Қостанай облысы әкімдігі білім басқармасының
«Қостанай жоғары политехникалық колледжі» КМҚК
КГКП «Костанайский политехнический высший колледж»
Управления образования акимата Костанайской области

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
ПО ФИЗИКЕ



Костанай, 2021 г

СОДЕРЖАНИЕ

Теоретическая часть
Раздел 1. Механика 5
1. Основные понятия и уравнения кинематики 5
2. Ускорение свободного падения. Движение тела под действием силы тяжести. Вращательное движение. 10
3. Законы Ньютона. Закон всемирного тяготения. 13
4. Потенциальная энергия тела в гравитационном поле. 15
5. Закон сохранения и превращения энергий. Закон сохранения импульса. 17
6. Уравнение Бернулли. Вязкая жидкость. Обтекание тел. Подъемная сила крыла. 19
Раздел 2. Основы молекулярно-кинетической теории и термодинамики 22
7. Основные положения МКТ и их опытное обоснование. Броуновское движение. Опыты Штерна. 22
8. Масса и размеры молекул. Количество вещества. Молярная масса. 25
9. Идеальный газ. Основное уравнение МКТ идеального газа. Термодинамические параметры. Температура и способы ее измерения. 27
10. Уравнения состаяния идеального газа. Закон Дальтона и Авогадро. Изопроцессы. Газовые законы. 30
11. Реальные газы. Применение газов в технике. 33
12. Внутренняя энергия идеального газа и способы ее изменения. I закон термодинамики. Работа газов. 37
13. Количество теплоты. Теплоемкость. Уравнение теплового баланса. Применение I закона термодинамики к изопроцессам. Адиабатный процесс. 39
14. Необратимость тепловых процессов. Тепловые двигатели и их К.П.Д. Холодильная машина. II закон термодинамики. 44
15. Свойства паров. Кипение. Критическое состояние вещества. Влажность воздуха. 47
16. Свойства поверхностного слоя жидкости. Капиллярные явления, смачивание. 51
17. Строение кристаллических и амофорных тел. Деформация и ее виды. Закон Гука. Модуль Юнга. 56
18. Фазы вещества на земле и в космосе. Процессы: плавления, кристаллизации, кипения, конденсации. 63
Раздел 3. Электрические явления 66
19. Электризация тел и ее виды. Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона. 66
20. Электрическое поле и его свойства. Напряженность электрического поля. 69
21. Потенциал электрического поля. Работа электрического поля. Проводники и диэлектрики в электрическом поле. 73
22. Электроемкость. Конденсаторы. Емкость плоского конденсатора. 79
23. Соединение конденсаторов. Энергия и плотность энергии электрического поля. 82
24. Электрический ток. Сила тока. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление проводника. 83
25. Электрические цепи с последовательным и параллельным соединением проводников. 86
26. Э.Д.С. Закон Ома для полной цепи. КПД источника тока. Законы Кирхгофа. 88
27. Электрический ток в металлах. Основные положения электронной теории проводимости. Сверхпроводимость. 92
28. Электрический ток в полупроводниках. Полупроводниковый диод, транзистор. Электрический ток в газах. Виды газовых разрядов. Электрический ток в вакууме. Плазма – четвертое состояние вещества. 94
29. Магнитное поле и его свойства. Закон Ампера. Закон Био-Савара-Лапласа. Магнитное поле прямого тока, кругового тока, соленоида. 104

