из одной точки в другую электрическое поле совершает работу в 1 Дж. Эту единицу называют вольт (В):  $1 \text{ В} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$ .

Выразим единицу разности потенциалов через основные единицы СИ.

Так как

$$1 \text{ В} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$$

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

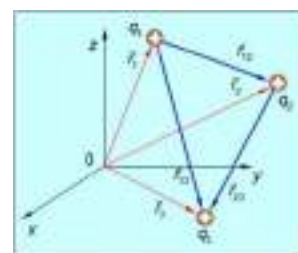
$$1 \text{ Кл} = \text{А} \cdot \text{с}$$

$$1 \text{ В} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{с}^3}$$

### Тема 3.8 Потенциальная энергия системы зарядов.

**Цель:** Познакомиться с понятиями потенциальной энергии системы зарядов.

Система заряженных тел обладает потенциальной энергией. Рассмотрим сначала два заряда  $q_1$  и  $q_2$  находящиеся на расстоянии  $r_{12}$  (рис. 2.19). При удалении одного из зарядов на бесконечность сила взаимодействия между ними уменьшается до нуля.



Для сближения зарядов на расстояние  $r_{12}$  необходимо совершить работу, которая идет на изменение потенциальной энергии системы. Пусть заряд  $q_1$  из бесконечности приближается к заряду  $q_2$  на расстояние  $r_{12}$ . Работа по его перемещению равна:

$$A_1 = q_1 \varphi_1 \quad (2.32)$$

где  $\varphi_1$  — потенциал поля, создаваемого зарядом  $q_2$  в той точке, в которую перемещается заряд  $q_1$ , т. е.

$$A_1 = q_1 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r_{12}} \quad (2.33)$$

Аналогично, можно считать, что из бесконечно удаленной точки приближался заряд  $q_2$ :

$$A_1 = q_2 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_{12}} \quad (2.34)$$

Результаты оказались одинаковыми, поскольку одинаково конечное расположение зарядов. Следовательно, потенциальная энергия взаимодействия двух зарядов равна:

$$W = A_1 = A_2 = q_1 \varphi_1 = q_2 \varphi_2 \quad (2.35)$$

или в симметричной форме:

$$W = \frac{1}{2} (q_1 \varphi_1 + q_2 \varphi_2) \quad (2.36)$$

Теперь добавим к системе зарядов  $q_1$  и  $q_2$  третий заряд  $q_3$  (рис. 2.19), переносимый из бесконечности в точку, находящуюся от заряда  $q_1$  на расстоянии  $r_{13}$  и от заряда  $q_2$  на расстоянии  $r_{23}$ . Соответствующая работа будет равна:

$$A_3 = q_3 \varphi_3 = q_3 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_1}{r_{13}} + \frac{q_2}{r_{23}} \right) \quad (2.37)$$

где  $\varphi_3$  — потенциал, создаваемый зарядами  $q_1$  и  $q_2$  в точке, где находится заряд  $q_3$ .

Потенциальная энергия взаимодействия трех зарядов равна:

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}} + q_3 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_1}{r_{13}} + \frac{q_2}{r_{23}} \right) \quad (2.38)$$

Перепишем полученное соотношение в виде:

$$W = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( q_1 \left( \frac{q_2}{r_{12}} + \frac{q_3}{r_{13}} \right) + q_2 \left( \frac{q_1}{r_{12}} + \frac{q_3}{r_{23}} \right) + q_3 \left( \frac{q_1}{r_{13}} + \frac{q_2}{r_{23}} \right) \right) \quad (2.39)$$

или в симметричной форме

$$W = \frac{1}{2} (q_1 \varphi_1 + q_2 \varphi_2 + q_3 \varphi_3) \quad (2.40)$$

Ясно, что для произвольной системы зарядов имеем

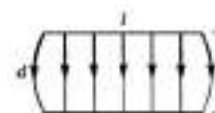
$$W = \frac{1}{2} \sum_i q_i \varphi_i \quad (2.41)$$

где  $\varphi_i$  — потенциал в точке, где находится заряд  $q_i$ , создаваемый всеми остальными зарядами, кроме  $q_i$ .

### Тема 3.9 Однородное электростатическое поле. Напряженность однородного электростатического поля.

**Цель: Познакомиться с понятиями однородного электростатического поля, напряженности однородного электростатического поля.**

Однородным электростатическим полем называется поле, в каждой точке которого вектор напряженности  $\vec{E}$  имеет одинаковое направление и модуль, т.е.  $\vec{E} = const$ . Однородное электростатическое поле изображается параллельными линиями напряженности с одинаковой плотностью. Однородным является электростатическое поле между двумя разноименно заряженными пластинами (поле конденсатора) (рис. 10), если расстояние  $d$  между пластинами намного меньше линейных размеров пластин ( $d \ll 1$ ). На краях пластин линии напряженности искривляются и поле не является однородным.



Связь между напряжением и напряжённостью однородного электростатического поля. Термин «напряжение» ввёл в 1792 г. Вольта. Отметим, что для электростатических полей понятия «электрическое напряжение» и «разность потенциалов» тождественны.

Работа, совершаемая силой однородного электростатического поля напряжённостью  $\vec{E}$  при перемещении пробного положительного заряда  $q_0$  из точки 1 с потенциалом  $\varphi_1$  в точку 2 с потенциалом  $\varphi_2 < \varphi_1$ , может быть определена в соответствии с выражением

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (22.1)$$

а в соответствии с выражением

$$A_{12} = q_0 E d,$$

где  $d$  — модуль перемещения заряда вдоль линии напряжённости однородного электростатического поля.

Приравнявая соответствующие части равенств, найдём выражение, устанавливающее связь между модулем напряжённости однородного

электростатического поля и разностью потенциалов, т. е. между двумя характеристиками электростатического поля:  $q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0Ed$ , откуда

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = -\frac{\Delta\varphi_{12}}{d} \quad (22.2)$$

Из выражения (22.2) следует: чем больше разность потенциалов между двумя точками однородного электростатического поля, тем больше модуль напряжённости поля. Если разность потенциалов равна нулю (потенциал поля не меняется), то модуль напряжённости поля также равен нулю.

### **Тема 3.10 Разность потенциалов однородного электростатического поля.**

**Цель: Научиться решать задачи на разность потенциалов однородного электростатического поля.**

Принимая во внимание, что  $U_{12} = -\Delta\varphi_{12}$ , получим:

$$E = \frac{U_{12}}{d} \quad (22.3)$$

На основании формулы (22.3) вводят единицу напряжённости СИ вольт на метр  $\left(\frac{\text{В}}{\text{м}}\right)$ .  $1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$  — модуль напряжённости такого однородного электростатического поля, в котором напряжение между двумя точками, находящимися на одной и той же линии напряжённости на расстоянии 1 м, составляет 1 В.

Используя термин «напряжение», на практике точки 1 и 2 поля выбирают так, чтобы  $U_{12} > 0$ .

### **Тема 3.11 Проводники в электростатическом поле. Диэлектрики в электростатическом поле. Виды диэлектриков.**

**Цель: Познакомиться с видами проводников и диэлектриков в электростатическом поле.**

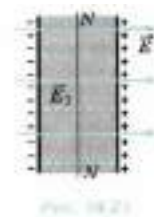
В металлах носителями свободных зарядов являются электроны. При образовании кристаллической решётки металла электроны внешних оболочек

атомов полностью утрачивают связи со своими атомами и становятся «собственностью» всего проводника в целом. В результате образовавшиеся положительно заряженные ионы оказываются окружёнными отрицательно заряженным «газом», образованным коллективизированными электронами.

Свободные электроны участвуют в тепловом движении и могут перемещаться по металлу в любом направлении. Заряженные частицы, способные свободно перемещаться в проводнике под влиянием электрического поля, называются свободными зарядами.

Электростатическое поле внутри проводника. Наличие в проводнике свободных зарядов приводит к тому, что даже при наличии внешнего электрического поля внутри проводника напряжённость поля равна нулю. Если бы напряжённость электрического поля была отлична от нуля, то поле приводило бы свободные заряды в упорядоченное движение, т. е. в проводнике существовал бы электрический ток.

На примере незаряженной проводящей пластины (проводника), внесённой в однородное поле, выясним, в результате какого процесса напряжённость электростатического поля внутри проводника оказывается равной нулю (рис. 14.21). Силовые линии поля изображены сплошными линиями.



В первый момент (при внесении пластины в поле) возникает электрический ток. Под действием электрического поля электроны пластины начинают перемещаться справа налево. Левая сторона пластины заряжается отрицательно, а правая — положительно (см. рис. 14.21). В этом состоит явление электростатической индукции. (Если, не убирая пластину из поля, разделить её пополам вдоль линии NN (см. рис. 14.21), то обе половины окажутся заряженными.)

Явление разделения зарядов и их распределение по поверхности проводника во внешнем электрическом поле называют электростатической индукцией.

Появившиеся заряды создают своё поле (линии напряжённости этого поля показаны на рисунке 14.21 штриховыми прямыми), которое накладывается на внешнее поле и компенсирует его. За ничтожно малое время заряды перераспределяются так, что напряжённость результирующего поля внутри пластины становится равной нулю и движение зарядов прекращается.

Силовые линии электростатического поля вне проводника в непосредственной близости к его поверхности перпендикулярны поверхности.

Докажем это. Предположим, что какая-то силовая линия не перпендикулярна поверхности проводника (рис. 14.22). Это означает, что касательная составляющая вектора напряжённости электрического поля не равна нулю.



Следовательно, на свободные заряды действует сила, перемещающая их по поверхности проводника. Это перемещение будет происходить до тех пор, пока все силовые линии не станут перпендикулярными поверхности проводника.

Электрический заряд проводников. Внутри проводника при равновесии зарядов не только напряжённость поля равна нулю, равен нулю и заряд. Весь статический заряд проводника сосредоточен на его поверхности. В самом деле, если бы внутри проводника имелся заряд, то вблизи заряда имелось бы и поле. Но электростатического поля внутри проводника нет. Следовательно, заряды в проводнике могут располагаться только на его поверхности.

Этот вывод справедлив как для незаряженных проводников в электрическом поле, так и для заряженных.

Диэлектрики в электростатическом поле.

Какое влияние оказывают на электростатическое поле тела, не являющиеся проводниками? Для выяснения этого вопроса надо ближе познакомиться со строением таких тел.

У изолятора или диэлектрика электрические заряды, а точнее, электрически заряженные частицы — электроны и ядра в нейтральных атомах

связаны друг с другом. Они не могут, подобно свободным зарядам проводника, перемещаться под действием электрического поля по всему объёму тела.

Различие в строении проводников и диэлектриков приводит к тому, что они по-разному ведут себя в электростатическом поле. Электрическое поле может существовать внутри диэлектрика.

Чтобы понять, как незаряженный диэлектрик создаёт электрическое поле, сначала познакомимся с электрическими свойствами нейтральных атомов и молекул.

Атомы и молекулы состоят из положительно заряженных частиц — ядер и отрицательно заряженных частиц — электронов. На рисунке 14.23 изображена схема простейшего атома — атома водорода. Положительный заряд атома (заряд ядра) сосредоточен в его центре.

Электрон движется в атоме с большой скоростью. Один оборот вокруг ядра он делает за очень малое время, порядка 10-15 с. Поэтому, например, уже за 10,9 с он успевает совершить миллион оборотов и, следовательно, миллион раз побывать в двух любых точках 1 и 2, расположенных симметрично относительно ядра. Это даёт основание считать, что в среднем по времени центр распределения отрицательного заряда приходится на середину атома, т. е. совпадает с положительно заряженным ядром.

Однако так обстоит дело не всегда. Рассмотрим молекулу поваренной соли  $\text{NaCl}$ . Атом натрия имеет во внешней оболочке один валентный электрон, слабо связанный с атомом. У атома хлора семь валентных электронов. При образовании молекулы единственный валентный электрон натрия захватывается хлором. Оба нейтральных атома превращаются в систему из двух ионов с зарядами противоположных знаков (рис. 14.24). Положительный и отрицательный заряды не распределены теперь симметрично по объёму молекулы: центр распределения положительного заряда приходится на ион натрия, а отрицательного — на ион хлора.



### Тема 3.12 Энергия заряженного тела в электрическом поле. Разность потенциалов. Связь между напряженностью и напряжением.

**Цель:** Познакомиться с понятиями энергии заряженного тела в электрическом поле, разности потенциалов, связи между напряженностью и напряжением.

Заряженные тела притягивают или отталкивают друг друга. При перемещении заряженных тел, например, листочков электроскопа, действующие на них силы совершают работу. Из механики известно, что система, способная совершить работу благодаря взаимодействию тел друг с другом, обладает потенциальной энергией. Значит, система заряженных тел обладает потенциальной энергией, называемой электростатической или электрической.

Энергия взаимодействия электронов с ядром в атоме и энергия взаимодействия атомов друг с другом в молекулах (химическая энергия) — это в основном электрическая энергия.

С точки зрения теории близкодействия на заряд непосредственно действует электрическое поле, созданное другим зарядом. При перемещении заряда действующая на него со стороны поля сила совершает работу. (В дальнейшем для краткости будем говорить просто о работе поля.) Поэтому можно утверждать, что заряженное тело в электрическом поле обладает энергией. Найдём потенциальную энергию заряда в однородном электрическом поле.

Работа при перемещении заряда в однородном электростатическом поле. Однородное поле создают, например, большие параллельные металлические пластины, имеющие заряды противоположного знака. Это поле действует на заряд  $q$  с постоянной силой  $\vec{F} = q\vec{E}$ , подобно тому как Земля действует с постоянной силой  $\vec{F} = m\vec{g}$  на камень вблизи её поверхности.

Пусть пластины расположены вертикально (рис. 14.31), левая пластина В заряжена отрицательно, а правая



Рис. 14.31

— положительно. Вычислим работу, совершаемую полем при перемещении положительного заряда  $q$  из точки 1, находящейся на расстоянии  $d_1$  от левой пластины, в точку 2, расположенную на расстоянии  $d_2$  от неё. Точки 1 и 2 лежат на одной силовой линии. Электрическое поле при перемещении заряда совершит положительную работу:

$$A = qE(d_1 - d_2) = qE\Delta d \quad (14.12)$$

Работа по перемещению заряда в электрическом поле не зависит от формы траектории, подобно тому как не зависит от формы траектории работа силы тяжести.

Докажем это непосредственным расчётом.

Пусть перемещение заряда происходит по кривой (рис. 14.32). Разобьём эту кривую на малые перемещения. Сила, действующая на заряд, остаётся постоянной (поле однородно),



Рис. 14.32

а угол  $\alpha$  между направлением силы и направлением перемещения будет изменяться. Работа на малом перемещении  $\Delta\vec{s}$  равна  $\Delta A = qE|\Delta\vec{s}| \cos \alpha$ . Очевидно, что  $|\Delta\vec{s}| \cos \alpha = \Delta d$  — проекция малого перемещения на горизонтальное направление. Суммируя работы на малых перемещениях, получаем  $A = qEd$ .

С помощью аналогичных рассуждений можно вывести формулу для работы кулоновской силы при перемещении заряда  $q_0$  из точки 1 в точку 2 в неоднородном поле неподвижного точечного заряда  $q$ . При этом должно быть учтено, что сила  $F = k \frac{q_0 q}{r^2}$  зависит от расстояния до точечного заряда  $q$ . Для работы кулоновской силы в поле точечного заряда  $q$  справедливо выражение

$$A = kq_0q \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{q_0q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Мы видим, что работа зависит только от положения начальной ( $r_1$ ) и конечной ( $r_2$ ) точек траектории и не зависит от формы траектории.

Электростатическая сила, действующая на заряды, является так же, как и силы тяжести, тяготения и упругости, консервативной силой.

Потенциальная энергия. Поскольку работа электростатической силы не зависит от формы траектории точки её приложения, сила является консервативной, и её работа согласно формуле (5.22) равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком:

$$A = -(W_{п2} - W_{п1}) = -\Delta W_{п} \quad (14.13)$$

Сравнивая полученное выражение (14.12) с общим определением потенциальной энергии (14.13), видим, что  $\Delta W_{п} = W_{п2} - W_{п1} = -qEd$ . Считаем, что в точке 2 потенциальная энергия равна нулю. Тогда потенциальная энергия заряда в однородном электростатическом поле равна:

$$W_{п} = qEd, \quad (14.14)$$

где  $d$  — расстояние от точки 2 до любой точки, находящейся с точкой 2 на одной силовой линии.

Теперь получим формулу для потенциальной энергии заряда, находящегося в поле точечного заряда. Изменение потенциальной энергии заряда  $q_0$  при перемещении из точки 1 в точку 2 в неоднородном поле неподвижного точечного заряда  $q$  равно работе консервативной силы, взятой с обратным знаком:

$$\Delta W_{п} = -A = W_{п2} - W_{п1} = -\frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Если считать, что в бесконечно удалённой точке потенциальная энергия равна нулю (при  $r_2 \rightarrow \infty, W_{п2} \rightarrow 0$ ), то потенциальная энергия заряда  $q_0$  в некоторой точке, находящейся на расстоянии  $r$  от точечного заряда  $q$ , создающего поле:  $W_{п} = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$ . Потенциальная энергия прямо пропорциональна заряду  $q_0$ , внесённому в поле.

Отметим, что формула (14.14) подобна формуле  $W_{п} = mgh$  для потенциальной энергии тела. Но заряд  $q$  в отличие от массы может быть как положительным, так и отрицательным.

Если поле совершает положительную работу, то потенциальная энергия заряженного тела при его свободном перемещении в поле в точку 2

уменьшается:  $\Delta W_{\text{п}} < 0$ . Одновременно согласно закону сохранения энергии, растёт его кинетическая энергия. И наоборот, если работа отрицательна (например, при свободном движении положительно заряженной частицы в направлении, противоположном направлению вектора напряжённости поля  $E$ ; это движение подобно движению камня, брошенного вверх), то  $\Delta W_{\text{п}} > 0$ . Потенциальная энергия растёт, а кинетическая энергия уменьшается; частица тормозится.

На замкнутой траектории, когда заряд возвращается в начальную точку, работа поля равна нулю:

$$A = -\Delta W_{\text{п}} = -(W_{\text{п1}} - W_{\text{п1}}) = 0.$$

Это — свойство полей консервативных сил.

### **Тема 3.13 Электроёмкость. Единицы электроёмкости. Конденсаторы. Энергия заряженного конденсатора.**

**Цель: Познакомиться с понятиями электроёмкости, видами и характеристиками конденсаторов.**

При электризации двух проводников между ними появляется электрическое поле и возникает разность потенциалов (напряжение). С увеличением заряда проводников электрическое поле между ними усиливается.

В сильном электрическом поле возможен так называемый пробой диэлектрика: между проводниками проскакивает искра, и они разряжаются. Чем меньше увеличивается напряжение и соответственно напряжённость поля между проводниками с увеличением их зарядов, тем больший заряд можно на них накопить.

Физическая величина, характеризующая способность проводников накапливать электрический заряд, называется электроёмкостью.

Напряжение  $U$  между двумя проводниками пропорционально электрическим зарядам, которые находятся на проводниках (на одном  $+q$ , а на другом  $-q$ ). Действительно, если заряды удвоить, то напряжённость

электрического поля станет в 2 раза больше, соответственно в 2 раза увеличится и работа, совершаемая полем при перемещении заряда из одной точки поля в другую, т. е. в 2 раза увеличится напряжение. Поэтому отношение заряда  $q$  одного из проводников к разности потенциалов между проводниками не зависит от заряда. Оно определяется геометрическими размерами проводников, их формой и взаимным расположением, а также электрическими свойствами окружающей среды.

Это позволяет ввести понятие электроёмкости двух проводников.

Электроёмкость уединённого проводника равна отношению заряда проводника к его потенциалу, если все другие проводники бесконечно удалены и потенциал бесконечно удалённой точки равен нулю.

Чем больше электроёмкость, тем больший заряд скапливается на проводниках при одном и том же напряжении. Обратим внимание, что сама электроёмкость не зависит ни от сообщённых проводникам зарядов, ни от возникающего между ними напряжения.

Единицей электроёмкости в СИ является фарад.

1 фарад — это электроёмкость двух проводников в том случае, если при сообщении им зарядов  $+1$  Кл и  $-1$  Кл между ними возникает разность потенциалов 1 В:  $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$ .

Из-за того, что заряд в 1 Кл очень велик, ёмкость 1 Ф оказывается очень большой. Поэтому на практике часто используют доли этой единицы: микрофарад (мкФ) —  $10^{-6}$  Ф и пикофарад (пФ) —  $10^{-12}$  Ф.

Конденсатор

Слово «конденсатор» в переводе на русский язык означает «сгуститель». В данном случае — «сгуститель электрического поля».

Конденсатор представляет собой два проводника, разделённые слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников.

Проводники конденсатора называются обкладками.

Простейший плоский конденсатор состоит из двух одинаковых параллельных пластин, находящихся на малом расстоянии друг от друга (рис. 14.39).



Рис. 14.39

Если заряды пластин одинаковы по модулю и противоположны по знаку, то силовые линии электрического поля начинаются на положительно заряженной обкладке конденсатора и оканчиваются на отрицательно заряженной. Поэтому почти всё электрическое поле сосредоточено внутри конденсатора и однородно.

Для зарядки конденсатора нужно присоединить его обкладки к полюсам источника напряжения, например, к полюсам батареи аккумуляторов. Можно также первую обкладку соединить с полюсом батареи, у которой другой полюс заземлён, а вторую обкладку конденсатора заземлить. Тогда на заземлённой обкладке останется заряд, противоположный по знаку и равный по модулю заряду незаземлённой обкладки. Такой же по модулю заряд уйдёт в землю.

Заземление проводников — это соединение их с землёй (очень большим проводником) с помощью металлических листов в земле, водопроводных труб. Под зарядом конденсатора понимают абсолютное значение заряда одной из обкладок.

Емкость конденсатора определяется формулой (14.22).

Электрические поля окружающих тел почти не проникают внутрь конденсатора и не влияют на разность потенциалов между его обкладками. Поэтому емкость конденсатора практически не зависит от наличия вблизи него каких-либо других тел.

Энергия заряженного конденсатора. Для того чтобы зарядить конденсатор, нужно совершить работу по разделению положительных и отрицательных зарядов. Согласно закону сохранения энергии, эта работа не пропадает, а идёт на увеличение энергии конденсатора. В том, что заряженный конденсатор обладает энергией, можно убедиться, если разрядить его через цепь, содержащую лампу накаливания, рассчитанную на напряжение в

несколько вольт (рис. 14.44). При разрядке конденсатора лампа вспыхивает. Энергия конденсатора превращается в тепло и энергию излучения.

Выведем формулу для энергии плоского конденсатора.

Напряжённость поля, созданного зарядом одной из пластин, равна  $E/2$ , где  $E$  — напряжённость поля в конденсаторе. В однородном поле одной пластины находится заряд  $q$ , распределённый по поверхности другой пластины (рис. 14.45). Согласно формуле (14.14) потенциальная энергия заряда в однородном поле равна:

$$W_{\text{п}} = q \frac{E}{2} d \quad (14.24)$$

где  $q$  — заряд конденсатора, а  $d$  — расстояние между пластинами.

Так как  $Ed = U$ , где  $U$  — разность потенциалов между обкладками конденсатора, то его энергия равна:

$$W_{\text{п}} = \frac{qU}{2} \quad (14.25)$$

Если заряд на пластинах остаётся постоянным, при сближении пластин поле совершает положительную работу:

$$A = W_{\text{п2}} - W_{\text{п1}} = \frac{q(U_2 - U_1)}{2}, U_2 > U_1.$$

При этом энергия электрического поля уменьшается.

Заменив в формуле (14.25) разность потенциалов или заряд с помощью выражения (14.22) для электроёмкости конденсатора, получим

$$W_{\text{п}} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} \quad (14.26)$$

Можно доказать, что эти формулы справедливы для любого конденсатора, а не только для плоского.

Энергия электрического поля. Согласно теории близкодействия, вся энергия взаимодействия заряженных тел сконцентрирована в электрическом поле этих тел. Значит, энергия может быть выражена через основную характеристику поля — напряжённость.

Так как напряжённость электрического поля прямо пропорциональна разности потенциалов ( $U = Ed$ ), то для энергии можно записать формулу

$$W_{\Pi} = \frac{CU^2}{2} = \frac{cE^2d^2}{2}.$$

Энергия конденсатора прямо пропорциональна квадрату напряжённости электрического поля внутри его:  $W_{\Pi} \sim E^2$ .

Применение конденсаторов. Зависимость электроёмкости конденсатора от расстояния между его пластинами используется при создании одного из типов клавиатур компьютера. На тыльной стороне каждой клавиши располагается одна пластина конденсатора, а на плате, расположенной под клавишами, — другая. Нажатие клавиши изменяет ёмкость конденсатора. Электронная схема, подключённая к этому конденсатору, преобразует сигнал в соответствующий код, передаваемый в компьютер.

Энергия конденсатора обычно не очень велика — не более сотен джоулей. К тому же она не сохраняется долго из-за неизбежной утечки заряда. Поэтому заряженные конденсаторы не могут заменить, например, аккумуляторы в качестве источников электрической энергии. Но это совсем не означает, что конденсаторы как накопители энергии не получили практического применения. Конденсаторы могут накапливать энергию более или менее длительное время, а при разрядке через цепь с малым сопротивлением они отдают энергию почти мгновенно. Именно это свойство широко используют на практике.

Лампа-вспышка, применяемая в фотографии, питается электрическим током разряда конденсатора, заряжаемого предварительно специальной батареей. Возбуждение квантовых источников света — лазеров осуществляется с помощью газоразрядной трубки, вспышка которой происходит при разрядке батареи конденсаторов большой электроёмкости. Однако основное применение конденсаторы находят в радиотехнике.



## Тема 3.14 Соединения конденсаторов. Энергия поля конденсаторов.

### Заряженная частица в поле конденсатора.

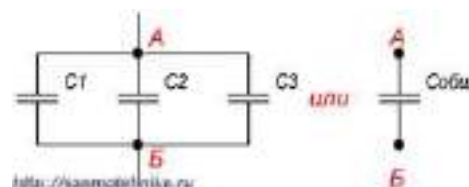
**Цель:** Познакомиться с видами соединений конденсаторов, понятиями энергии поля конденсаторов.

В электрических цепях применяются различные способы соединения конденсаторов. Соединение конденсаторов может производиться: последовательно, параллельно и последовательно-параллельно (последнее иногда называют смешанное соединение конденсаторов). Существующие виды соединения конденсаторов показаны на рисунке 1.



Параллельное соединение конденсаторов.

Если группа конденсаторов включена в цепь таким образом, что к точкам включения непосредственно присоединены пластины всех конденсаторов, то такое соединение называется параллельным соединением конденсаторов (рисунок 2).



При заряде группы конденсаторов, соединенных параллельно, между пластинами всех конденсаторов будет одна и та же разность потенциалов, так как все они заряжаются от одного и того же источника тока. Общее же количество электричества на всех конденсаторах будет равно сумме количеств электричества, помещающихся на каждом из конденсаторов, так как заряд каждого их конденсаторов происходит независимо от заряда других конденсаторов данной группы. Исходя из этого, всю систему параллельно соединенных конденсаторов можно рассматривать как один эквивалентный (равноценный) конденсатор. Тогда общая емкость конденсаторов при параллельном соединении равна сумме емкостей всех соединенных конденсаторов.

Обозначим суммарную емкость соединенных в батарею конденсаторов буквой  $C_{\text{общ}}$  емкость первого конденсатора  $C_1$  емкость второго  $C_2$  и емкость третьего  $C_3$ . Тогда для параллельного соединения конденсаторов будет справедлива следующая формула:

$$C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

Последний знак + и многоточие указывают на то, что этой формулой можно пользоваться при четырех, пяти и вообще при любом числе конденсаторов.

Последовательное соединение конденсаторов.

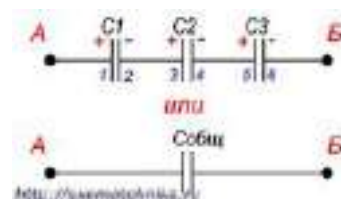
Если же соединение конденсаторов в батарею производится в виде цепочки и к точкам включения в цепь непосредственно присоединены пластины только первого и последнего конденсаторов, то такое соединение конденсаторов называется последовательным (рисунок 3).

При последовательном соединении все конденсаторы заряжаются одинаковым количеством электричества, так как непосредственно от источника

тока заряжаются только крайние пластины (1 и 6), а остальные пластины (2, 3, 4 и 5) заряжаются через влияние. При этом заряд пластины 2 будет равен по величине и противоположен по знаку заряду пластины 1, заряд пластины 3 будет равен по величине и противоположен по знаку заряду пластины 2 и т. д.

Напряжения на различных конденсаторах будут, вообще говоря, различными, так как для заряда одним и тем же количеством электричества конденсаторов различной емкости всегда требуются различные напряжения. Чем меньше емкость конденсатора, тем большее напряжение необходимо для того, чтобы зарядить этот конденсатор требуемым количеством электричества, и наоборот.

Таким образом, при заряде группы конденсаторов, соединенных последовательно, на конденсаторах малой емкости напряжения будут больше, а на конденсаторах большой емкости — меньше.



Аналогично предыдущему случаю можно рассматривать всю группу конденсаторов, соединенных последовательно, как один эквивалентный конденсатор, между пластинами которого существует напряжение, равное сумме напряжений на всех конденсаторах группы, а заряд которого равен заряду любого из конденсаторов группы.

Возьмем самый маленький конденсатор в группе. На нем должно быть самое большое напряжение. Но напряжение на этом конденсаторе составляет только часть общего напряжения, существующего на всей группе конденсаторов. Напряжение на всей группе больше напряжения на конденсаторе, имеющем самую малую емкость. А отсюда непосредственно следует, что общая емкость группы конденсаторов, соединенных последовательно, меньше емкости самого малого конденсатора в группе.

Для вычисления общей емкости при последовательном соединении конденсаторов удобнее всего пользоваться следующей формулой:

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

Для частного случая двух последовательно соединенных конденсаторов формула для вычисления их общей емкости будет иметь вид:

$$C_{\text{общ}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

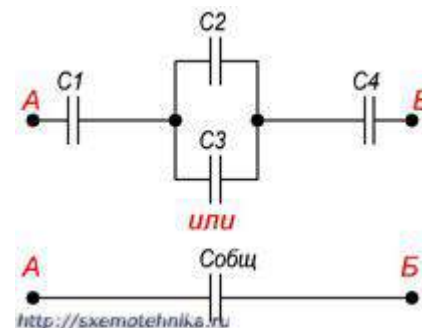
Последовательно-параллельное (смешанное) соединение конденсаторов.

Последовательно-параллельным соединением конденсаторов называется цепь, имеющая в своем составе участки, как с параллельным, так и с последовательным соединением конденсаторов.

На рисунке 4 приведен пример участка цепи со смешанным соединением конденсаторов.

При расчете общей емкости такого участка цепи с последовательно-параллельным соединением конденсаторов этот участок

разбивают на простейшие участки, состоящие только из групп с



последовательным или параллельным соединением конденсаторов. Далее алгоритм расчета имеет вид:

1. Определяют эквивалентную емкость участков с последовательным соединением конденсаторов.

2. Если эти участки содержат последовательно соединенные конденсаторы, то сначала вычисляют их емкость.

3. После расчета эквивалентных емкостей конденсаторов перерисовывают схему. Обычно получается цепь из последовательно соединенных эквивалентных конденсаторов.

4. Рассчитывают емкость полученной схемы.

Движение заряженной частицы в конденсаторе

Если силой тяжести можно пренебречь по сравнению с силой, действующей на заряженную частицу со стороны электрического поля, то её движение в поле конденсатора будет аналогично движению тела, брошенного горизонтально или под углом к горизонту, только роль силы тяжести будет играть сила, действующая на заряженную частицу со стороны электрического поля.

По какой траектории будет двигаться заряженная частица в однородном электрическом поле, если её начальная скорость направлена под углом к линиям напряжённости поля?

При рассмотрении тела, брошенного горизонтально или под углом к горизонту, мы использовали горизонтально направленную ось координат  $x$  и вертикально направленную ось  $y$ . В данном случае также удобно ввести оси координат  $x$  и  $y$ , как показано на рис. 1.

Если начальная скорость частицы направлена горизонтально, направление оси  $y$  удобно выбрать так, чтобы проекция силы, действующей на эту частицу со стороны электрического поля конденсатора, была положительной. Начало координат совместим с начальным положением частицы.

Рассмотрим задачу. Частица с зарядом  $q$  и массой  $m$  влетает в электрическое поле плоского конденсатора в точке, находящейся посередине между пластинами (рис.1). Пластины конденсатора расположены горизонтально. Расстояние между пластинами равно  $d$ , длина пластин  $l$ , напряжение между пластинами  $U$ . Начальная скорость частицы равна по модулю  $v_0$  и направлена горизонтально.

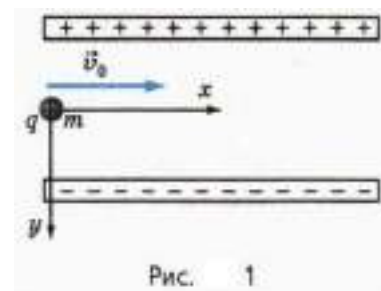


Рис. 1

- а) Чему равны проекции ускорения частицы на оси координат при её движении внутри конденсатора?
- б) Как зависят от времени проекции скорости частицы?
- в) Как зависят от времени координаты частицы?

### Тема 3.15 Постоянный ток. Характеристики электрического тока и электрической цепи.

**Цель: Ознакомиться с понятиями постоянного тока и его характеристиками в электрической цепи.**

Электрический ток — направленное движение заряженных частиц. Благодаря электрическому току освещаются квартиры, приводятся в движение станки, нагреваются конфорки на электроплитах, работает радиоприемник и т. д. Рассмотрим наиболее простой случай направленного движения заряженных частиц — постоянный ток.

При движении заряженных частиц в проводнике происходит перенос электрического заряда из одной точки в другую. Однако если заряженные частицы совершают беспорядочное тепловое движение, как, например, свободные электроны в металле, то переноса заряда не происходит (рис. 15.1, а). Поперечное сечение проводника в среднем пересекает одинаковое число электронов в двух противоположных направлениях. Электрический заряд переносится

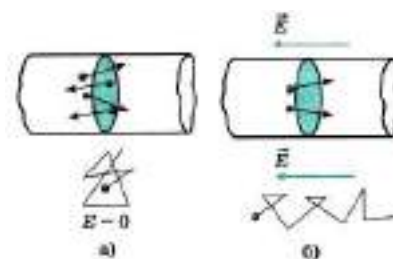


Рис. 15.1

через поперечное сечение проводника лишь в том случае, если наряду с беспорядочным движением электроны участвуют в направленном движении (рис. 15.1, б). В этом случае говорят, что по проводнику идёт электрический ток.

Электрическим током называют упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц. Электрический ток имеет определённое направление. За направление тока принимают направление движения положительно заряженных частиц.

Если перемещать нейтральное в целом тело, то, несмотря на упорядоченное движение огромного числа электронов и атомных ядер, электрический ток не возникнет. Полный заряд, переносимый через любое сечение, будет при этом равным нулю, так как заряды разных знаков перемещаются с одинаковой средней скоростью.

Направление тока совпадает с направлением вектора напряжённости электрического поля. Если ток образован движением отрицательно заряженных частиц, то направление тока считают противоположным направлению движения частиц.

Выбор направления тока не очень удачен, так как в большинстве случаев ток представляет собой упорядоченное движение электронов — отрицательно заряженных частиц. Выбор направления тока был сделан в то время, когда о свободных электронах в металлах ещё ничего не знали.

Действие тока. Движение частиц в проводнике мы непосредственно не видим. О наличии электрического тока приходится судить по тем действиям или явлениям, которые его сопровождают.

Во-первых, проводник, по которому идёт ток, нагревается.

Во-вторых, электрический ток может изменять химический состав проводника: например, выделять его химические составные части (медь из раствора медного купороса и т. д.).

В-третьих, ток оказывает силовое воздействие на соседние токи и намагниченные тела. Это действие тока называется магнитным.

Так, магнитная стрелка вблизи проводника с током поворачивается. Магнитное действие тока в отличие от химического и теплового является основным, так как проявляется у всех без исключения проводников. Химическое действие тока наблюдается лишь у растворов и расплавов электролитов, а нагревание отсутствует у сверхпроводников.

В лампочке накаливания вследствие прохождения электрического тока излучается видимый свет, а электродвигатель совершает механическую работу.

Сила тока. Если в цепи идёт электрический ток, то это означает, что через поперечное сечение проводника всё время переносится электрический заряд.

Заряд, перенесённый в единицу времени, служит основной количественной характеристикой тока, называемой силой тока.

Если через поперечное сечение проводника за время  $\Delta t$  переносится заряд  $\Delta q$ , то среднее значение силы тока равно:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (15.1)$$

Средняя сила тока равна отношению заряда  $\Delta q$ , прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени  $\Delta t$ , к этому промежутку времени.

Если сила тока со временем не меняется, то ток называют постоянным.

Сила переменного тока в данный момент времени определяется также по формуле (15.1), но промежуток времени  $\Delta t$  в таком случае должен быть очень мал.

Сила тока, подобно заряду, — величина скалярная. Она может быть, как положительной, так и отрицательной. Знак силы тока зависит от того, какое из направлений обхода контура принять за положительное. Сила тока  $I > 0$ , если направление тока совпадает с условно выбранным положительным направлением вдоль проводника. В противном случае  $I < 0$ .

### Тема 3.16 Закон Ома для участка цепи и его следствия.

**Цель:** Познакомиться с законом Ома для участка цепи и его следствиями.

Сопротивление

Что заставляет заряды двигаться вдоль проводника?

Как электрическое поле действует на заряды?

Вольт-амперная характеристика. В предыдущем параграфе говорилось, что для существования тока в проводнике необходимо создать разность потенциалов на его концах. Сила тока в проводнике определяется этой разностью потенциалов. Чем больше разность потенциалов, тем больше напряжённость электрического поля в проводнике и, следовательно, тем большую скорость направленного движения приобретают заряженные частицы. Согласно формуле (15.2) это означает увеличение силы тока.

Для каждого проводника — твёрдого, жидкого и газообразного — существует определённая зависимость силы тока от приложенной разности потенциалов на концах проводника.

Зависимость силы тока в проводнике от напряжения, подаваемого на него, называют вольт-амперной характеристикой проводника.

Её находят, измеряя силу тока в проводнике при различных значениях напряжения. Знание вольт-амперной характеристики играет большую роль при изучении электрического тока.

Закон Ома. Наиболее простой вид имеет вольт- амперная характеристика металлических проводников и растворов электролитов. Впервые (для металлов) её установил немецкий учёный Георг Ом, поэтому зависимость силы тока от напряжения носит название закона Ома.

На участке цепи, изображённой на рисунке 15.3, ток направлен от точки 1 к точке 2. Разность потенциалов (напряжение) на концах проводника равна

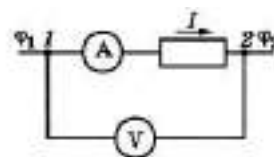


Рис. 15.3



$U = \varphi_1 - \varphi_2$ . Так как ток направлен слева направо, то напряжённость электрического поля направлена в ту же сторону и  $\varphi_1 > \varphi_2$ .

Измеряя силу тока амперметром, а напряжение вольтметром, можно убедиться в том, что сила тока прямо пропорциональна напряжению.

Закон Ома для участка цепи.

Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению  $U$  и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка  $R$ :

$$I = \frac{U}{R} \quad (15.3)$$

Применение обычных приборов для измерения напряжения — вольтметров — основано на законе Ома. Принцип устройства вольтметра такой же, как и у амперметра. Угол поворота стрелки прибора пропорционален силе тока.

Сила тока, проходящего по вольтметру, определяется напряжением между точками цепи, к которой он подключён. Поэтому, зная сопротивление вольтметра, можно по силе тока определить напряжение. На практике прибор градуируют так, чтобы он сразу показывал напряжение в вольтах.