30. Сила Лоренца. Действие магнитного поля, движущиеся электрические заряды. Магнитные свойства вещества. 107
31. Закон электромагнитной индукции. Определение направления индукционного тока. Правило Ленца. 113
32. ЭДС индукции в движущихся проводниках. Явление самоиндукции. 115
Раздел 4. Колебания и волны 118
33. Механические колебания и волны. Звук и ультразвук. Колебательное движение. Механические колебания математического и пружинного маятников. 118
34. Аналогия между механическими и электромагнитными колебаниями. Графики гармонических колебаний. 126
35. Переменный электрический ток и его основные характеристики. Активное сопротивление в цепи переменного тока. Конденсатор и катушка индуктивности в цепи переменного тока. Закон Ома для полной цепи. 131
36. Электрический резонанс в цепи переменного тока. Генератор переменного тока.тока. Мощность в цепи переменного тока. 139
37. Трансформатор. Производство и передача электрической энергии. 142
38. Учение об электромагнитном поле. Идеи Максвелла. Электромагнитные волны. 146
39. Излучение электромагнитных волн. Опыты Герца. Энергия и свойства электромагнитных волн.. 151
40. Изобретение радио А.С. Поповым. Принципы современной радиосвязи. Модуляция и детектирование. 153
41. Распространение радиоволн. Радиолокация. Понятие о телевидении. Современные средства связи. 155
42. Шкала электромагнитных волн. биологическое действие высокочастотных электромагнитных волн и защита от них. 158
Раздел 5. Оптика. Основы теории относительности 162
43. Электромагнитная природа света. Квантовая теория света. Скорость распространения света в вакууме.Определение скорости света. 162
44. Законы отражения. Плоские и сферические зеркала. Законы преломления света. 165
45. Линзы. Формула тонкой линзы. Построение изображений в тонкой линзе. 168
46. Понятие о волновом движении. Явления интерференции и дифракции волн. 173
47. Интерференция света. Практическое применение интерференции света. Дифракция света. Дифракционная решетка. 177
48. Дисперсия света. Распределение энергии в непрерывном спектре. Спектры испускания и поглощения. 180
49. Ультрафиолетовая и инфракрасная части спектра. Рентгеновские лучи, их природа и свойства, применение в науке и технике. 183
50. Принцип относительности Эйнштейна. Относительность расстояний. Относительность одновременности. 186
51. Релятивистский закон сложения скоростей. Релятивистская динамика. Зависимость массы от скорости. Связь массы и энергии. 188
52. Внешний фотоэлектрический эффект. Законы внешнего фотоэффекта. Фотоны. 191
53. Внутренний фотоэффект, его особенность. Применение фотоэффекта в технике. Давление света. 195
Раздел 6. Физика атома и атомного ядра 197
54. Строение атома. Опыт Резерфорда по рассеиванию α-частиц. Модель атома по Резерфорду. Постулаты Бора. 197
55. Открытие волновых свойств частиц. Волны Луи де Бройля. Спонтанное и вынужденное излучение. Квантовые источники света. Лазер. 199
56. Атомное ядро. Нуклонная модель ядра. Энергия связи нуклонов в ядре. Удельная энергия связи. 204

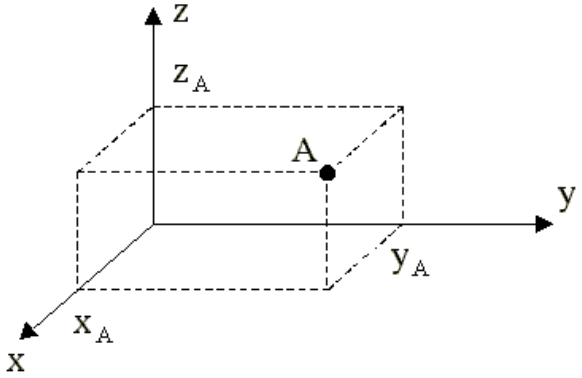
57. Открытие явления естественной радиоактивности. Закон радиоактивного распада. 206
58. Искусственная радиоактивность. Деление тяжелых ядер. Ядерная энергетика. Термоядерные реакции..... 208
59. Вглубь материи: от атома к кваркам. Современная научная картина мира. Проблемы элементарных частиц. 211
60. Звезды и Солнце. Планеты и малые тела солнечной системы. 213
61. Наша Галактика. Открытие других галактик. С ение звезд. Необратимость развития материального мира. 217
Практикум 220
Лабораторная работа № 1 Изучение равноускоренного движения 220
Лабораторная работа № 2 Определение коэффициента жесткости пружины 222
Лабораторная работа № 3 Сила трения. Определение коэффицента трения скольжения..... 224
Лабораторная работа № 4 Определение относительной влажности воздуха 226
Лабораторная работа № 5 Исследование смешанного соединения проводников 227
Лабораторная работа № 6 Определение мощности электрической лампы. 229
Лабораторная работа № 7 Определение электродвижущей силы и внутреннего сопротивления источника тока 230
Лабораторная работа № 8 Определение электрохимического эквивалента меди 232
Лабораторная работа № 9 Определение показателя преломления стекла 234
Лабораторная работа № 10 Изучение формулы тонкой линзы 235
Лабораторная работа № 11 Наблюдение интерференции и дифракции света. 237
Лабораторная работа № 12 Измерение длины световой волны с помощью дифракционной решетки. 238
Тестовые задания 240
Тематика рефератов и докладов 294
Вопросы для итогового контроля 295
Дескриптор к Разделу Электрические явления 326
Литература 331