Сопротивление. Основная электрическая характеристика проводника — сопротивление. От этой величины зависит сила тока в проводнике при заданном напряжении.

Свойство проводника ограничивать силу тока в цепи, т. е. противодействовать электрическому току, называют электрическим сопротивлением проводника.

С помощью закона Ома (15.3) можно определить сопротивление проводника:  $R = \frac{U}{I}$ . Для этого нужно измерить напряжение на концах проводника и силу тока в нём.

На рисунке 15.4 приведены графики вольтамперных характеристик двух проводников.

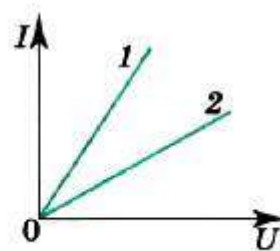


Рис. 15.4

Очевидно, что сопротивление проводника, которому соответствует график 2, больше, чем сопротивление проводника, которому соответствует график 1.

Сопротивление проводника не зависит от напряжения и силы тока.

Сопротивление зависит от материала проводника и его геометрических размеров. Сопротивление проводника длиной  $l$  с постоянной площадью поперечного сечения  $S$  равно:

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (15.4)$$

где  $\rho$  — величина, зависящая от рода вещества и его состояния (от температуры в первую очередь).

Величину  $\rho$  называют удельным сопротивлением проводника.

Удельное сопротивление материала численно равно сопротивлению проводника из этого материала длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м<sup>2</sup>. Единицу сопротивления проводника устанавливают на основе закона Ома и называют её омом. Проводник имеет сопротивление 1 Ом, если при разности потенциалов 1 В сила тока в нём 1 А.

Единицей удельного сопротивления является 1 Ом·м. Удельное сопротивление металлов мало. А вот диэлектрики обладают очень большим удельным сопротивлением. Например, удельное сопротивление серебра  $1,59 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, а стекла порядка  $10^{10}$  Ом·м. В справочных таблицах приводятся значения удельного сопротивления некоторых веществ.

Значение закона Ома. Из закона Ома следует, что при заданном напряжении сила тока на участке цепи тем больше, чем меньше сопротивление этого участка. Если по какой-то причине (нарушение изоляции близко расположенных проводов, неосторожные действия при работе с электропроводкой и пр.) сопротивление между двумя точками, находящимися под напряжением, оказывается очень малым, то сила тока резко возрастает (возникает короткое замыкание), что может привести к выходу из строя электроприборов и даже возникновению пожара.

Именно из-за закона Ома нельзя говорить, что чем выше напряжение, тем оно опаснее для человека. Сопротивление человеческого тела может сильно изменяться в зависимости от условий (влажности, температуры окружающей среды, внутреннего состояния человека), поэтому даже напряжение 10 — 20 В может оказаться опасным для здоровья и жизни человека. Следовательно, всегда необходимо учитывать не только напряжение, но и силу электрического тока. При работе в физической лаборатории нужно строго соблюдать правила техники безопасности!

Закон Ома — основа расчётов электрических цепей в электротехнике.

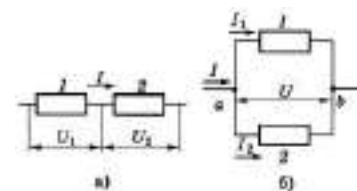
### Тема 3.17 Соединение проводников. Расчет электрических цепей.

**Цель:** Познакомиться с соединениями проводников, научиться рассчитывать электрические цепи.

От источника тока энергия может быть передана по проводам к устройствам, потребляющим энергию: электрической лампе, радиоприёмнику и др. Для этого составляют электрические цепи различной сложности.

К наиболее простым и часто встречающимся соединениям проводников относятся последовательное и параллельное соединения.

**Последовательное соединение проводников.** При последовательном соединении электрическая цепь не имеет разветвлений. Все проводники включают в цепь поочерёдно друг за другом. На рисунке (15.5, а) показано последовательное соединение двух проводников 1 и 2, имеющих сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ . Это могут быть две лампы, две обмотки электродвигателя и др.



Сила тока в обоих проводниках одинакова, т. е.

$$I = I_1 = I_2 \quad (15.5)$$

В проводниках электрический заряд в случае постоянного тока не накапливается, и через любое поперечное сечение проводника за определённое время проходит один и тот же заряд.

Напряжение на концах рассматриваемого участка цепи складывается из напряжений на первом и втором проводниках:

$$U = U_1 + U_2$$

Применяя закон Ома для всего участка в целом и для участков с сопротивлениями проводников  $R_1$  и  $R_2$ , можно доказать, что полное сопротивление всего участка цепи при последовательном соединении равно:

$$R = R_1 + R_2 \quad (15.6)$$

Это правило можно применить для любого числа последовательно соединённых проводников.

Напряжения на проводниках и их сопротивления при последовательном соединении связаны соотношением

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (15.7)$$

Параллельное соединение проводников. На рисунке (15.5, б) показано параллельное соединение двух проводников 1 и 2 сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ . В этом случае электрический ток  $I$  разветвляется на две части. Силу тока в первом и втором проводниках обозначим через  $I_1$  и  $I_2$ .

Так как в точке а — разветвлении проводников (такую точку называют узлом) — электрический заряд не накапливается, то заряд, поступающий в единицу времени в узел, равен заряду, уходящему из узла за это же время. Следовательно,

$$I = I_1 + I_2. \quad (15.8)$$

Напряжение  $U$  на концах проводников, соединённых параллельно, одинаково, так как они присоединены к одним и тем же точкам цепи.

В осветительной сети обычно поддерживается напряжение 220 В. На это напряжение рассчитаны приборы, потребляющие электрическую энергию. Поэтому параллельное соединение — самый распространённый способ соединения различных потребителей. В этом случае выход из строя одного прибора не отражается на работе остальных, тогда как при последовательном соединении выход из строя одного прибора размыкает цепь. Применяя закон

Она для всего участка в целом и для участков проводников сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ , можно доказать, что величина, обратная полному сопротивлению участка  $ab$ , равна сумме величин, обратных сопротивлениям отдельных проводников:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (15.9)$$

Отсюда следует, что для двух проводников

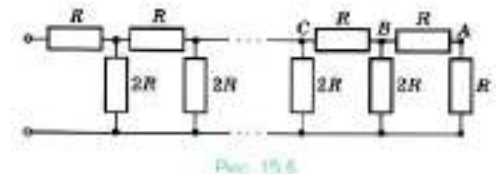
$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (15.10)$$

Напряжения на параллельно соединённых проводниках равны:  $I_1 R_1 = I_2 R_2$ . Следовательно,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (15.11)$$

Обратим внимание на то, что если в какой-то из участков цепи, по которой идёт постоянный ток, параллельно к одному из резисторов подключить конденсатор, то ток через конденсатор не будет идти, цепь на участке с конденсатором будет разомкнута. Однако между обкладками конденсатора будет напряжение, равное напряжению на резисторе, и на обкладках накопится заряд  $q = CU$ .

Рассмотрим цепочку сопротивлений  $R$  —  $2R$ , называемую матрицей (рис. 15.6).



На последнем (правом) звене матрицы напряжение делится пополам из-за равенства сопротивлений, на предыдущем звене напряжение тоже делится пополам, поскольку оно распределяется между резистором сопротивлением  $R$  и двумя параллельными резисторами сопротивлениями  $2R$  и т. д. Эта идея — деления напряжения — лежит в основе преобразования двоичного кода в постоянное напряжение, что необходимо для работы компьютеров.

### Тема 3.18 Работа и мощность постоянного тока. Электродвижущая сила. Закон Ома для полной цепи.

**Цель:** Познакомиться с понятиями работы и мощности постоянного тока, электродвижущая силы, закона Ома для полной цепи.

При упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике электрическое поле совершает работу.

Её принято называть работой тока.

Рассмотрим произвольный участок цепи. Это может быть однородный проводник, например, нить лампы накаливания, обмотка электродвигателя и др. Пусть за время  $\Delta t$  через поперечное сечение проводника проходит заряд  $\Delta q$ . Электрическое поле совершит при этом работу  $A = \Delta q U$  ( $U$  — напряжение между концами участка проводника).

Так как сила тока  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ , то работа тока равна:

$$A = IU\Delta t \quad (15.12)$$

Работа тока на участке цепи равна произведению силы тока, напряжения и времени, в течение которого шёл ток.

Согласно закону сохранения энергии, эта работа должна быть равна изменению энергии рассматриваемого участка цепи. Поэтому энергия, выделяемая на данном участке цепи за время  $\Delta t$ , равна работе тока.

Если на участке цепи не совершается механическая работа и ток не производит химических действий, то происходит только нагревание проводника, т. е. увеличивается внутренняя энергия проводника. Нагретый проводник отдаёт тепло окружающим телам.

Нагревание проводника происходит следующим образом. Электрическое поле ускоряет электроны. В результате столкновения с ионами кристаллической решётки они передают ионам свою энергию. Энергия беспорядочного движения ионов около положений равновесия возрастает. Это и означает увеличение внутренней энергии. Так как температура — мера кинетической энергии тела, то температура проводника повышается, и он

начинает передавать тепло окружающим телам. Спустя некоторое время после замыкания цепи процесс устанавливается, и температура проводника перестаёт изменяться со временем. За счёт работы электрического поля в проводнике непрерывно выделяется энергия. Но его внутренняя энергия остаётся неизменной, так как проводник передаёт окружающим телам количество теплоты, равное работе тока. Таким образом, формула (15.12) для работы тока определяет количество теплоты, передаваемой проводником другим телам.

Если в формуле (15.12) выразить либо напряжение через силу тока, либо силу тока через напряжение с помощью закона Ома для участка цепи, то получим три эквивалентные формулы

$$A = IU\Delta t = I^2 R\Delta t = \frac{U^2}{R}\Delta t = Q \quad (15.13)$$

Формулой  $A = I^2 R\Delta t$  удобно пользоваться при последовательном соединении проводников, так как сила тока в этом случае одинакова во всех проводниках. При параллельном соединении удобна формула  $A = \frac{U^2}{R}\Delta t$ , так как напряжение на всех проводниках одинаково.

Закон Джоуля—Ленца. Закон, определяющий количество теплоты, которую выделяет проводник с током в окружающую среду, был впервые установлен экспериментально английским учёным Д. Джоулем (1818—1889) и русским учёным Э. Х. Ленцем (1804—1865).

Закон Джоуля—Ленца: Количество теплоты, выделяемой в проводнике с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения тока по проводнику:

$$Q = I^2 R\Delta t \quad (15.14)$$

Мы получили этот закон с помощью рассуждений, основанных на законе сохранения энергии. Формула (15.14) позволяет вычислить количество теплоты, выделяемой на любом участке цепи, содержащем какие угодно проводники.

Мощность тока. Любой электрический прибор (лампа, электродвигатель и т. д.) рассчитан на потребление определённой энергии в единицу времени. Поэтому наряду с работой тока очень важное значение имеет понятие мощность тока.

Мощность тока равна отношению работы тока ко времени прохождения тока. Согласно этому определению мощность тока

$$P = \frac{A}{\Delta t} \quad (15.16)$$

Электрическая мощность, так же как и механическая, выражается в ваттах (Вт).

Это выражение для мощности тока можно переписать в нескольких эквивалентных формах, используя закон Ома для участка цепи:

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

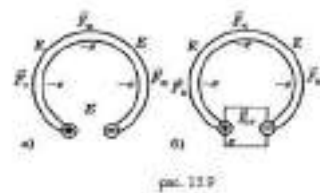
На большинстве электроприборов указана потребляемая ими мощность, предельное значение силы тока, а также предельное значение напряжения.

В быту для расчётов потребляемой электроэнергии часто используется единица кВт · ч,  $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ .

Электродвижущая сила

Любой источник тока характеризуется электродвижущей силой, или сокращённо ЭДС. Так, на круглой батарейке для карманного фонарика написано: 1,5 В. Что это значит?

Если соединить проводником два разноимённо заряженных шарика, то заряды быстро нейтрализуют друг друга, потенциалы шариков станут одинаковыми, и электрическое поле исчезнет (рис. 15.9, а).



Сторонние силы. Для того чтобы ток был постоянным, надо поддерживать постоянное напряжение между шариками. Для этого необходимо устройство (источник тока), которое перемещало бы заряды от одного шарика к другому в направлении, противоположном направлению сил, действующих на



эти заряды со стороны электрического поля шариков. В таком устройстве на заряды, кроме электрических сил, должны действовать силы неэлектростатического происхождения (рис. 15.9, б). Сторонние силы приводят в движение заряженные частицы внутри всех источников тока: в генераторах на электростанциях, в гальванических элементах, аккумуляторах и т. д. При замыкании цепи создаётся электрическое поле во всех проводниках цепи. Внутри источника тока заряды движутся под действием сторонних сил против кулоновских сил (электроны от положительно заряженного электрода к отрицательному), а во внешней цепи их приводит в движение электрическое поле (см. рис. 15.9, б).

Природа сторонних сил. Природа сторонних сил может быть разнообразной. В генераторах электростанций сторонние силы — это силы, действующие со стороны магнитного поля на электроны в движущемся проводнике.

В гальваническом элементе, например, в элементе Вольта, действуют химические силы.

Электродвижущая сила. Действие сторонних сил характеризуется важной физической величиной, называемой электродвижущей силой (сокращённо ЭДС).

Электродвижущая сила источника тока равна отношению работы сторонних сил при перемещении заряда по замкнутому контуру к абсолютной величине этого заряда:

$$\xi = \frac{A_{\text{ст}}}{q} \quad (15.16)$$

Электродвижущую силу, как и напряжение, выражают в вольтах.

Разность потенциалов на клеммах батареи при разомкнутой цепи равна электродвижущей силе. ЭДС одного элемента батареи обычно 1—2 В.

Можно говорить также об электродвижущей силе и на любом участке цепи. Это удельная работа сторонних сил (работа по перемещению единичного заряда) не во всём контуре, а только на данном участке.

Электродвижущая сила гальванического элемента есть величина, численно равная работе сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда внутри элемента от одного полюса к другому.

Работа сторонних сил не может быть выражена через разность потенциалов, так как сторонние силы непотенциальны и их работа зависит от формы траектории перемещения зарядов.

Закон Ома для полной цепи

Сформулируйте закон Ома для участка цепи.

Из каких элементов состоит электрическая цепь?

Для чего служит источник тока?

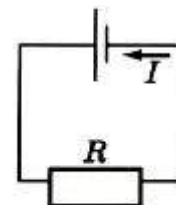


Рис. 15.10

Рассмотрим простейшую полную (т. е. замкнутую) цепь, состоящую из источника тока (гальванического элемента, аккумулятора или генератора) и резистора сопротивлением  $R$  (рис. 15.10). Источник тока имеет ЭДС  $E$  и сопротивление  $r$ .

В генераторе  $r$  — это сопротивление обмоток, а в гальваническом элементе сопротивление раствора электролита и электродов.

Сопротивление источника называют внутренним сопротивлением в отличие от внешнего сопротивления  $R$  цепи.

Закон Ома для замкнутой цепи связывает силу тока в цепи, ЭДС и полное сопротивление цепи  $R + r$ . Эта связь может быть установлена теоретически, если использовать закон сохранения энергии и закон Джоуля—Ленца (15.14).

Пусть за время  $\Delta t$  через поперечное сечение проводника проходит электрический заряд  $\Delta q$ . Тогда работу сторонних сил при перемещении заряда  $\Delta q$  можно записать так:  $A_{\text{ст}} = E\Delta q$ . Согласно определению силы тока (15.1)  $\Delta q = I\Delta t$ . Поэтому

$$A_{\text{ст}} = EI\Delta t \quad (15.17)$$

При совершении этой работы на внутреннем и внешнем участках цепи, сопротивления которых  $r$  и  $R$ , выделяется некоторое количество теплоты. По закону Джоуля—Ленца оно равно:

$$Q = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t \quad (15.18)$$

По закону сохранения энергии  $A_{ст} = Q$ , откуда получаем

$$\xi = IR + Ir. \quad (15.19)$$

Произведение силы тока и сопротивления участка цепи называют падением напряжения на этом участке.

Таким образом, ЭДС равна сумме падений напряжения на внутреннем и внешнем участках замкнутой цепи.

Закон Ома для замкнутой цепи  
Сила тока в замкнутой цепи равна отношению ЭДС источника тока к полному сопротивлению цепи:

$$I = \frac{\xi}{R+r} \quad (15.20)$$

Согласно этому закону сила тока в цепи зависит от трёх величин: ЭДС  $E$  сопротивлений  $R$  внешнего и  $r$  внутреннего участков цепи. Внутреннее сопротивление источника тока не оказывает заметного влияния на силу тока, если оно мало по сравнению с сопротивлением внешней части цепи ( $R \gg r$ ). При этом напряжение на зажимах источника примерно равно ЭДС:

$$U = IR = \xi - Ir \approx \xi$$

При коротком замыкании, когда  $R \approx 0$ , сила тока в цепи  $I_{к.з.} = \frac{\xi}{r}$  и определяется именно внутренним сопротивлением источника и при электродвижущей силе в несколько вольт может оказаться очень большой, если  $r$  мало (например, у аккумулятора  $r \approx 0,1 - 0,001$  Ом). Провода могут расплавиться, а сам источник выйти из строя.

Для определения знака ЭДС любого источника нужно вначале условиться относительно выбора положительного направления обхода контура. На рисунке (15.11) положительным (произвольно) считают направление обхода против часовой стрелки.



Рис. 15.11

Если при обходе цепи данный источник стремится вызвать ток в направлении обхода, то его ЭДС считается положительной:  $\xi > 0$ . Сторонние силы внутри источника совершают при этом положительную работу.

Если же при обходе цепи данный источник вызывает ток против направления обхода цепи, то его ЭДС будет отрицательной:  $\xi < 0$ . Сторонние силы внутри источника совершают отрицательную работу. Так, для цепи, изображённой на рисунке 15.11, при обходе контура против часовой стрелки получаем следующее уравнение:

$$\xi_{\text{п}} = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = |\xi_1| - |\xi_2| + |\xi_3|$$

Если  $\xi_{\text{п}} > 0$ , то согласно формуле (15.20) сила тока  $I > 0$ , т. е. направление тока совпадает с выбранным направлением обхода контура. При  $\xi_{\text{п}} < 0$ , наоборот, направление тока противоположно выбранному направлению обхода контура. Полное сопротивление цепи  $R_{\text{п}}$  равно сумме всех сопротивлений (см. рис. 15.11):

$$R_{\text{п}} = R + r_1 + r_2 + r_3.$$

Для любого замкнутого участка цепи, содержащего несколько источников токов, справедливо следующее правило: алгебраическая сумма падений напряжения равна алгебраической сумме ЭДС на этом участке (второе правило Кирхгофа):  $I_1 R_1 + I_2 R_2 + \dots + I_n R_n = \xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_m$ .

### **Тема 3.19 Магнитное поле. Постоянные магниты и магнитное поле тока. Сила Ампера, сила Лоренца.**

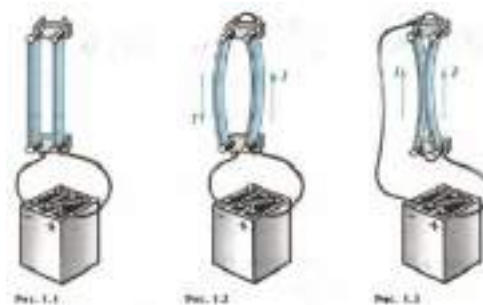
**Цель: Познакомиться с понятиями магнитное поле, постоянные магниты и магнитное поле тока, формулами силы Ампера, силы Лоренца.**

Неподвижные электрические заряды создают вокруг себя электрическое поле. Движущиеся заряды создают, кроме того, магнитное поле.

Между неподвижными электрическими зарядами действуют силы, определяемые законом Кулона. Согласно теории близкодействия, это взаимодействие осуществляется так: каждый из зарядов создает электрическое

поле, которое действует на другой заряд. Однако между электрическими зарядами могут существовать силы и иной природы. Их можно обнаружить с помощью следующего опыта.

Возьмем два гибких проводника, укрепим их вертикально, а затем присоединим нижними концами к полюсам источника тока (рис. 1.1). Притяжения или отталкивания проводников при этом не обнаружится.



Проводники заряжаются от источника тока, но заряды проводников при разности потенциалов между ними в несколько вольт ничтожно малы. Поэтому кулоновские силы никак не проявляются.

Если теперь другие концы проводников замкнуть проволокой так, чтобы в проводниках возникли токи противоположного направления, то проводники начнут отталкиваться друг от друга (рис. 1.2). В случае же токов одного направления проводники притягиваются (рис. 1.3).

Взаимодействия между проводниками с током, т. е. взаимодействия между направленно движущимися электрическими зарядами, называют магнитными. Силы, с которыми проводники с током действуют друг на друга, называют магнитными силами.

### Магнитное поле

Согласно теории близкодействия, подобно тому как в пространстве, окружающем неподвижные электрические заряды, возникает электрическое поле, в пространстве, окружающем токи, возникает поле, называемое магнитным.

Электрический ток в проводнике создает вокруг себя магнитное поле, которое действует на ток в другом проводнике. А поле, созданное электрическим током второго проводника, действует на первый.

Магнитное поле представляет собой особую форму материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между движущимися электрически заряженными частицами.

Перечислим основные свойства магнитного поля, которые установлены экспериментально.

1. Магнитное поле порождается электрическим током (направленно движущимися зарядами).

2. Магнитное поле обнаруживается по действию на электрический ток (на движущиеся заряды).

Подобно электрическому полю, магнитное поле существует реально, независимо от нас, от наших знаний о нем. Экспериментальным доказательством реальности магнитного поля, как и реальности электрического поля, может служить факт существования электромагнитных волн.

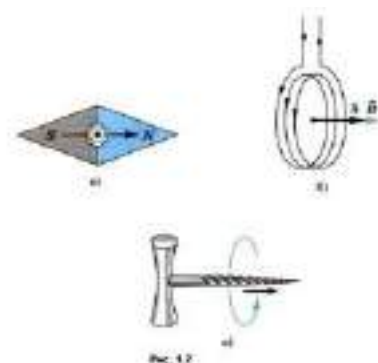
Вектор магнитной индукции. Линии магнитной индукции.

Электрическое поле характеризуется векторной величиной — напряженностью электрического поля. Надо бы ввести также и величину, характеризующую магнитное поле количественно. Дело это непростое, так как магнитные взаимодействия сложнее электрических. Векторную характеристику магнитного поля называют вектором магнитной индукции и обозначают буквой  $\vec{B}$ . Сначала мы рассмотрим вопрос только о направлении вектора  $\vec{B}$ .

Направление вектора магнитной индукции

Ориентирующее действие магнитного поля на магнитную стрелку или рамку с током можно использовать для определения направления вектора магнитной индукции.

За направление вектора магнитной индукции принимается направление, которое показывает северный полюс N магнитной стрелки, свободно устанавливающейся в магнитном поле (рис. 1.7, а). Это направление совпадает с направлением



положительной нормали к замкнутому контуру с током (рис. 1.7, б). Положительная нормаль направлена в ту сторону, куда перемещается буравчик (с правой нарезкой), если вращать его по направлению тока в рамке (рис. 1.7, в).

Используя рамку с током или магнитную стрелку, можно определить направление вектора магнитной индукции в любой точке поля.

На рисунках 1.8, 1.9 показаны опыты с магнитной стрелкой, повторяющие опыты с рамкой (см. рис. 1.5, 1.6).

В магнитном поле прямолинейного проводника с током магнитная стрелка в каждой точке устанавливается по касательной к окружности (см. рис. 1.9). Плоскость такой окружности перпендикулярна проводу, а центр ее лежит на оси провода.



Рис. 1.8

Направление вектора магнитной индукции устанавливают с помощью правила буравчика: если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика указывает направление вектора магнитной индукции.

Модуль вектора магнитной индукции. Сила Ампера

Магнитное поле действует на все участки проводника с током. Зная силу, действующую на каждый малый участок проводника, можно вычислить силу, действующую на весь замкнутый проводник в целом.

Закон, определяющий силу, действующую на отдельный небольшой участок проводника (элемент тока), был установлен в 1820 г. А. Ампером. Так как создать обособленный элемент тока нельзя, то Ампер проводил опыты с замкнутыми проводниками. Меняя форму проводников и их расположение, он сумел установить выражение для силы, действующей на отдельный элемент тока.

Точнее говоря, Ампер установил закон для силы взаимодействия между двумя небольшими участками (элементами) проводников с током. Он был сторонником теории дальнего действия и не пользовался понятием поля. Однако по традиции и в память о заслугах этого ученого выражение для магнитной силы, действующей на проводник с током со стороны магнитного поля, также называют законом Ампера.

Итак, максимальная сила, действующая на отрезок проводника длиной  $\Delta l$ , по которому идет ток, прямо пропорциональна произведению силы тока  $I$  на длину участка  $\Delta l$ :  $F_m \sim I\Delta l$ .

Этот опытный факт можно использовать для определения модуля вектора магнитной индукции. В самом деле, поскольку  $F_m \sim I\Delta l$  то отношение  $\frac{F_m}{I\Delta l}$  не будет зависеть ни от силы тока в проводнике, ни от длины участка проводника. Именно поэтому это отношение можно принять за характеристику магнитного поля в том месте, где расположен участок проводника длиной  $\Delta l$ .

Электрический ток — это упорядоченно движущиеся заряженные частицы. Поэтому действие магнитного поля на проводник с током есть результат действия поля на движущиеся заряженные частицы внутри проводника. Найдем силу, действующую на одну частицу.

Силу, действующую на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля, называют силой Лоренца в честь великого голландского физика Х. Лоренца (1853— 1928) — основателя электронной теории строения вещества. Силу Лоренца можно найти с помощью закона Ампера.

Модуль силы Лоренца.

Силу, действующую на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля, называют силой Лоренца в честь великого голландского физика Х. Лоренца (1853 — 1928) — основателя электронной теории строения вещества. Силу Лоренца можно найти с помощью закона Ампера.



Модуль силы Лоренца равен отношению модуля силы  $F$ , действующей на участок проводника длиной  $\Delta l$ , к числу  $N$  заряженных частиц, упорядоченно движущихся в этом участке проводника:

$$F_L = \frac{F}{N} \quad (1)$$

Рассмотрим отрезок тонкого прямого проводника с током. Пусть длина отрезка  $\Delta l$  и площадь поперечного сечения проводника  $S$  настолько малы, что вектор индукции магнитного поля  $\vec{B}$  можно считать одинаковым в пределах этого отрезка проводника. Сила тока  $I$  в проводнике связана с зарядом частиц  $q$ , концентрацией заряженных частиц (числом зарядов в единице объема) и скоростью их упорядоченного движения  $v$  следующей формулой:

$$I = qnvS \quad (2)$$

Модуль силы, действующей со стороны магнитного поля на выбранный элемент тока, равен:

$$F = |I|B\Delta l \sin \alpha$$

Подставляя в эту формулу выражение (2) для силы тока, получаем:

$$F = |q|nvS\Delta lB \sin \alpha = v|q|NB \sin \alpha$$

где  $N = nS\Delta l$  — число заряженных частиц в рассматриваемом объеме. Следовательно, на каждый движущийся заряд со стороны магнитного поля действует сила Лоренца, равная:

$$F_L = \frac{F}{N} = |q|vB \sin \alpha$$

где  $\alpha$  — угол между вектором скорости и вектором магнитной индукции. Сила Лоренца перпендикулярна векторам магнитной индукции и скорости упорядоченного движения заряженных частиц. Ее направление определяется с помощью того же правила левой руки, что и направление силы Ампера.

Так как сила Лоренца перпендикулярна скорости частицы, то она не совершает работы. Согласно теореме о кинетической энергии это означает, что сила Лоренца не меняет кинетическую энергию частицы и, следовательно,

модуль ее скорости. Под действием силы Лоренца меняется лишь направление скорости частицы.

### **Тема 3.20 Индукция магнитного поля. Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции и закон электромагнитной индукции.**

**Цель: Познакомиться с понятиями индукции магнитного поля, магнитного потока, явлением электромагнитной индукции и законом электромагнитной индукции.**

Электромагнитная индукция.

До сих пор мы рассматривали электрические и магнитные поля, не изменяющиеся с течением времени. Было выяснено, что электростатическое поле создается неподвижными заряженными частицами, а магнитное поле — движущимися, т. е. электрическим током. Теперь познакомимся с электрическими и магнитными полями, которые меняются со временем.

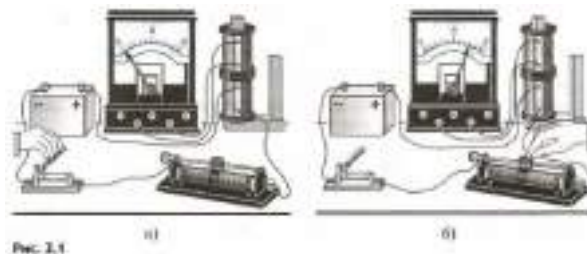
Самый важный факт, который удалось обнаружить, — это теснейшая взаимосвязь между электрическим и магнитным полями. Оказалось, что изменяющееся во времени магнитное поле порождает электрическое поле, а изменяющееся электрическое поле — магнитное. Без этой связи между полями разнообразие проявлений электромагнитных сил не было бы столь обширным, каким оно наблюдается на самом деле. Не существовало бы ни радиоволн, ни света.

Открытие электромагнитной индукции.

В 1821 г. М. Фарадей записал в своем дневнике: «Превратить магнетизм в электричество». Через 10 лет эта задача была им решена.

Не случайно первый, решающий шаг в открытии новых свойств электромагнитных взаимодействий сделан основоположником представлений об электромагнитном поле М. Фарадеем, который был уверен в единой природе электрических и магнитных явлений. Благодаря этому он и сделал открытие, вошедшее в основу устройства генераторов всех электростанций мира,

превращающих механическую энергию в энергию электрического тока. (Источники, работающие на других принципах: гальванические элементы, аккумуляторы и пр., — дают ничтожную долю вырабатываемой электрической энергии.)



Электрический ток, рассуждал М. Фарадей, способен намагнитить кусок железа. Не может ли магнит, в свою очередь, вызвать появление электрического тока? Долгое время эту связь обнаружить не удавалось. Трудно было додуматься до главного, а именно: движущийся магнит, или меняющееся во времени магнитное поле, может возбудить электрический ток в катушке.

Какого рода случайности могли помешать открытию, показывает следующий факт. Почти одновременно с Фарадеем получить электрический ток в катушке с помощью магнита пытался швейцарский физик Колладон. В ходе работы он пользовался гальванометром, легкая магнитная стрелка которого помещалась внутри катушки прибора. Чтобы магнит не оказывал непосредственного влияния на стрелку, концы катушки, куда Колладон вводил магнит, надеясь получить в ней ток, были выведены в соседнюю комнату и там присоединены к гальванометру. Вставив магнит в катушку, Колладон шел в соседнюю комнату и с огорчением убеждался, что гальванометр не показывает тока. Стоило бы ему все время наблюдать за гальванометром, а кого-нибудь попросить заняться магнитом, замечательное открытие было бы сделано. Но этого не случилось. Покоящийся относительно катушки магнит не вызывает в ней тока.

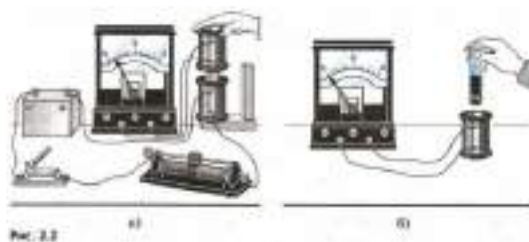
Явление электромагнитной индукции заключается в возникновении электрического тока в проводящем контуре, который либо покоится в переменном во времени магнитном поле, либо движется в постоянном

магнитном поле таким образом, что число линий магнитной индукции, пронизывающих контур, меняется. Это явление было открыто 29 августа 1831 г. Редкий случай, когда дата нового замечательного открытия известна так точно!

Сначала Фарадеем была открыта электромагнитная индукция в неподвижных относительно друг друга проводниках при замыкании и размыкании цепи. Затем, ясно понимая, что сближение или удаление проводников с током должно приводить к тому же результату, что и замыкание и размыкание цепи, Фарадей с помощью опытов доказал: ток возникает при перемещении катушек относительно друг друга. Знакомый с трудами Ампера, Фарадей понимал, что магнит — это совокупность маленьких токов, циркулирующих в молекулах. 17 октября, как зарегистрировано в его лабораторном журнале, был обнаружен индукционный ток в катушке во время введения (или удаления) магнита.

В течение одного месяца Фарадей опытным путем установил все главные особенности явления электромагнитной индукции. В настоящее время опыты Фарадея может повторить каждый. Для этого надо иметь две катушки, магнит, батарею элементов и достаточно чувствительный гальванометр.

В установке, изображенной на рисунке 2.1, а, индукционный ток возникает в одной из катушек в момент замыкания или размыкания электрической цепи другой катушки, неподвижной относительно первой. В других опытах индукционный ток возникает при изменении силы тока в одной из катушек с помощью реостата (рис. 2.1, б), при движении катушек относительно друг друга (рис. 2.2, а), при движении постоянного магнита относительно катушки (рис. 2.2, б).



Уже сам Фарадей заметил то общее, от чего зависит появление индукционного тока в опытах, которые поставлены по-разному.

В замкнутом проводящем контуре возникает ток при изменении числа линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность, ограниченную этим контуром.

И чем быстрее меняется число линий магнитной индукции, тем больше возникающий индукционный ток. При этом причина изменения числа линий магнитной индукции не существенна. Это может быть и изменение числа линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность, ограниченную неподвижным проводящим контуром, вследствие изменения силы тока в соседней катушке (см. рис. 2.1, б), и изменение числа линий индукции вследствие движения контура в неоднородном магнитном поле, густота линий которого меняется в пространстве (рис. 2.3).



В проводящем замкнутом контуре возникает электрический ток, если контур находится в переменном магнитном поле или движется в постоянном во времени магнитном поле так, что число линий магнитной индукции, пронизывающих контур, меняется.

### **Тема 3.21 Вихревое электрическое поле. Правило Ленца.**

#### **Заряженные частицы в электрическом и магнитном полях.**

**Цель: Познакомиться с понятиями вихревого электрического поля, правилом Ленца.**

Присоединив катушку, в которой возникает индукционный ток, к гальванометру, можно обнаружить, что направление этого тока зависит от того, приближается ли магнит к катушке (например, северным полюсом) или удаляется от нее (см. рис. 2.2, б).

Возникающий индукционный ток того или иного направления как-то взаимодействует с магнитом (притягивает или отталкивает его). Катушка с

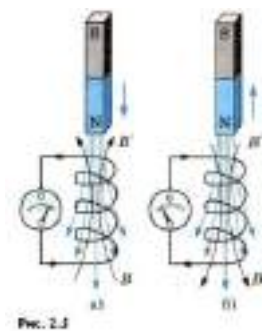
проходящим по ней током подобна магниту с двумя полюсами — северным и южным. Направление индукционного тока определяет, какой конец катушки выполняет роль северного полюса (линии магнитной индукции выходят из него). На основе закона сохранения энергии можно предсказать, в каких случаях катушка будет притягивать магнит, а в каких отталкивать его.

#### Взаимодействие индукционного тока с магнитом

Если магнит приближать к катушке, то в ней появляется индукционный ток такого направления, что магнит обязательно отталкивается. Для сближения магнита и катушки нужно совершить положительную работу. Катушка становится подобной магниту, обращенному одноименным полюсом к приближающемуся к ней магниту. Одноименные же полюса отталкиваются.

При удалении магнита, наоборот, в катушке возникает ток такого направления, чтобы появилась притягивающая магнит сила.

В чем состоит различие двух опытов: приближение магнита к катушке и его удаление? В первом случае число линий магнитной индукции, пронизывающих витки катушки, или, что то же самое, магнитный поток, увеличивается (рис. 2.5, а), а во втором случае уменьшается



(рис. 2.5, б). Причем в первом случае линии индукции  $\vec{B}'$  магнитного поля, созданного возникшим в катушке индукционным током, выходят из верхнего конца катушки, так как катушка отталкивает магнит, а во втором случае, наоборот, входят в этот конец. Эти линии магнитной индукции на рисунке 2.5 изображены черным цветом. В случае а катушка с током аналогична магниту, северный полюс которого находится сверху, а в случае б — снизу.

Аналогичные выводы можно сделать с помощью опыта, показанного на рисунке 2.6. На концах стержня, который может свободно вращаться вокруг вертикальной оси, закреплены два проводящих алюминиевых кольца. Одно из них с разрезом.



С разрезанным кольцом магнит не взаимодействует, так как разрез препятствует возникновению в кольце индукционного тока. Отталкивает или притягивает катушка магнит, это зависит от направления индукционного тока в ней. Поэтому закон сохранения энергии позволяет сформулировать правило, определяющее направление индукционного тока.

#### Правило Ленца.

Теперь мы подошли к главному: при увеличении магнитного потока через витки катушки индукционный ток имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует усилению магнитного потока через витки катушки. Ведь линии индукции  $\vec{B}'$  этого поля направлены против линий индукции  $\vec{B}$  поля, изменение которого порождает электрический ток. Если же магнитный поток через катушку ослабевает, то индукционный ток создает магнитное поле с индукцией  $\vec{B}'$  увеличивающее магнитный поток через витки катушки.

В этом и состоит сущность общего правила определения направления индукционного тока, которое применимо во всех случаях. Это правило было установлено русским физиком Э. Х. Ленцем.

Согласно правилу Ленца возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует тому изменению магнитного потока, которым он вызван. Более кратко это правило можно сформулировать следующим образом: индукционный ток направлен так, чтобы препятствовать причине, его вызывающей.

Применять правило Ленца для нахождения направления индукционного тока в контуре надо так:

1. Определить направление линий магнитной индукции  $\vec{B}$  внешнего магнитного поля.
2. Выяснить, увеличивается ли поток вектора магнитной индукции этого поля через поверхность, ограниченную контуром ( $\Delta\Phi > 0$ ), или уменьшается ( $\Delta\Phi < 0$ ).

3. Установить направление линий магнитной индукции  $\vec{B}'$  магнитного поля индукционного тока. Эти линии должны быть согласно правилу Ленца направлены противоположно линиям магнитной индукции  $B$  при  $\Delta\Phi > 0$  и иметь одинаковое с ними направление при  $\Delta\Phi < 0$ .

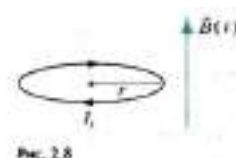
4. Зная направление линий магнитной индукции  $\vec{B}'$ , найти направление индукционного тока, пользуясь правилом буравчика.

Направление индукционного тока определяется с помощью закона сохранения энергии. Индукционный ток во всех случаях направлен так, чтобы своим магнитным полем препятствовать изменению магнитного потока, вызывающего данный индукционный ток.

#### Вихревое электрическое поле

Магнитный поток  $\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$ . Изменение магнитного потока через контур может происходить: 1) в случае неподвижного проводящего контура, помещенного в изменяющееся во времени поле; 2) в случае проводника, движущегося в магнитном поле, которое может и не меняться со временем. Значение ЭДС индукции в обоих случаях определяется законом (2.4), но происхождение этой ЭДС различно.

Рассмотрим сначала первый случай возникновения индукционного тока. Поместим круговой проволочный виток радиусом  $r$  в переменное во времени однородное магнитное поле (рис. 2.8). Пусть индукция магнитного поля увеличивается, тогда будет увеличиваться со временем и магнитный поток через поверхность, ограниченную витком. Согласно закону электромагнитной индукции в витке появится индукционный ток. При изменении индукции магнитного поля по линейному закону индукционный ток будет постоянен.



Какие же силы заставляют заряды в витке двигаться? Само магнитное поле, пронизывающее катушку, этого сделать не может, так как магнитное поле действует исключительно на движущиеся заряды (этим-то оно и отличается от электрического), а проводник с находящимися в нем электронами неподвижен.