Раздел 1. Механика

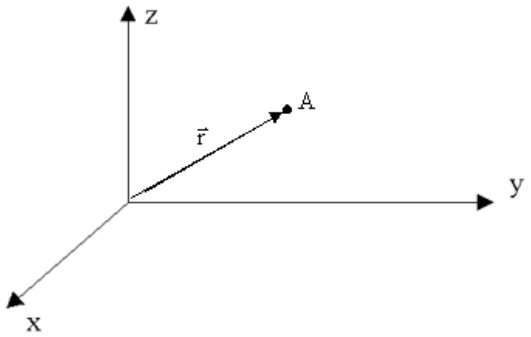
1. Основные понятия и уравнения кинематики.

Координаты точки

Первый способ задать положение материальной точки – это задать ее координаты. Например, три числа X_A, Y_A, Z_A задают положение точки A в декартовой системе координат.

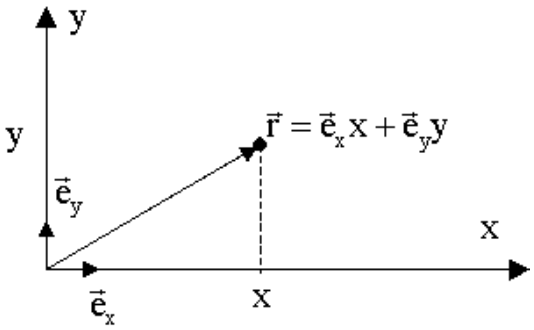


Радиус-вектор r – это вектор, проведенный из начала координат в какую-либо точку пространства.

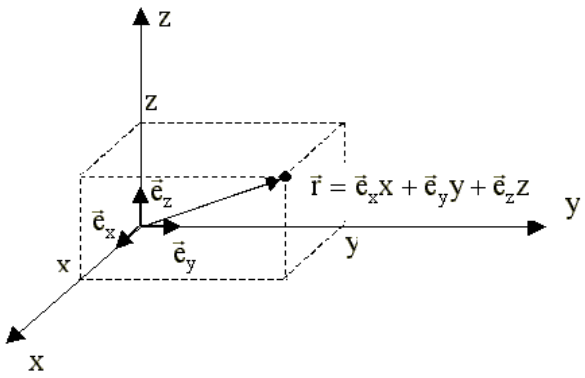


Компоненты радиус-вектора

На плоскости:



В трехмерном пространстве:



$\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ - единичные векторы или орты, направленные по осям x, y, z соответственно;

x, y, z - компоненты радиус-вектора. Очевидно, они же являются координатами материальной точки.