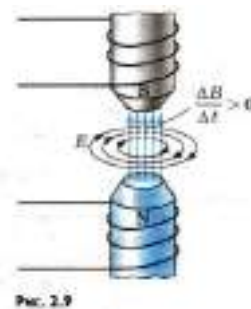


Кроме магнитного поля, на заряды, причем как на движущиеся, так и на неподвижные, действует еще электрическое поле. Но ведь те поля, о которых пока шла речь (электростатическое или стационарное), создаются электрическими зарядами, а индукционный ток появляется в результате действия меняющегося магнитного поля. Поэтому можно предположить, что электроны в неподвижном проводнике приводятся в движение электрическим полем и это поле непосредственно порождается меняющимся магнитным полем. Тем самым утверждается новое фундаментальное свойство поля: изменяясь во времени, магнитное поле порождает электрическое поле. К этому выводу впервые пришел Дж. Максвелл.

Теперь явление электромагнитной индукции предстает перед нами в новом свете. Главное в нем — это процесс порождения полем магнитным поля электрического. При этом наличие проводящего контура, например, катушки, не меняет существа процесса. Проводник с запасом свободных электронов (или других частиц) играет роль прибора: он лишь позволяет обнаружить возникающее электрическое поле. Поле приводит в движение электроны в проводнике и тем самым обнаруживает себя. Сущность явления электромагнитной индукции в неподвижном проводнике состоит не столько в появлении индукционного тока, сколько в возникновении электрического поля, которое приводит в движение электрические заряды.

Электрическое поле, возникающее при изменении магнитного поля, имеет совсем другую природу, чем электростатическое.

Оно не связано непосредственно с электрическими зарядами, и его линии напряженности не могут на них начинаться и кончаться. Они вообще нигде не начинаются и не кончаются, а представляют собой замкнутые линии, подобные линиям индукции магнитного поля. Это так называемое вихревое электрическое поле (рис. 2.9).



Чем быстрее меняется магнитная индукция, тем больше напряженность электрического поля. Согласно правилу Ленца при возрастании магнитной индукции ( $\frac{\Delta B}{\Delta t} > 0$ ) направление вектора напряженности  $\vec{E}$  электрического поля образует левый винт с направлением вектора  $\vec{B}$ . Это означает, что при вращении винта с левой нарезкой в направлении линий напряженности электрического поля поступательное перемещение винта совпадает с направлением вектора магнитной индукции. Напротив, при убывании магнитной индукции ( $\frac{\Delta B}{\Delta t} < 0$ ) направление вектора напряженности  $\vec{E}$  образует правый винт с направлением вектора  $\vec{B}$ . Направление силовых линий напряженности  $\vec{E}$  совпадает с направлением индукционного тока. Сила, действующая со стороны вихревого электрического поля на заряд  $q$  (сторонняя сила), по-прежнему равна  $\vec{F} = q\vec{E}$ . Но в отличие от случая стационарного электрического поля работа вихревого поля по перемещению заряда  $q$  на замкнутом пути не равна нулю. Ведь при перемещении заряда вдоль замкнутой линии напряженности электрического поля работа на всех участках пути имеет один и тот же знак, так как сила и перемещение совпадают по направлению. Работа вихревого электрического поля при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутого неподвижного проводника численно равна ЭДС индукции в этом проводнике.

#### Индукционные токи в массивных проводниках

Особенно большого числового значения индукционные токи достигают в массивных проводниках, из-за того, что их сопротивление мало.

Такие токи, называемые токами Фуко по имени исследовавшего их французского физика, можно использовать для нагревания проводников. На этом принципе основано устройство индукционных печей, например, используемых в быту СВЧ-печей. Также этот принцип используется для плавки металлов. Кроме этого явление электромагнитной индукции используется в

детекторах металла, устанавливаемых при входах в здания аэровокзалов, театров и т. д.

Однако во многих устройствах возникновение токов Фуко приводит к бесполезным и даже нежелательным потерям энергии на выделение тепла. Поэтому железные сердечники трансформаторов, электродвигателей, генераторов и т. д. делают не сплошными, а состоящими из отдельных пластин, изолированных друг от друга. Поверхности пластин должны быть перпендикулярны направлению вектора напряженности вихревого электрического поля. Сопротивление электрическому току пластин будет при этом максимальным, а выделение тепла — минимальным.

### **Тема 3.22 Закон электромагнитной индукции. Изменение магнитного потока.**

**Цель: Познакомиться с законом электромагнитной индукции.**

Сформулируем закон электромагнитной индукции количественно. Опыты Фарадея показали, что сила индукционного тока  $I_i$  в проводящем контуре пропорциональна скорости изменения числа линий магнитной индукции  $\vec{B}$ , пронизывающих поверхность, ограниченную этим контуром. Более точно это утверждение можно сформулировать, используя понятие «магнитный поток».

Магнитный поток можно графически представить как число линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность площадью  $S$ . Чем больше индукция магнитного поля, тем большее число линий магнитной индукции пронизывает эту поверхность. Поэтому скорость изменения этого числа есть не что иное, как скорость изменения магнитного потока.

Если за малое время  $\Delta t$  магнитный поток меняется на  $\Delta\Phi$ , то скорость изменения магнитного потока равна  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ .

Поэтому утверждение, которое вытекает непосредственно из опыта, можно сформулировать так: сила индукционного тока пропорциональна

скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:

$$I_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.3)$$

ЭДС индукции.

Известно, что в цепи появляется электрический ток в том случае, когда на свободные заряды проводника действуют сторонние силы. Величину, численно равную работе этих сил при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутого контура, называют электродвижущей силой.

Следовательно, при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, в контуре появляются сторонние силы, действие которых характеризует ЭДС, называемая ЭДС индукции. Обозначают ее буквой  $\xi_i$ .

Согласно закону Ома для замкнутой цепи  $I_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ . Сопротивление проводника не зависит от изменения магнитного потока. Следовательно, соотношение (2.3) справедливо только потому, что ЭДС индукции пропорциональна  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ .

Закон электромагнитной индукции формулируется именно для ЭДС, а не для силы индукционного тока, т. к. сила тока зависит и от свойств проводника, а ЭДС определяется только изменением магнитного потока. Согласно закону электромагнитной индукции ЭДС индукции в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:

$$\xi_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Как в законе электромагнитной индукции учесть направление индукционного тока (или знак ЭДС индукции) в соответствии с правилом Ленца?

На рисунке 2.7 изображен замкнутый контур. Будем

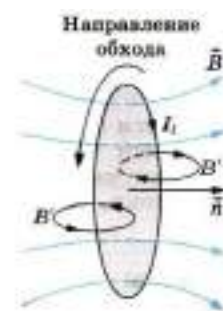


Рис. 2.7

считать положительным направление обхода контура против часовой стрелки. Нормаль  $\vec{n}$  к контуру образует правый винт с направлением обхода.

Пусть магнитная индукция  $\vec{B}$  внешнего магнитного поля направлена вдоль нормали к контуру и возрастает со временем. Тогда  $\Phi > 0$  и  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$ . Согласно правилу Ленца индукционный ток создает магнитный поток  $\Phi' < 0$ . Линии индукции  $B'$  магнитного поля индукционного тока изображены на рисунке 2.7 черным цветом. Следовательно, индукционный ток согласно правилу буравчика направлен по часовой стрелке (против направления положительного обхода) и ЭДС индукции отрицательна. Поэтому в формуле для закона электромагнитной индукции должен стоять знак «-», указывающий на то, что  $\xi_i$  и  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  имеют разные знаки:

$$\xi_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.4)$$

ЭДС индукции определяется скоростью изменения магнитного потока.

### **Тема 3.23 Самоиндукция. Индуктивность. Энергия магнитного поля тока.**

**Цель: Познакомиться с понятиями самоиндукции, индуктивности, энергией магнитного поля тока.**

Самоиндукция.

Если по катушке идет переменный ток, то магнитный поток, пронизывающий катушку, меняется. Поэтому в том же самом проводнике, по которому идет переменный ток, возникает ЭДС индукции. Это явление называют самоиндукцией.

При самоиндукции проводящий контур выполняет двойную роль: переменный ток в проводнике вызывает появление магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром. А так как магнитный поток изменяется со временем, то появляется ЭДС индукции  $\xi_{is}$ . По правилу Ленца в момент нарастания тока напряженность вихревого электрического поля направлена

против тока. Следовательно, в этот момент вихревое поле препятствует нарастанию тока. Наоборот, в момент уменьшения тока вихревое поле поддерживает его.

Явление самоиндукции можно наблюдать в простых опытах. На рисунке 2.13 показана схема параллельного соединения двух одинаковых ламп. Одну из них подключают к источнику через резистор  $R$ , а другую — последовательно с катушкой  $L$ , снабженной железным сердечником.

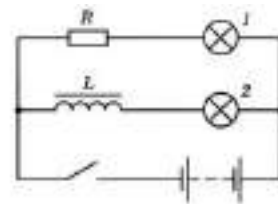


Рис. 2.13

При замыкании ключа первая лампа вспыхивает практически сразу, а вторая — с заметным запозданием. ЭДС самоиндукции в цепи этой лампы велика, и сила тока не сразу достигает своего максимального значения (рис. 2.14).

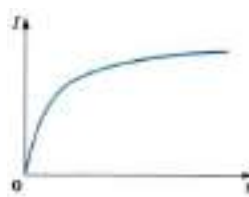


Рис. 2.14

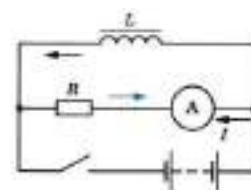


Рис. 2.15

Появление ЭДС самоиндукции при размыкании можно наблюдать в опыте с цепью, схематически показанной на рисунке 2.15. При размыкании ключа в катушке  $L$  возникает ЭДС самоиндукции, поддерживающая первоначальный ток. В результате в момент размыкания через гальванометр идет ток (цветная стрелка), направленный против начального тока до размыкания (черная стрелка). Сила тока при размыкании цепи может превышать силу тока, проходящего через гальванометр при замкнутом ключе. Это означает, что ЭДС самоиндукции  $\xi_{is}$  больше ЭДС  $\xi$  батареи элементов.

Индуктивность.

Модуль вектора индукции  $B$  магнитного поля, создаваемого током, пропорционален силе тока. Так как магнитный поток  $\Phi$  пропорционален  $B$ , то  $\Phi \sim B \sim I$ .

Можно, следовательно, утверждать, что

$$\Phi = L \cdot I \quad (2.7)$$

где  $L$  — коэффициент пропорциональности между током в проводящем контуре и магнитным потоком. Величину  $L$  называют индуктивностью контура, или его коэффициентом самоиндукции.

Используя закон электромагнитной индукции и выражение (2.7), получаем равенство

$$\xi_{is} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (2.8)$$

если считать, что форма контура остается неизменной и поток меняется только за счет изменения силы тока.

Из формулы (2.8) следует, что индуктивность — это физическая величина, численно равная ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока в нем на 1 А за 1 с.

Индуктивность, подобно емкости, зависит от геометрических факторов: размеров проводника и его формы, но не зависит непосредственно от силы тока в проводнике. Кроме геометрии проводника, индуктивность зависит от магнитных свойств среды, в которой находится проводник.

Очевидно, что индуктивность одного проволочного витка меньше, чем у катушки (соленоида), состоящей из  $N$  таких же витков, так как магнитный поток катушки увеличивается в  $A$  раз.

Единицу индуктивности в СИ называют генри (обозначается Гн). Индуктивность проводника равна 1 Гн, если в нем при равномерном изменении силы тока на 1 А за 1 с возникает ЭДС самоиндукции 1 В:

$$1 \text{ Генри} = \frac{\text{В}}{\frac{\text{А}}{\text{с}}} = \frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{А}}$$

Аналогия между самоиндукцией и инерцией

Явление самоиндукции подобно явлению инерции в механике. Так, инерция приводит к тому, что под действием силы тело не мгновенно приобретает определенную скорость, а постепенно. Тело нельзя мгновенно затормозить, как бы велика ни была тормозящая сила. Точно так же за счет самоиндукции при замыкании цепи сила тока не сразу приобретает

определенное значение, а нарастает постепенно. Выключая источник, мы не прекращаем ток сразу. Самоиндукция поддерживает его некоторое время, несмотря на сопротивление цепи.

Явление самоиндукции выполняет очень важную роль в электротехнике и радиотехнике. Индуктивность цепи оказывает существенное влияние на прохождение по цепи переменного электрического тока. Подробно об этом будет рассказано в главе 4.

При изменении силы тока в проводнике в нем возникает вихревое электрическое поле. Это поле тормозит электроны при возрастании силы тока и ускоряет при убывании.

Энергия магнитного поля тока

Согласно закону сохранения энергии энергия магнитного поля, созданного током, равна той энергии, которую должен затратить источник тока (гальванический элемент, генератор на электростанции и др.) на создание тока. При размыкании цепи эта энергия переходит в другие виды энергии.

То, что для создания тока необходимо затратить энергию, т. е. необходимо совершить работу, объясняется тем, что при замыкании цепи, когда ток начинает нарастать, в проводнике появляется вихревое электрическое поле, действующее против того электрического поля, которое создается в проводнике благодаря источнику тока. Для того чтобы сила тока стала равной  $I$ , источник тока должен совершить работу против сил вихревого поля. Эта работа идет на увеличение энергии магнитного поля тока.

При размыкании цепи ток исчезает, и вихревое поле совершает положительную работу. Запасенная током энергия выделяется. Это обнаруживается, например, по мощной искре, возникающей при размыкании цепи с большой индуктивностью.

Энергия магнитного поля, созданного током, проходящим по участку цепи с индуктивностью  $L$ , определяется по формуле

$$W_M = \frac{LI^2}{2} \quad (2.9)$$



Энергия магнитного поля выражена здесь через характеристику проводника  $L$  и силу тока в нем. Но эту же энергию можно выразить и через характеристики поля. Вычисления показывают, что плотность энергии магнитного поля (т. е. энергия единицы объема) пропорциональна квадрату магнитной индукции:  $W_M \sim B^2$ , подобно тому как плотность энергии электрического поля пропорциональна квадрату напряженности электрического поля  $W_э \sim E^2$ .

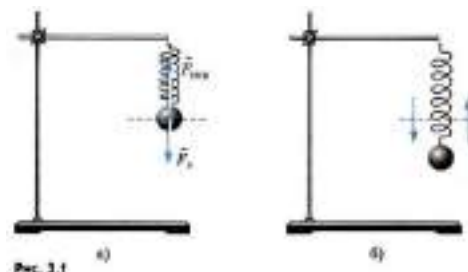
Магнитное поле, созданное электрическим током, обладает энергией, прямо пропорциональной квадрату силы тока.

### Тема 3.24 Колебания и волны.

**Цель:** Познакомиться с видами колебаний и волн, их характеристиками.

Колебательные движения, или просто колебания, широко распространены в природе. Заставить предмет колебаться, т. е. совершать повторяющиеся движения, очень просто.

Подвесим пружину к штативу. К нижнему свободному концу пружины прикрепим металлический шарик. Пружина растянется, и сила упругости  $\vec{F}_{упр}$  уравновесит силу



тяжести  $\vec{F}_T$ , действующую на шарик (рис. 3.1, а). Если теперь вывести шарик из положения равновесия, слегка оттянув его вниз, и отпустить, то он начнет совершать движения — вверх-вниз, вверх-вниз и т. д. (рис. 3.1, б). Такого рода движения, при которых тело поочередно смещается то в одну, то в другую сторону, и называются колебаниями. С течением времени колебания постепенно ослабевают (затухают), и в конце концов шарик остановится.

Еще проще можно заставить шарик колебаться, если подвесить его на нити. В положении равновесия нить вертикальна и сила тяжести  $\vec{F}_T$ ,

действующая на шарик, уравнивается силой упругости  $\vec{F}_{\text{упр}}$  нити (рис. 3.2, а). Если шарик отклонить и затем отпустить, то он начнет качаться направо-налево, налево-направо (рис. 3.2, б) до тех пор, пока колебания не затухнут. Шарик, подвешенный на нити, — это простейший маятник.

Нужно иметь в виду, что шарик, подвешенный на нити, будет представлять собой маятник лишь в том случае, если на него действует сила тяжести Земли. Создающий эту силу земной шар входит в колебательную систему, которую мы для краткости называем просто маятником.

Вообще же обычно маятником называют подвешенное на нити или закрепленное на оси тело, которое может совершать колебания под действием силы тяжести. При этом ось не должна проходить через центр тяжести тела. Маятником можно назвать линейку, подвешенную на гвоздь, люстру, коромысло рычажных весов и т.д. Что же является наиболее характерным признаком колебательного движения? Прежде всего это то, что при колебаниях движения тела повторяются или почти повторяются. Так, маятник, совершив один цикл колебаний, т. е. проделав путь от крайнего левого положения до крайнего правого и обратно, вновь совершает такой же цикл. Если движение повторяется точно, то его называют периодическим.

Механические колебания — это движения, которые точно или приблизительно повторяются через определенные интервалы времени.

Повторяются движения поршней в двигателе автомобиля, поплавок на волне, ветки дерева на ветру, нашего сердца. Все это различные примеры колебаний.

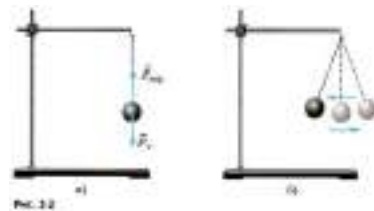
Свободные колебания. Группу тел, движение которых мы изучаем, называют в механике системой тел или просто системой. Напомним, что силы, действующие между телами системы, называют внутренними. Внешними силами называют силы, действующие на тела системы со стороны тел, не входящих в нее.

Самым простым видом колебаний являются свободные колебания. Свободными колебаниями называются колебания в системе под действием внутренних сил, после того как система выведена из положения равновесия и предоставлена затем самой себе.

Колебания груза, прикрепленного к пружине, или груза, подвешенного на нити, — это примеры свободных колебаний. После выведения системы из положения равновесия создаются условия, при которых груз колеблется без воздействия внешних сил.

Однако с течением времени колебания затухают, так как на тела системы всегда действуют силы сопротивления. Под действием внутренних сил и сил сопротивления система совершает затухающие колебания.

Вынужденные колебания. Для того чтобы колебания не затухали, на тела системы должна действовать периодически изменяющаяся сила. Постоянная сила не может поддерживать колебания,



так как под действием этой силы может измениться только положение равновесия, относительно которого происходят колебания.

Вынужденными колебаниями называются колебания тел под действием внешних периодически изменяющихся сил.

Колебания бывают свободными, затухающими и вынужденными. Наибольшее значение имеют вынужденные колебания.

### **Тема 3.25 Свободные электромагнитные колебания. Колебательный контур. Формула Томсона. Принцип действия электрогенератора.**

#### **Трансформатор.**

**Цель: Познакомиться с понятиями свободных электромагнитных колебаний, формулой Томсона, принципом действия электрогенератора и трансформатора.**

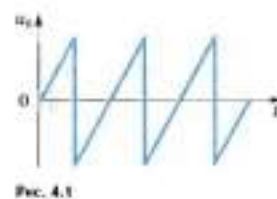
Свободные и вынужденные электромагнитные колебания.

Электромагнитные колебания были открыты почти случайно. После того как изобрели лейденскую банку (первый конденсатор) и научились сообщать ей большой заряд с помощью электростатической машины, начали изучать электрический разряд банки. Замыкая обкладки лейденской банки с помощью проволочной катушки, обнаружили, что стальные спицы внутри катушки намагничиваются. В этом ничего удивительного не было: электрический ток и должен намагничивать стальной сердечник катушки. Станным же было то, что нельзя было предсказать, какой конец сердечника катушки окажется северным полюсом, а какой — южным.

Повторяя опыт примерно в одинаковых условиях, получали в одних случаях один результат, а в других — другой. Далеко не сразу поняли, что при разрядке конденсатора через катушку в электрической цепи возникают колебания. За время разрядки конденсатор успевает много раз перезарядиться, и ток меняет направление много раз, в результате чего сердечник может намагничиваться различным образом.