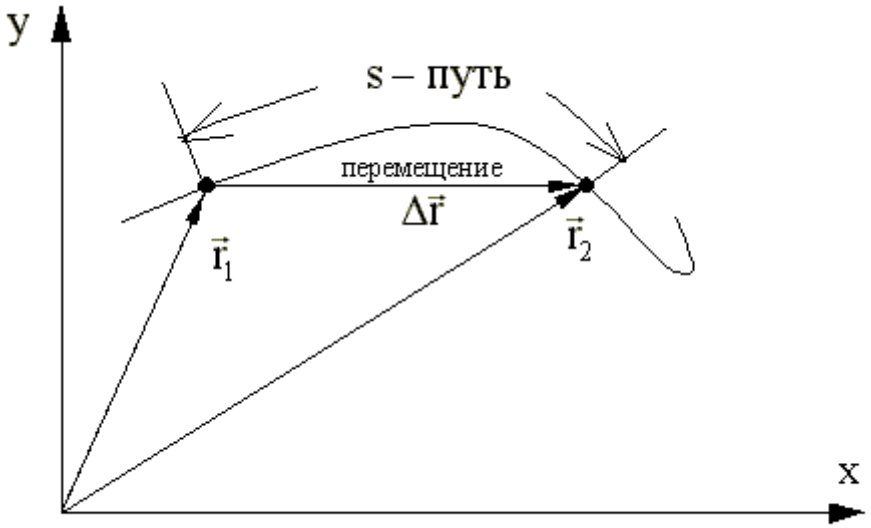
Модуль радиус-вектора

$$|\vec{r}| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$ - по теореме Пифагора.

Траектория – это линия, описываемая материальной точкой при ее движении.

Путь – длина отрезка траектории.

Перемещение – вектор, проведенный из начального положения, материальной точки в ее конечное положение.

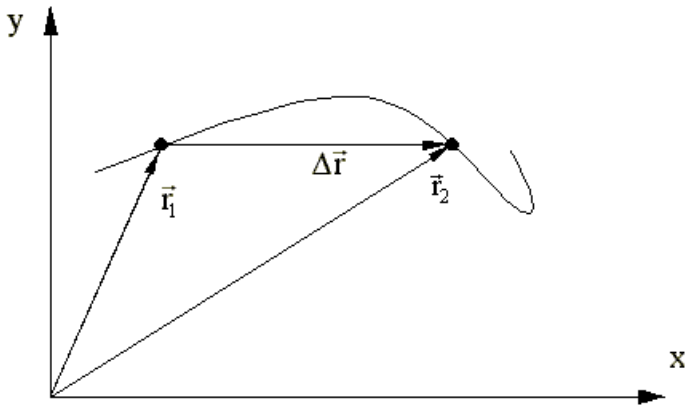


Скорость – это производная радиус-вектора по времени.

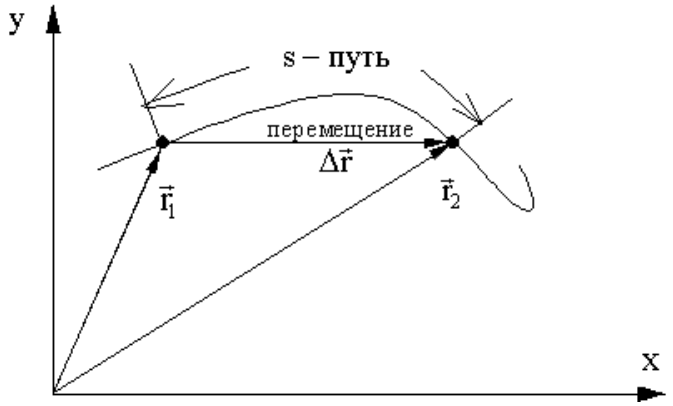
$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$ либо, применяя другое обозначение производной по времени, $$\vec{v} = \dot{\vec{r}}$$