Периодические или почти периодические изменения заряда, силы тока и напряжения называются электромагнитными колебаниями. Обычно эти колебания происходят с очень большой частотой, значительно превышающей частоту механических колебаний. Поэтому для их наблюдения и исследования очень удобен электронный осциллограф.

В электронно-лучевой трубке осциллографа узкий пучок электронов попадает на экран, способный светиться при его бомбардировке электронами. На горизонтально отклоняющие пластины трубки подается переменное напряжение развертки  $u_p$  пилообразной формы (рис. 4.1).



Сравнительно медленно напряжение повышается, а потом очень резко понижается. Электрическое поле между пластинами заставляет электронный луч пробегать экран в горизонтальном направлении с постоянной скоростью и затем почти мгновенно возвращаться назад. После этого весь процесс

повторяется. Если теперь присоединить вертикально отклоняющие пластины трубки к конденсатору, то колебания напряжения при его разрядке вызовут колебания луча в вертикальном направлении. В результате на экране образуется временная развертка колебаний (рис. 4.2), подобная той, которую вычерчивает маятник с песочницей над движущимся листом бумаги. Колебания затухают с течением времени.

Эти колебания являются свободными. Свободными колебаниями называются колебания, которые возникают в системе после выведения ее из положения равновесия. В нашем случае колебательная система (конденсатор и катушка) выводится из равновесия при сообщении конденсатору заряда. Зарядка конденсатора эквивалентна отклонению маятника от положения равновесия.

Нетрудно получить в электрической цепи также и вынужденные электромагнитные колебания. Вынужденными колебаниями называются колебания в цепи под действием внешней периодически изменяющейся электродвижущей силы.

Свободные электромагнитные колебания возникают при разрядке конденсатора через катушку индуктивности. Вынужденные колебания вызываются периодической ЭДС.

Уравнение, описывающее процессы в колебательном контуре. Период свободных электрических колебаний

Перейдем теперь к количественной теории процессов в колебательном контуре.

Уравнение, описывающее процессы в колебательном контуре. Рассмотрим колебательный контур, сопротивлением  $R$  которого можно пренебречь (рис. 4.6).

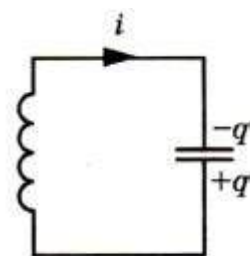


Рис. 4.6

Уравнение, описывающее свободные электрические колебания в контуре, можно получить с помощью закона сохранения энергии. Полная

электромагнитная энергия  $W$  контура в любой момент времени равна сумме его энергий магнитного и электрического полей:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}$$

Эта энергия не меняется с течением времени, если сопротивление  $R$  контура равно нулю. Значит, производная полной энергии по времени равна нулю. Следовательно, равна нулю сумма производных по времени от энергий магнитного и электрического полей:

$$\left(\frac{Li^2}{2}\right)' + \left(\frac{q^2}{2C}\right)' = 0 \text{ или } \left(\frac{Li^2}{2}\right)' = -\left(\frac{q^2}{2C}\right)' \quad (4.5)$$

Физический смысл уравнения (4.5) состоит в том, что скорость изменения энергии магнитного поля по модулю равна скорости изменения энергии электрического поля; знак «-» указывает на то, что, когда энергия электрического поля возрастает, энергия магнитного поля убывает (и наоборот).

Вычислив производные в уравнении (4.5), получим

$$\frac{L}{2} \cdot 2ii' = -\frac{1}{2C} \cdot 2qq' \quad (4.6)$$

Мы вычисляем производные по времени. Поэтому производная  $(i^2)'$  равна не просто  $2i$ , как было бы при вычислении производной по  $i$ . Нужно  $2i$  умножить еще на производную  $i'$  силы тока по времени, так как вычисляется производная от сложной функции. То же самое относится к производной  $(q^2)'$ .

Но производная заряда по времени представляет собой силу тока в данный момент времени:

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = q' \quad (4.7)$$

Поэтому уравнение (4.6) можно переписать в следующем виде:

$$Lii' = -\frac{qi}{C} \quad (4.8)$$

Производная силы тока по времени есть не что иное, как вторая производная заряда по времени, подобно тому как производная скорости по времени (ускорение) есть вторая производная координаты по времени.

Подставив в уравнение (4.8)  $i' = q''$  и разделив левую и правую части этого уравнения на  $Li$ , получим основное уравнение, описывающее свободные электрические колебания в контуре:

$$q'' = -\frac{1}{LC}q \quad (4.9)$$

Теперь вы в полной мере можете оценить значение тех усилий, которые были затрачены для изучения колебаний шарика на пружине и математического маятника. Ведь уравнение (4.9) ничем, кроме обозначений, не отличается от уравнения (3.11), описывающего колебания шарика на пружине. При замене в уравнении (3.11)  $x$  на  $q$ ,  $x''$  на  $q''$ ,  $k$  на  $1/C$  и  $m$  на  $L$  мы в точности получим уравнение (4.9). Но уравнение (3.11) было уже решено выше. Поэтому, зная формулу, описывающую колебания пружинного маятника, мы сразу же можем записать формулу для описания электрических колебаний в контуре.

Формула Томсона

В уравнении (3.11) коэффициент  $\frac{k}{m}$  представляет собой квадрат собственной частоты колебаний. Поэтому и коэффициент  $\frac{1}{LC}$  в уравнении (4.9) также представляет собой квадрат циклической частоты — в этот раз для свободных электрических колебаний:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.10)$$

Период свободных колебаний в контуре, таким образом, равен:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC} \quad (4.11)$$

Формула (4.11) называется формулой Томсона в честь английского физика У. Томсона (Кельвина), который ее впервые вывел.

Увеличение периода свободных колебаний с возрастанием  $L$  и  $C$  наглядно можно пояснить так. При увеличении индуктивности  $L$  ток медленнее нарастает со временем и медленнее падает до нуля. А чем больше емкость  $C$ , тем большее время требуется для перезарядки конденсатора.

Гармонические колебания заряда и тока.

Подобно тому как координата при механических колебаниях (в случае, когда в начальный момент времени отклонение тела маятника от положения равновесия максимально) изменяется со временем по гармоническому закону:

$$x = x_m \cos \omega_0 t$$

заряд конденсатора меняется с течением времени по такому же закону:

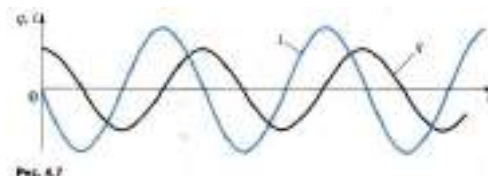
$$q = q_m \cos \omega_0 t \quad (4.12)$$

где  $q_m$  — амплитуда колебаний заряда.

Сила тока также совершает гармонические колебания:

$$i = q' = -\omega_0 q_m \sin \omega_0 t = I_m \cos \left( \omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (4.13)$$

где  $I_m = q_m \omega_0$  — амплитуда колебаний силы тока. Колебания силы тока опережают по фазе на  $\frac{\pi}{2}$  колебания заряда (рис. 4.7).



Точно так же колебания скорости тела в случае пружинного или математического маятника опережают на  $\frac{\pi}{2}$  колебания координаты (смещения) этого тела.

В действительности, из-за неизбежного наличия сопротивления электрической цепи, колебания будут затухающими. Сопротивление  $R$  также будет влиять и на период колебаний, чем больше сопротивление  $R$ , тем большим будет период колебаний. При достаточно большом сопротивлении колебания совсем не возникнут. Конденсатор разрядится, но перезарядки его не произойдет, энергия электрического и магнитного полей перейдет в тепло.

Простейшая система, где наблюдаются свободные электромагнитные колебания, — колебательный контур. Уравнение (4.9) — это основное уравнение, описывающее свободные электрические колебания в контуре.

Генерирование электрической энергии.

Электрическая энергия обладает неоспоримыми преимуществами перед всеми другими видами энергии. Ее можно передавать по проводам на огромные расстояния со сравнительно малыми потерями и удобно распределять между



потребителями. Главное же в том, что эту энергию с помощью достаточно простых устройств легко превратить в любые другие формы: механическую, внутреннюю (нагревание тел), энергию света и т. д. Переменный ток в отличие от постоянного имеет то преимущество, что напряжение и силу тока можно в очень широких пределах преобразовывать (трансформировать) почти без потерь энергии. Такие преобразования необходимы во многих электро- и радиотехнических устройствах. Но особенно необходима трансформация напряжения и тока при передаче электроэнергии на большие расстояния.

Электрический ток вырабатывается в генераторах — устройствах, преобразующих энергию того или иного вида в электрическую энергию. К генераторам относятся гальванические элементы, электростатические машины, солнечные батареи и т. п. Исследуются возможности создания принципиально новых типов генераторов. Например, разрабатываются так называемые топливные элементы, в которых энергия, освобождающаяся в результате реакции водорода с кислородом, непосредственно превращается в электрическую.

Область применения каждого из перечисленных типов генераторов электроэнергии определяется их характеристиками. Так, электростатические машины создают высокую разность потенциалов, но не способны создать в цепи сколько-нибудь значительную силу тока. Гальванические элементы могут дать большой ток, но продолжительность их действия невелика.

Основную роль в наше время выполняют электромеханические индукционные генераторы переменного тока. В этих генераторах механическая энергия превращается в электрическую. Их действие основано на явлении электромагнитной индукции. Такие генераторы имеют сравнительно простое устройство и позволяют получать большие токи при достаточно высоком напряжении.

В дальнейшем, говоря о генераторах, мы будем иметь в виду именно индукционные электромеханические генераторы.

## Генератор переменного тока.

В настоящее время имеется много различных типов индукционных генераторов. Но все они состоят из одних и тех же основных частей. Это, во-первых, электромагнит или постоянный магнит, создающий магнитное поле, и, во-вторых, обмотка, в которой индуцируется переменная ЭДС (в рассмотренной модели генератора — это вращающаяся рамка). Так как ЭДС, наводимые в последовательно соединенных витках, складываются, то амплитуда ЭДС индукции в рамке пропорциональна числу ее витков. Она пропорциональна также амплитуде переменного магнитного потока ( $\Phi_m = BS$ ) через каждый виток.

Для получения большого магнитного потока в генераторах применяют специальную магнитную систему, состоящую из двух сердечников, изготовленных из электротехнической стали. Обмотки, создающие магнитное поле, размещены в пазах одного из сердечников, а обмотки, в которых индуцируется ЭДС, — в пазах другого. Один из сердечников (обычно внутренний) вместе с обмоткой вращают вокруг горизонтальной или вертикальной оси. Поэтому он называется ротором. Неподвижный сердечник с обмоткой называют статором. Зазор между сердечниками статора и ротора делают как можно меньшим для увеличения потока вектора магнитной индукции.

В изображенной на рисунке 5.1 модели генератора вращают проволочную рамку, которая является ротором (но без железного сердечника). Магнитное поле создает неподвижный постоянный магнит. Разумеется, можно было бы поступить и наоборот: вращать магнит, а рамку оставить неподвижной.



В больших промышленных генераторах вращается именно электромагнит, являющийся ротором, а обмотки, в которых наводится ЭДС, уложены в пазах статора и остаются неподвижными. Дело в том, что подводить

ток к ротору или отводить его из обмотки ротора во внешнюю цепь приходится при помощи скользящих контактов. Для этого ротор снабжается контактными кольцами, присоединенными к концам его обмотки (рис. 5.2). Неподвижные пластины — щетки — прижаты к кольцам и осуществляют связь обмотки ротора с внешней цепью. Сила тока в обмотках электромагнита, создающего магнитное поле, значительно меньше силы тока, отдаваемого генератором во внешнюю цепь. Поэтому генерируемый ток удобнее снимать с неподвижных обмоток, а через скользящие контакты подводить сравнительно слабый ток к вращающемуся электромагниту. Этот ток вырабатывается отдельным генератором постоянного тока (возбудителем), расположенным на том же валу.

В маломощных генераторах магнитное поле создается вращающимся постоянным магнитом. В таком случае кольца и щетки вообще не нужны.

Появление ЭДС в неподвижных обмотках статора объясняется возникновением в них вихревого электрического поля, порожденного изменением магнитного потока при вращении ротора.

Современный генератор электрического тока — это внушительное сооружение из медных проводов, изоляционных материалов и стальных конструкций. При размерах в несколько метров важнейшие детали генераторов изготавливаются с точностью до миллиметра. Нигде в природе нет такого сочетания движущихся частей, которые могли бы породить электрическую энергию столь же непрерывно и экономично.

Электрический ток никогда не получил бы такого широкого применения, если бы его нельзя было преобразовывать почти без потерь энергии.

Назначение трансформаторов

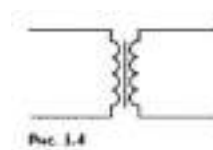
ЭДС мощных генераторов электростанций довольно велика. Между тем в практике чаще всего нужно не слишком высокое напряжение.

Преобразование переменного тока, при котором напряжение увеличивается или уменьшается в несколько раз практически без потери мощности, осуществляется с помощью трансформаторов.

Впервые трансформаторы были использованы в 1878 г. русским ученым П. Н. Яблочковым для питания изобретенных им электрических свечей — нового в то время источника света.

#### Устройство трансформатора

Трансформатор состоит из замкнутого стального сердечника, собранного из пластин, на который надеты две (иногда и более) катушки с проволочными обмотками (рис. 5.3). Одна из обмоток, называемая первичной, подключается к источнику переменного напряжения. Другая обмотка, к которой присоединяют нагрузку, т. е. приборы и устройства, потребляющие электроэнергию, называется вторичной. Условное обозначение трансформатора приведено на рисунке 5.4.



#### Трансформатор на холостом ходу.

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При прохождении переменного тока по первичной обмотке в сердечнике появляется переменный магнитный поток, которым возбуждается ЭДС индукции в витках каждой обмотки. Сердечник из трансформаторной стали концентрирует магнитное поле, так что магнитный поток существует практически только внутри сердечника и одинаков во всех его сечениях.

Мгновенное значение ЭДС индукции  $e$  во всех витках первичной или вторичной обмотки одинаково. Согласно закону Фарадея оно определяется формулой

$$e = -\Phi', \quad (5.1)$$

где  $\Phi'$  производная потока магнитной индукции по времени.

В первичной обмотке, имеющей  $N_1$  витков, полная ЭДС индукции  $e_1$  равна  $N_1 e$ . Во вторичной обмотке полная ЭДС индукции  $e_2$  равна  $N_2 e$  ( $N_2$  — число витков этой обмотки). Отсюда следует, что

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (5.2)$$

Обычно активное сопротивление обмоток трансформатора мало, и им можно пренебречь. В этом случае модуль напряжения на зажимах первичной обмотки примерно равен модулю суммарной ЭДС индукции:

$$|u_1| \approx |e_1|. \quad (5.3)$$

При разомкнутой вторичной обмотке трансформатора ток в ней не идет, и имеет место соотношение

$$|u_2| \approx |e_2|. \quad (5.4)$$

Мгновенные значения ЭДС  $e_1$  и  $e_2$  изменяются синфазно (одновременно достигают максимума и одновременно проходят через нуль). Поэтому их отношение в формуле (5.2) можно заменить отношением действующих значений  $\xi_1$  и  $\xi_2$  этих ЭДС или, учитывая равенства (5.3) и (5.4), отношением действующих значений напряжений  $U_1$  и  $U_2$ :

$$\frac{\xi_1}{\xi_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{N_1}{N_2} = K \quad (5.5)$$

Величина  $K$  называется коэффициентом трансформации. Он равен отношению напряжений в первичной и вторичной обмотках трансформатора. При  $K > 1$  трансформатор является понижающим, а при  $K < 1$  — повышающим.

#### Работа нагруженного трансформатора

Если к концам вторичной обмотки присоединить цепь, потребляющую электроэнергию, или, как говорят, нагрузить трансформатор, то сила тока во вторичной обмотке уже не будет равна нулю. Появившийся ток создаст в сердечнике свой переменный магнитный поток, который будет уменьшать изменения магнитного потока в сердечнике.

Уменьшение амплитуды колебаний результирующего магнитного потока, казалось бы, должно, в свою очередь, уменьшить ЭДС индукции в первичной обмотке. Это, однако, не произойдет, так как согласно формуле (5.3)  $|u_1| \approx |e_1|$ . Поэтому при замыкании цепи вторичной обмотки автоматически увеличится сила тока в первичной обмотке. Его амплитуда возрастет таким образом, что

восстановится прежнее значение амплитуды колебаний результирующего магнитного потока.

Увеличение силы тока в цепи первичной обмотки происходит в соответствии с законом сохранения энергии: отдача электроэнергии в цепь, присоединенную к вторичной обмотке трансформатора, сопровождается потреблением от сети такой же энергии первичной обмоткой. Мощность в первичной цепи при нагрузке трансформатора, близкой к номинальной, примерно равна мощности во вторичной цепи:

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2 \quad (5.6)$$

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \quad (5.7)$$

Это означает, что, повышая с помощью трансформатора напряжение в несколько раз, мы во столько же раз уменьшаем силу тока (и наоборот).

Трансформатор преобразует переменный электрический ток таким образом, что произведение силы тока на напряжение примерно одинаково в первичной и вторичной обмотках.

### **Тема 3.26 Электромагнитное поле и электромагнитные волны.**

#### **Скорость электромагнитных волн.**

**Цель: Познакомиться с понятиями электромагнитного поля и электромагнитных волн.**

Что такое электромагнитная волна.

Механические волны распространяются только в упругих средах: газе, жидкости или твердом теле. Существуют, однако, волны, которые не нуждаются в каком-либо веществе для своего распространения. Это электромагнитные волны. К ним, в частности, относятся радиоволны и свет. Электромагнитное поле может существовать в вакууме, т. е. в пространстве, не содержащем атомов. Несмотря на существенное отличие электромагнитных волн от механических, электромагнитные волны при распространении ведут себя подобно механическим.

## Распространение электромагнитных взаимодействий.

Фундаментальные законы природы, к числу которых относятся и открытые Максвеллом законы электромагнетизма, замечательны тем, что они могут дать гораздо больше, чем заключено в тех фактах, на основе которых они получены.

Среди бесчисленных, очень интересных и важных следствий, вытекающих из максвелловских законов электромагнетизма, одно заслуживает особого внимания. Это вывод о том, что электромагнитное взаимодействие распространяется с конечной скоростью.

Согласно теории дальнего действия кулоновская сила, действующая на электрический заряд, сразу же изменится, если соседний заряд сдвинуть с места. Действие, по этой теории, передается мгновенно. С точки зрения этой гипотезы иначе и быть не может: ведь один заряд непосредственно через пустоту «чувствует» присутствие другого.

Согласно же представлению о близкодействии все происходит не только совершенно иначе, но и намного сложнее. Перемещение заряда меняет электрическое поле вблизи него. Это переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле в соседних областях пространства. Переменное же магнитное поле, в свою очередь, порождает переменное электрическое поле и т. д.

Перемещение заряда вызывает, таким образом, «возмущение» электромагнитного поля, которое, распространяясь, охватывает все большие и большие области окружающего пространства, изменяя то поле, которое существовало до смещения заряда. Наконец, это «возмущение» достигает другого заряда, что и приводит к изменению действующей на него силы. Но произойдет это не в тот момент времени, когда произошло смещение первого заряда. Процесс распространения электромагнитного возмущения, механизм которого был открыт Максвеллом, происходит с конечной, хотя и очень

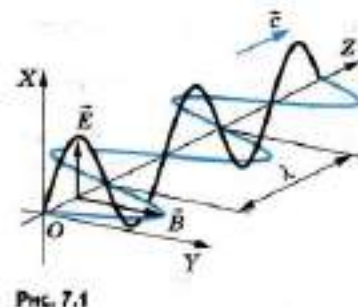
большой, скоростью. В этом и состоит фундаментальное свойство поля, которое не оставляет сомнений в его реальности.

Максвелл математически доказал, что скорость распространения этого процесса («возмущения» электромагнитного поля) равна скорости света в вакууме.

Электромагнитная волна.

Представьте себе, что электрический заряд не просто сместился из одной точки в другую, а был приведен в быстрые колебания вдоль некоторой прямой. Заряд движется подобно телу, подвешенному на пружине, но только колебания его происходят со значительно большей частотой. Тогда электрическое поле в непосредственной близости от заряда начнет периодически изменяться. Период этих изменений, очевидно, будет равен периоду колебаний заряда. Переменное электрическое поле будет порождать периодически меняющееся магнитное поле, а оно, в свою очередь, вызовет появление переменного электрического поля уже на большем расстоянии от заряда и т. д.

В окружающем заряд пространстве, захватывая все большие и большие области, возникает система взаимно перпендикулярных, периодически изменяющихся электрических и магнитных полей. На рисунке 7.1 изображен «мгновенный снимок» такой системы полей на большом расстоянии от колеблющегося заряда.



На этом рисунке показаны векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  в различных точках пространства. Направление  $Z$  — одно из направлений распространения электромагнитных возмущений.

Образуется так называемая электромагнитная волна, бегущая по всем направлениям от колеблющегося заряда.



## Тема 4.1 Свет как электромагнитная волна. Интерференция и дифракция света. Поляризация света.

**Цель: Познакомиться с понятиями интерференции, дифракции света и поляризации света.**

Электромагнитная теория света берет начало от работ Максвелла.

В основе электромагнитной теории света лежит факт совпадения скорости света со скоростью распространения электромагнитных волн.

Из теории Максвелла следовало, что электромагнитные волны являются поперечными. К тому времени поперечность световых волн уже была доказана экспериментально. Поэтому Максвелл обоснованно считал поперечность электромагнитных волн еще одним важным доказательством справедливости электромагнитной теории света.

После того как Герц экспериментально получил электромагнитные волны и измерил их скорость, электромагнитная теория света была впервые экспериментально подтверждена. Было доказано, что электромагнитные волны при распространении проявляют те же свойства, что и световые: отражение, преломление, интерференцию, поляризацию и др. В конце XIX в. было окончательно установлено, что световые волны возбуждаются движущимися в атомах заряженными частицами.

С признанием электромагнитной теории света постепенно исчезли все затруднения, связанные с необходимостью введения гипотетической среды — эфира, который приходилось рассматривать как твердое тело. Световые волны — это не механические волны в особой всепроникающей среде — эфире, а электромагнитные волны. Электромагнитные процессы подчиняются не законам механики, а законам электромагнетизма. Эти законы и были установлены в окончательной форме Максвеллом.

В электромагнитной волне векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  перпендикулярны друг другу. В естественном свете колебания напряженности  $\vec{E}$  электрического поля и магнитной индукции  $\vec{B}$  происходят по всем направлениям, перпендикулярным

на направление распространения волны. Если свет поляризован, то колебания векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  происходят не по всем направлениям, а в двух определенных плоскостях. Электромагнитная волна, изображенная на рисунке 7.1, является поляризованной.

Возникает естественный вопрос: если речь идет о направлении колебаний в световой волне, то, собственно говоря, колебания какого вектора —  $\vec{E}$  или  $\vec{B}$  — имеются в виду? Специально поставленные опыты доказали, что на сетчатку глаза или фотоэмульсию действует электрическое поле световой волны. В связи с этим за направление колебаний в световой волне принято направление вектора напряженности  $\vec{E}$  электрического поля.

Открытие электромагнитной теории света — одно из немногих открытий, сделанных на кончике пера, т. е. теоретически.

Всеобщее признание электромагнитная теория получила, однако, лишь после своего экспериментального подтверждения.

#### Интерференция света.

Если свет представляет собой поток волн, то должно наблюдаться явление интерференции света. Однако получить интерференционную картину (чередование максимумов и минимумов освещенности) с помощью двух независимых источников света, например двух электрических лампочек, невозможно. Включение еще одной лампочки лишь увеличивает освещенность поверхности, но не создает чередования минимумов и максимумов освещенности.

Выясним, в чем причина этого и при каких условиях можно наблюдать интерференцию света.

#### Дифракция света.

Если свет представляет собой волновой процесс, то наряду с интерференцией должна наблюдаться и дифракция света. Ведь дифракция — огибание волнами краев препятствий — присуща любому волновому движению. Но наблюдать дифракцию света нелегко, так как волны

отклоняются от прямолинейного распространения на заметные углы только на препятствиях, размеры которых сравнимы с длиной волны, а длина световой волны, как мы с вами знаем, очень мала.

Пропуская тонкий пучок света через маленькое отверстие, можно наблюдать нарушение закона прямолинейного распространения света: светлое пятно на экране против отверстия будет иметь большие размеры, чем размеры пучка.

В 1802 г. Т. Юнг, открывший интерференцию света, поставил классический опыт по дифракции. В непрозрачной ширме он проколол булавкой два маленьких отверстия В и С на небольшом расстоянии друг от друга. Эти отверстия освещались узким световым пучком, прошедшим через малое отверстие А в другой ширме. Именно эта деталь, до которой очень трудно было додуматься в то время, решила успех опыта. Интерферируют ведь только когерентные волны. Возникшая в соответствии с принципом Гюйгенса сферическая волна от отверстия Л возбуждала в отверстиях В и С когерентные колебания. Вследствие дифракции от отверстий В и С выходили два световых конуса, которые частично перекрывались. В результате интерференции этих двух световых волн на экране появлялись чередующиеся светлые и темные полосы. Закрывая одно из отверстий, Юнг обнаружил, что интерференционные полосы исчезали. Именно с помощью этого опыта впервые Юнгом были измерены длины волн, соответствующие световым лучам разного цвета, причем весьма точно.

#### **Тема 4.2 Законы отражения и преломления света. Формула тонкой линзы.**

**Цель: Познакомиться с законами отражения и преломления света, формулой тонкой линзы.**

Тонкая линза.

Электромагнитная теория света берет начало от работ Максвелла.

В основе электромагнитной теории света лежит факт совпадения скорости света со скоростью распространения электромагнитных волн.

Из теории Максвелла следовало, что электромагнитные волны являются поперечными. К тому времени поперечность световых волн уже была доказана экспериментально. Поэтому Максвелл обоснованно считал поперечность электромагнитных волн еще одним важным доказательством справедливости электромагнитной теории света. После того как Герц экспериментально получил электромагнитные волны и измерил их скорость, электромагнитная теория света была впервые экспериментально подтверждена. Было доказано, что электромагнитные волны при распространении проявляют те же свойства, что и световые: отражение, преломление, интерференцию, поляризацию и др. В конце XIX в. было окончательно установлено, что световые волны возбуждаются движущимися в атомах заряженными частицами.

С признанием электромагнитной теории света постепенно исчезли все затруднения, связанные с необходимостью введения гипотетической среды — эфира, который приходилось рассматривать как твердое тело. Световые волны — это не механические волны в особой всепроникающей среде — эфире, а электромагнитные волны. Электромагнитные процессы подчиняются не законам механики, а законам электромагнетизма. Эти законы и были установлены в окончательной форме Максвеллом. В электромагнитной волне векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  перпендикулярны друг другу. В естественном свете колебания напряженности  $\vec{E}$  электрического поля и магнитной индукции  $\vec{B}$  происходят по всем направлениям, перпендикулярным на направлению распространения волны. Если свет поляризован, то колебания векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  происходят не по всем направлениям, а в двух определенных плоскостях. Электромагнитная волна, изображенная на рисунке 7.1, является поляризованной.

Возникает естественный вопрос: если речь идет о направлении колебаний в световой волне, то, собственно говоря, колебания какого вектора —  $\vec{E}$  или  $\vec{B}$  — имеются в виду? Специально поставленные опыты доказали, что на

сетчатку глаза или фотоэмульсию действует электрическое поле световой волны. В связи с этим за направление колебаний в световой волне принято направление вектора напряженности  $\vec{E}$  электрического поля.

Открытие электромагнитной теории света — одно из немногих открытий, сделанных на кончике пера, т. е. теоретически.

Всеобщее признание электромагнитная теория получила, однако, лишь после своего экспериментального подтверждения.

Интерференция света.

Если свет представляет собой поток волн, то должно наблюдаться явление интерференции света. Однако получить интерференционную картину (чередование максимумов и минимумов освещенности) с помощью двух независимых источников света, например двух электрических лампочек, невозможно. Включение еще одной лампочки лишь увеличивает освещенность поверхности, но не создает чередования минимумов и максимумов освещенности.

Выясним, в чем причина этого и при каких условиях можно наблюдать интерференцию света.

Дифракция света.

Если свет представляет собой волновой процесс, то наряду с интерференцией должна наблюдаться и дифракция света. Ведь дифракция — огибание волнами краев препятствий — присуща любому волновому движению. Но наблюдать дифракцию света нелегко, так как волны отклоняются от прямолинейного распространения на заметные углы только на препятствиях, размеры которых сравнимы с длиной волны, а длина световой волны, как мы с вами знаем, очень мала.

Пропуская тонкий пучок света через маленькое отверстие, можно наблюдать нарушение закона прямолинейного распространения света: светлое пятно на экране против отверстия будет иметь большие размеры, чем размеры пучка.

### Опыт Юнга.

В 1802 г. Т. Юнг, открывший интерференцию света, поставил классический опыт по дифракции (рис. 8.55). В непрозрачной ширме он проколол булавкой два маленьких отверстия В и С на небольшом расстоянии друг от друга. Эти отверстия освещались узким световым пучком, прошедшим через малое отверстие А в другой ширме. Именно эта деталь, до которой очень трудно было додуматься в то время, решила успех опыта. Интерферируют ведь только когерентные волны. Возникшая в соответствии с принципом Гюйгенса сферическая волна от отверстия А возбуждала в отверстиях В и С когерентные колебания. Вследствие дифракции от отверстий В и С

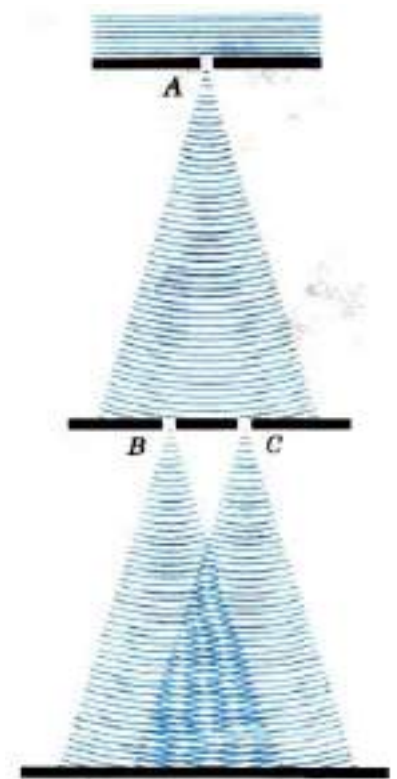


Рис. 8.55

выходили два световых конуса, которые частично перекрывались. В результате интерференции этих двух световых волн на экране появлялись чередующиеся светлые и темные полосы. Закрывая одно из отверстий, Юнг обнаружил, что интерференционные полосы исчезали. Именно с помощью этого опыта впервые Юнгом были измерены длины волн, соответствующие световым лучам разного цвета, причем весьма точно.

### Тонкая линза.

Мы рассмотрим наиболее простой случай, когда толщина линзы  $l = AB$  пренебрежимо мала по сравнению с радиусами  $R_1$  и  $R_2$  сферических поверхностей линзы (рис. 8.26) и расстоянием предмета от линзы. Такую линзу называют тонкой линзой. В дальнейшем, говоря о линзе, мы всегда будем подразумевать тонкую линзу.

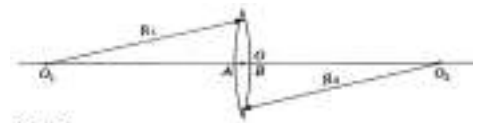


Рис. 8.26

Точки А и В — вершины сферических сегментов — расположены в тонкой линзе столь близко друг от друга, что их можно принять за одну точку,

которую называют оптическим центром линзы и обозначают буквой  $O$ . Луч света, который проходит через оптический центр линзы, не изменяет своего направления, а только смещается, но, так как линза тонкая, этим смещением можно пренебречь.

Прямую  $O_1O_2$  (см. рис. 8.26), проходящую через центры сферических поверхностей, которые ограничивают линзу, называют ее главной оптической осью. Главная оптическая ось тонкой линзы проходит через оптический центр. Любую другую прямую, проходящую через оптический центр, называют побочной оптической осью (рис. 8.27).

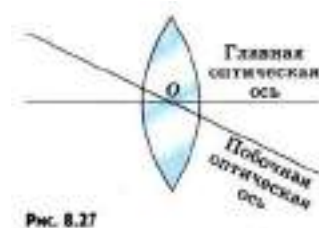


Рис. 8.27

### Изображение в линзе.

Подобно плоскому зеркалу, линза создает изображения источников света. Это означает, что свет, исходящий из какой-либо точки предмета (источника), после преломления в линзе снова собирается в одну точку (изображение) независимо от того, через какую часть линзы прошли лучи. Если по выходе из линзы лучи сходятся, они образуют действительное изображение. В случае же, когда прошедшие через линзу лучи расходятся, то пересекаются в одной точке не сами эти лучи, а лишь их продолжения. Изображение в этом случае мнимое. Его можно наблюдать глазом непосредственно или с помощью оптических приборов.

1 Лучи или их продолжения будут пересекаться практически в одной точке, если они образуют малые углы с главной оптической осью.

### Формула тонкой линзы. Увеличение линзы

Выведем формулу, связывающую три величины: расстояние  $d$  от предмета до линзы, расстояние  $f$  от изображения до линзы и фокусное расстояние  $F$ .

Из подобия треугольников  $AOB$  и  $A_1B_1O$  (см. рис. 8.37) следует равенство

$$\frac{BO}{OB_1} = \frac{AB}{A_1B_1}$$

Из подобия треугольников  $COF$  и  $FA_1B_1$  имеем:

$$\frac{CO}{A_1B_1} = \frac{OF}{FB_1}$$

Так как  $AB = CO$ , то

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{OF}{FB_1}$$

$$\frac{BO}{OB_1} = \frac{OF}{FB_1}$$

$$\frac{d}{f} = \frac{F}{f-F}$$

Учитывая свойство пропорции, имеем:

$$fF + Fd = fd$$

Поделив все члены полученного равенства на произведение  $Ffd$ , получим

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \quad (8.10)$$

$$D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \quad (8.11)$$

Уравнение (8.10), как и (8.11), принято называть формулой тонкой линзы. Величины  $d$ ,  $f$  и  $F$  могут быть как положительными, так и отрицательными. Отметим (без доказательства), что, применяя формулу линзы, нужно ставить знаки перед членами уравнения согласно следующему правилу. Если линза собирающая, то ее фокус действительный, и перед членом  $\frac{1}{|F|}$  ставят знак «+». В случае рассеивающей линзы  $F < 0$  и в правой части формулы (8.10) будет стоять отрицательная величина. Перед членом  $\frac{1}{|d|}$  ставят знак «+», если изображение действительное, и знак «-» в случае мнимого изображения. Наконец, перед членом  $\frac{1}{|d|}$  ставят знак «+» в случае действительной светящейся точки и знак «-», если она мнимая (т. е. на линзу падает сходящийся пучок лучей, продолжения которых пересекаются в одной точке).

В том случае, когда  $F$ ,  $f$  или  $d$  неизвестны, перед соответствующими членами  $\frac{1}{F}$ ,  $\frac{1}{f}$  или  $\frac{1}{d}$  ставят знак «+». Но если в результате вычислений фокусного



расстояния или расстояния от линзы до изображения либо до источника получается отрицательная величина, то это означает увеличение линзы.

Изображение, получаемое с помощью линзы, обычно отличается своими размерами от предмета. Различие размеров предмета и изображения характеризуют увеличением.

Линейное увеличение.

Линейным увеличением называют отношение линейного размера изображения к линейному размеру предмета.

Для нахождения линейного увеличения обратимся снова к рисунку 8.37. Если высота предмета  $AB$  равна  $h$ , а высота изображения  $A_1B_1$  равна  $H$ , то

$$\Gamma = \frac{H}{h} \quad (8.12)$$

есть линейное увеличение.

Из подобия треугольников  $AOB$  и  $OA_1B_1$  следует, что

$$\frac{H}{h} = \frac{|f|}{|d|}$$

Следовательно, увеличение линзы равно отношению расстояния от изображения до линзы к расстоянию от линзы до предмета:

$$\Gamma = \frac{|f|}{|d|} \quad (8.13)$$

Линзы являются основной частью фотоаппарата, проекционного аппарата, микроскопа, телескопа. В глазу тоже есть линза — хрусталик.

## **Тема 5.1 Световые кванты. Гипотеза Планка о квантах. Фотоэффект. Фотон. Световое давление. Импульс фотона.**

**Цель: Познакомиться с понятиями светового кванта, фотоэффекта, фотона, светового давления и гипотезы Планка.**

Согласно теории Максвелла, колеблющиеся электрические заряды испускают электромагнитные волны. Тогда излучение нагретых тел может быть объяснено колебаниями электрических зарядов в молекулах вещества. При этом плотность излучаемой энергии должна увеличиваться с частотой. Однако

опыт показывает, что при больших частотах плотность энергии становится малой, о чем свидетельствует характер спектра электромагнитного излучения.

В поисках выхода из этого противоречия между теорией и опытом немецкий физик Макс Планк предположил, что атомы испускают электромагнитную энергию не непрерывно, а отдельными порциями — квантами. Энергия  $E$  каждой порции прямо пропорциональна частоте  $\nu$  излучения:

$$E = h\nu$$

Коэффициент пропорциональности  $h$  получил название постоянной Планка.

Предположение Планка фактически означало, что законы классической физики совершенно неприменимы к явлениям микромира.

Разработанная Планком теория теплового излучения превосходно согласовывалась с экспериментом. По известному из опыта распределению энергии по частотам было определено значение постоянной Планка. Оно оказалось очень малым:

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

После открытия Планка начала развиваться новая, самая современная и глубокая физическая теория — квантовая теория. Развитие ее не завершено и по сей день.

Планк указал путь выхода из трудностей, с которыми столкнулась теория теплового излучения. Но этот успех был обеспечен ценой отказа от законов классической физики применительно к микроскопическим системам и излучению.

Фотоэффект.

Квантовым законам подчиняется поведение всех микрочастиц. Но впервые квантовые свойства материи были обнаружены именно при исследовании излучения и поглощения света.

В развитии представлений о природе света важный шаг был сделан при изучении одного замечательного явления, открытого Г. Герцем и тщательно исследованного выдающимся русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым. Явление это получило название фотоэффекта.

Фотоэффект — это испускание электронов из вещества под действием падающего на него света.

Законы фотоэффекта.

Для того чтобы получить о фотоэффекте более полное представление, нужно было выяснить, от чего зависит число вырванных светом с поверхности вещества электронов (фотоэлектронов) и чем определяется их скорость или кинетическая энергия.

Фотоны.

В современной физике фотон рассматривается как одна из элементарных частиц.

Энергия и импульс фотона.

При испускании и поглощении свет ведет себя подобно потоку частиц с энергией  $E = h\nu$ , зависящей от частоты. Порция света оказалась неожиданно очень похожей на то, что принято называть частицей. Свойства света, обнаруживаемые при его излучении и поглощении, назвали корпускулярными. Сама же световая частица была названа фотоном, или квантом электромагнитного излучения.

Фотон, подобно частице, обладает определенной порцией энергии  $h\nu$ . Энергию фотона часто выражают не через частоту  $\nu$ , а через циклическую частоту  $\omega = 2\pi\nu$ . При этом в формуле для энергии фотона в качестве коэффициента пропорциональности вместо величины  $h$  используют величину  $\bar{h} = \frac{h}{2\pi}$  (читается: аш с чертой), равную, по современным данным,  $\bar{h} = 1,0545726 \cdot 10^{-34}$  Дж · с (последние два знака определены с точностью до  $\pm 40$ ). Тогда энергия фотона выражается так:

$$E = h\nu = \bar{h}\omega \quad (14.4)$$

Согласно теории относительности, энергия всегда связана с массой соотношением  $E = mc^2$ . Так как энергия фотона равна  $h\nu$ , то, следовательно, его масса  $m$  получается равной

$$m = \frac{h\nu}{c^2} \quad (11.5)$$

У фотона нет собственной массы, он не существует в состоянии покоя и при рождении сразу имеет скорость  $c$ . Масса, определяемая формулой (11.5), — это масса движущегося фотона. По известной массе и скорости фотона можно найти его импульс:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (11.6)$$

Направление импульса фотона совпадает с направлением светового луча.

Чем больше частота  $\nu$ , тем больше энергия  $E$  и импульс  $p$  фотона и тем отчетливее проявляются корпускулярные свойства света. Из-за того, что постоянная Планка мала, энергия фотонов видимого излучения крайне незначительна. Фотоны, соответствующие зеленому свету, имеют энергию  $4 \cdot 10^{-19}$  Дж.

Тем не менее, в своих замечательных опытах С. И. Вавилов установил, что человеческий глаз, этот точнейший из «приборов», способен реагировать на различие освещенностей, измеряемое единичными квантами.

Корпускулярно-волновой дуализм.

Законы теплового излучения и фотоэффекта можно объяснить только на основе представления, согласно которому свет — это поток частиц-фотонов. Однако явления интерференции и дифракции света свидетельствуют и о волновых свойствах света. Свет обладает, таким образом, своеобразным дуализмом (двойственностью) свойств. При распространении света проявляются его волновые свойства, а при взаимодействии с веществом (излучении и поглощении) — корпускулярные. Это, конечно, странно и непривычно, так как частица и волна абсолютно разные физические объекты. Мы не имеем возможности представлять себе наглядно в полной мере процессы

в микромире, так как они совершенно отличны от тех макроскопических явлений, которые люди наблюдали на протяжении миллионов лет и основные законы которых были сформулированы к концу XIX в.

**Тема 5.2 Физика атома, атомного ядра. Структура атома:  
планетарная модель атома. Поглощение и испускание света атомом.**

**Квантовая энергия. Модель Бора.**

**Цель: Познакомиться с разными моделями строения ядра, понятием квантовой энергии.**

Протонно-нейтронная модель ядра.

Согласно протонно-нейтронной модели ядра состоят из элементарных частиц двух видов — протонов и нейтронов.

Так как в целом атом электрически нейтрален, а заряд протона равен модулю заряда электрона, то число протонов в ядре равно числу электронов в атомной оболочке. Следовательно, число протонов в ядре равно атомному номеру элемента  $Z$  в периодической системе элементов Д. И. Менделеева.

Сумму числа протонов  $Z$  и числа нейтронов  $N$  в ядре называют массовым числом и обозначают буквой  $A$ :

$$A = Z + N. \quad (13.2)$$

Массы протона и нейтрона близки друг к другу, и каждая из них примерно равна атомной единице массы. Масса электронов в атоме много меньше массы его ядра. Поэтому массовое число ядра равно округленной до целого числа относительной атомной массе элемента. Массовые числа могут быть определены путем приближенного измерения массы ядер приборами, не обладающими высокой точностью.

Изотопы представляют собой ядра с одним и тем же значением  $Z$ , но с различными массовыми числами  $A$ , т. е. с различными числами нейтронов  $N$ .

Квантовые постулаты Бора. Модель атома водорода по Бору

Выход из крайне затруднительного положения в теории атома был найден в 1913 г. датским физиком Нильсом Бором на пути дальнейшего развития квантовых представлений о процессах в природе.

Эйнштейн оценивал проделанную Бором работу «как высшую музыкальность в области мысли», всегда его поражавшую. Основываясь на разрозненных опытных фактах, Бор благодаря гениальной интуиции правильно предугадал путь развития теории атома.

При поглощении света атом переходит из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией.

Второй постулат, также, как и первый, противоречит электродинамике Максвелла, так как согласно этому постулату частота излучения света свидетельствует не об особенностях движения электрона, а лишь об изменении энергии атома.

Свои постулаты Бор применил для построения теории простейшей атомной системы — атома водорода. Основная задача состояла в нахождении частот электромагнитных волн, излучаемых водородом. Эти частоты можно найти на основе второго постулата и правила определения стационарных значений энергии атома. Это правило (так называемое правило квантования) Бору опять-таки пришлось постулировать.

Используя законы механики Ньютона и правило квантования, на основе которого определяются возможные стационарные состояния атома, Бор смог вычислить радиусы орбит электрона и энергии стационарных состояний атома. Минимальный радиус орбиты определяет размеры атома. На рисунке 12.4 значения энергий стационарных состояний (в электрон-вольтах<sup>1</sup>) отложены на вертикальной оси.

Теория Бора приводит к количественному согласию с экспериментом для значений этих частот. Все частоты излучений атома водорода составляют в своей совокупности ряд серий, каждая из которых образуется при переходах

атома в одно из энергетических состояний со всех верхних энергетических состояний (состояний с большей энергией).

Переходы в первое возбужденное состояние (на второй энергетический уровень) с верхних уровней образуют серию Бальмера. На рисунке 12.4 эти переходы изображены стрелками. Красная, зеленая и две синие линии в видимой части спектра водорода соответствуют переходам

$$E_3 \rightarrow E_2, E_4 \rightarrow E_2, E_5 \rightarrow E_2, E_6 \rightarrow E_2.$$

Данная серия названа по имени швейцарского учителя И. Бальмера, который еще в 1885 г. на основе экспериментальных данных получил простую формулу для определения частот видимой части спектра водорода.

Поглощение света.

Поглощение света — процесс, обратный излучению. Атом, поглощая свет, переходит из низших энергетических состояний в высшие. При этом он поглощает излучение той же самой частоты, которую излучает, переходя из высших энергетических состояний в низшие.

На основе двух постулатов и правила квантования Бор определил радиус атома водорода и энергии стационарных состояний атома. Это позволило вычислить частоты излучаемых и поглощаемых атомом электромагнитных волн.

Протонно-нейтронная модель ядра.

Согласно протонно-нейтронной модели ядра состоят из элементарных частиц двух видов — протонов и нейтронов.

Так как в целом атом электрически нейтрален, а заряд протона равен модулю заряда электрона, то число протонов в ядре равно числу электронов в атомной оболочке. Следовательно, число протонов в ядре равно атомному номеру элемента  $Z$  в периодической системе элементов Д. И. Менделеева.

Сумму числа протонов  $Z$  и числа нейтронов  $N$  в ядре называют массовым числом и обозначают буквой  $A$ :

$$A = Z + N. \quad (13.2)$$

Массы протона и нейтрона близки друг к другу, и каждая из них примерно равна атомной единице массы. Масса электронов в атоме много меньше массы его ядра. Поэтому массовое число ядра равно округленной до целого числа относительной атомной массе элемента. Массовые числа могут быть определены путем приближенного измерения массы ядер приборами, не обладающими высокой точностью.

Изотопы представляют собой ядра с одним и тем же значением  $Z$ , но с различными массовыми числами  $A$ , т. е. с различными числами нейтронов  $N$ .

### **Тема 5.3 Строение атомного ядра. Энергия расщепления. Ядерные силы, ядерные реакции.**

**Цель: Познакомиться со строением атомного ядра, энергией расщепления, ядерными силами и реакциями.**

Ядерные силы.

Так как ядра весьма устойчивы, то протоны и нейтроны должны удерживаться внутри ядра какими-то силами, причем очень большими. Что это за силы? Сразу можно сказать, что это не гравитационные силы, которые слишком слабые. Устойчивость ядра не может быть объяснена также электромагнитными силами, так как между одноименно заряженными протонами действует электрическое отталкивание. А нейтроны не имеют электрического заряда.

Значит, между ядерными частицами — протонами и нейтронами (их называют нуклонами) — действуют особые силы, называемые ядерными силами.

Каковы основные свойства ядерных сил? Ядерные силы примерно в 100 раз превышают электрические (кулоновские) силы. Это самые мощные силы из всех существующих в природе. Поэтому взаимодействия ядерных частиц часто называют сильными взаимодействиями.



Сильные взаимодействия проявляются не только во взаимодействиях нуклонов в ядре. Это особый тип взаимодействий, присущий большинству элементарных частиц наряду с электромагнитными взаимодействиями.

Другая важная особенность ядерных сил — их коротко-действие. Электромагнитные силы сравнительно медленно ослабевают с увеличением расстояния. Ядерные силы заметно проявляются лишь на расстояниях, равных размерам ядра ( $10^{-12}$  —  $10^{-13}$  см), что показали уже опыты Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц атомными ядрами. Ядерные силы — это, так сказать, «богатырь с очень короткими руками». Законченная количественная теория ядерных сил пока еще не разработана. Значительные успехи в ее разработке были достигнуты совсем недавно — в последние 10 — 15 лет.

Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов. Эти частицы удерживаются в ядре ядерными силами.

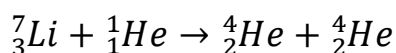
Ядерные реакции.

Ядерными реакциями называют изменения атомных ядер при взаимодействии их с элементарными частицами или друг с другом. С примерами ядерных реакций вы уже ознакомились. Ядерные реакции происходят, когда частицы вплотную приближаются к ядру и попадают в сферу действия ядерных сил. Одноименно заряженные частицы отталкиваются друг от друга. Поэтому сближение положительно заряженных частиц с ядрами (или ядер друг с другом) возможно, если этим частицам (или ядрам) сообщена достаточно большая кинетическая энергия. Эта энергия сообщается протонам, ядрам дейтерия — дейтронам,  $\alpha$ -частицам и другим более тяжелым ядрам с помощью ускорителей.

Для осуществления ядерных реакций такой метод гораздо эффективнее, чем использование ядер гелия, испускаемых радиоактивными элементами. Во-первых, с помощью ускорителей частицам может быть сообщена энергия порядка  $10^5$  МэВ, т. е. гораздо большая той, которую имеют  $\alpha$ -частицы (максимально 9 МэВ). Во-вторых, можно использовать протоны, которые в

процессе радиоактивного распада не появляются (это целесообразно потому, что заряд протонов вдвое меньше заряда  $\alpha$ -частиц, и поэтому действующая на них сила отталкивания со стороны ядер тоже в 2 раза меньше). В-третьих, можно ускорить ядра более тяжелые, чем ядра гелия.

Первая ядерная реакция на быстрых протонах была осуществлена в 1932 г. Удалось расщепить литий на две  $\alpha$ -частицы:



Как видно из фотографии треков в камере Вильсона (рис. 13.12), ядра гелия разлетаются в разные стороны вдоль одной прямой согласно закону сохранения импульса (импульс протона много меньше импульса возникающих  $\alpha$ -частиц; на фотографии треки протонов не видны).



Рис. 13.12

В описанной выше ядерной реакции кинетическая энергия двух образующихся ядер гелия оказалась больше кинетической энергии вступившего в реакцию протона на 7,3 МэВ. Превращение ядер сопровождается изменением их внутренней энергии (энергия связи). В рассмотренной реакции удельная энергия связи в ядрах гелия больше удельной энергии связи в ядре лития. Поэтому часть внутренней энергии ядра лития превращается в кинетическую энергию разлетающихся  $\alpha$ -частиц.

Изменение энергии связи ядер означает, что суммарная энергия покоя участвующих в реакциях ядер и частиц не остается неизменной. Ведь энергия покоя ядра  $M_{\text{я}}c^2$  согласно формуле (13.5) непосредственно выражается через энергию связи. В соответствии с законом сохранения энергии изменение кинетической энергии в процессе ядерной реакции равно изменению энергии покоя участвующих в реакции ядер и частиц.

Энергетический выход ядерной реакции.

Энергетическим выходом ядерной реакции называется разность энергий покоя ядер и частиц до реакции и после реакции. Согласно вышесказанному энергетический выход ядерной реакции равен также изменению кинетической энергии частиц, участвующих в реакции.

Если суммарная кинетическая энергия ядер и частиц после реакции больше, чем до реакции, то говорят о выделении энергии. В противном случае реакция идет с поглощением энергии. Именно такая реакция происходит при бомбардировке азота  $\alpha$ -частицами. Часть кинетической энергии (примерно  $1,2 \cdot 10^6$  эВ) переходит в процессе этой реакции во внутреннюю энергию вновь образовавшегося ядра.

Выделяющаяся при ядерных реакциях энергия может быть огромной. Но использовать ее при столкновениях ускоренных частиц (или ядер) с неподвижными ядрами мишени практически нельзя. Ведь большая часть ускоренных частиц пролетает мимо ядер мишени, не вызывая реакцию.

## **Тема 5.4 Энергия связи. Дефект масс. Ядерный реактор.**

### **Термоядерные реакции.**

**Цель: Познакомиться с понятиями энергии связи, дефекта масс, ядерного реактора, уравнениями термоядерных реакций.**

Энергия связи атомных ядер.

Важнейшую роль во всей ядерной физике играет понятие энергии связи ядра. Энергия связи позволяет объяснить устойчивость ядер, выяснить, какие процессы ведут к выделению ядерной энергии. Нуклоны в ядре прочно удерживаются ядерными силами. Для того чтобы удалить нуклон из ядра, надо совершить довольно большую работу, т. е. сообщить ядру значительную энергию.

Под энергией связи ядра понимают ту энергию, которая необходима для полного расщепления ядра на отдельные нуклоны. На основе закона сохранения энергии можно также утверждать, что энергия связи ядра равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц.

Энергия связи атомных ядер очень велика. Но как ее определить?

В настоящее время рассчитать энергию связи теоретически, подобно тому как это можно сделать для электронов в атоме, не удастся. Выполнить

соответствующие расчеты можно, лишь применяя соотношение Эйнштейна между массой и энергией:

$$E = mc^2. \quad (13.3)$$

Точнейшие измерения масс ядер показывают, что масса покоя ядра  $M_{\text{я}}$  всегда меньше суммы масс входящих в его состав протонов и нейтронов:

$$M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n \quad (13.4)$$

Существует, как говорят, дефект масс: разность масс положительна:

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}$$

В частности, для гелия масса ядра на 0,75% меньше суммы масс двух протонов и двух нейтронов. Соответственно для гелия в количестве вещества один моль  $\Delta M = 0,03$  г.

Уменьшение массы при образовании ядра из нуклонов означает, что при этом уменьшается энергия этой системы нуклонов на значение энергии связи  $E_{\text{св}}$ :

$$E_{\text{св}} = \Delta M c^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}) c^2 \quad (13.5)$$

Но куда при этом исчезают энергия  $E_{\text{св}}$  и масса  $\Delta M$ ?

При образовании ядра из частиц последние за счет действия ядерных сил на малых расстояниях устремляются с огромным ускорением друг к другу. Излучаемые при этом  $\gamma$ -кванты как раз обладают энергией  $E_{\text{св}}$  и массой

$$\Delta M = \frac{E_{\text{св}}}{c^2}$$

Энергия связи — это энергия, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц, и соответственно это та энергия, которая необходима для расщепления ядра на составляющие его частицы.

О том, как велика энергия связи, можно судить по такому примеру: образование 4 г гелия сопровождается выделением такой же энергии, что и при сгорании 1,5 — 2 вагонов каменного угля.

Термоядерные реакции.

Масса покоя ядра урана больше суммы масс покоя осколков, на которые делится ядро. Для легких ядер дело обстоит как раз наоборот. Так, 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 и, следовательно, должна выделяться значительная энергия. 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 температуре.

Для слияния ядер необходимо, чтобы они сблизилась на расстояние около  $10^{-12}$  см, т. е. чтобы они попали в сферу действия ядерных сил. Этому сближению препятствует кулоновское отталкивание ядер, которое может быть преодолено лишь за счет большой кинетической энергии теплового движения ядер.

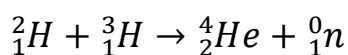
Энергия, которая выделяется при термоядерных реакциях в расчете на один нуклон, превышает удельную энергию, выделяющуюся при цепных реакциях деления ядер. Так, при слиянии тяжелого водорода — дейтерия — со сверхтяжелым изотопом водорода — тритием — выделяется около 3,5 МэВ на один нуклон. При делении же урана выделяется примерно 1 МэВ энергии на один нуклон.

Термоядерные реакции играют большую роль в эволюции Вселенной. Энергия излучения Солнца и звезд имеет термоядерное происхождение. По современным представлениям, на ранней стадии развития звезда в основном состоит из водорода. Температура внутри звезды столь велика, что в ней протекают реакции слияния ядер водорода с образованием гелия. Затем при слиянии ядер гелия образуются и более тяжелые элементы.

Термоядерные реакции играют решающую роль в эволюции химического состава вещества во Вселенной. Все эти реакции сопровождаются выделением

энергии, обеспечивающей излучение света звездами на протяжении миллиардов лет.

Осуществление управляемых термоядерных реакций на Земле сулит человечеству новый, практически неисчерпаемый источник энергии. Наиболее перспективной в этом отношении реакцией является реакция слияния дейтерия с тритием:



В этой реакции выделяется энергия 17,6 МэВ. Поскольку трития в природе нет, он должен вырабатываться в самом термоядерном реакторе из лития.

Экономически выгодная реакция, как показывают расчеты, может идти только при нагревании реагирующих веществ до температуры порядка сотен миллионов кельвин при большой плотности вещества ( $10^{14}$  —  $10^{15}$  частиц в  $1\text{ см}^3$ ). Такие температуры могут быть в принципе достигнуты путем создания в плазме мощных электрических разрядов. Основная трудность на этом пути состоит в том, чтобы удержать плазму столь высокой температуры внутри установки в течение 0,1 — 1 с.

Никакие стенки из вещества здесь не годятся, так как при столь высокой температуре они сразу же превратятся в пар. Единственным возможным является метод удержания высокотемпературной плазмы в ограниченном объеме с помощью очень сильных магнитных полей. Однако до сих пор решить эту задачу не удалось из-за неустойчивости плазмы. Неустойчивость приводит к диффузии части заряженных частиц сквозь магнитные стенки.

Для уменьшения неоднородности магнитного поля, приводящей к изменению конфигурации плазменного столба и соответственно к его неустойчивости, академиками А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом была предложена форма плазменного столба в виде тора, которая используется на установке, называемой «Токамак».

На этой установке удалось получить плазму температурой  $1,3 \cdot 10^7$  К. Однако проблема ее удержания еще не решена.

Помимо энергетического преимущества, при термоядерных реакциях не образуются радиоактивные отходы, т. е. не надо решать проблемы загрязнения окружающей среды.

В настоящее время существует уверенность в том, что рано или поздно термоядерные реакторы будут созданы.

Ученые нашей страны достигли больших успехов в создании управляемых термоядерных реакций. Эти работы были начаты под руководством академиков Л. А. Арцимовича и М. А. Леонтовича и продолжаются их учениками.

Пока же удалось осуществить лишь неуправляемую реакцию синтеза взрывного типа в водородной (или термоядерной) бомбе. Осуществление управляемых термоядерных реакций способно решить энергетическую проблему человечества. Неуправляемые термоядерные реакции в водородных бомбах могут человечество уничтожить.

## ЛИТЕРАТУРА

### Основная:

1. Рымкевич А.П. Физика. Задачник. 10-11 кл.: пособие для общеобразоват. учреждений: Дрофа, 20 (Задачники «Дрофы»), 2021 г.
2. Физика: учебник для 10,11 кл. общеобразоват. Учреждений/ Г. Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев. – М.: Просвещение, 2021 г.
3. Громцева. Сборник задач 10-11. Экзамен, 2021 г.
4. Белага В.В. Физика. 10 кл. и 11 кл. - М.: Просвещение, 2021.
5. Генденштейн Л.Э. Физика. 10 кл. и 11 кл. - М.: Просвещение, 2021.

### Дополнительная:

6. Методические указания по проведению практических работ по учебной дисциплине ПД. 01 Физика, 2021 г.
7. Методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы обучающихся по учебной дисциплине ПД. 01 Физика, 2021 г.
8. Методические указания и контрольные задания для студентов заочной формы обучения по учебной дисциплине ПД. 01 Физика, 2021 г.
9. Фонд оценочных средств по учебной дисциплине ПД. 01 Физика, 2021 г.