Скорость направлена по касательной к траектории

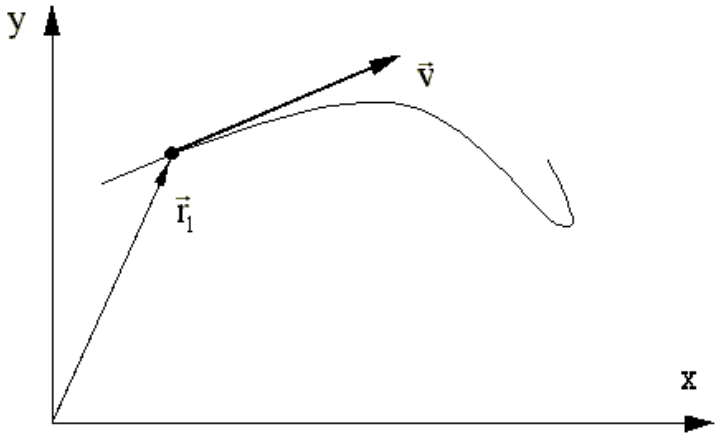
Так как $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$, то направление вектора $\vec{\mathrm{v}}$ совпадает с предельным направлением вектора $\Delta\vec{\mathrm{r}}$. На рис. а), б), в) показаны этапы предельного перехода для плоского движения (для простоты иллюстрации):



При приближении $\vec{\mathrm{r}}_2$ к $\vec{\mathrm{r}}_1$, $\Delta\vec{\mathrm{r}}$ по направлению приближается к касательной.



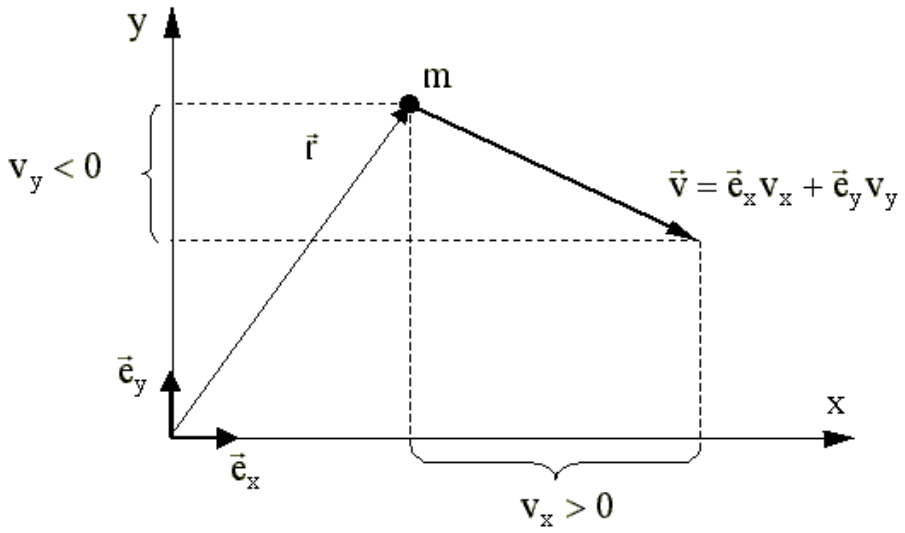
Как известно из геометрии, касательная есть предельное положение секущей.



Значит, ***скорость направлена по касательной к траектории.***

Компоненты скорости

На следующем рисунке изображен вектор скорости $\vec{\mathrm{v}}$ материальной точки М, движущейся по плоскости x, y:



v_x, v_y – компоненты скорости, т.е. проекции вектора на координатные оси.

Так как $\vec{v} \overset{(3.8)}{=} \dot{\vec{r}} \overset{(3.4.2.1)}{=} \vec{e}_x \dot{x} + \vec{e}_y \dot{y}$.

С другой стороны: $\vec{v} = \vec{e}_x v_x + \vec{e}_y v_y$,

откуда $v_x = \dot{x}$, $v_y = \dot{y}$, так же и $v_z = \dot{z}$,

т.е. ***компоненты скорости равны производным соответствующих координат по времени***.

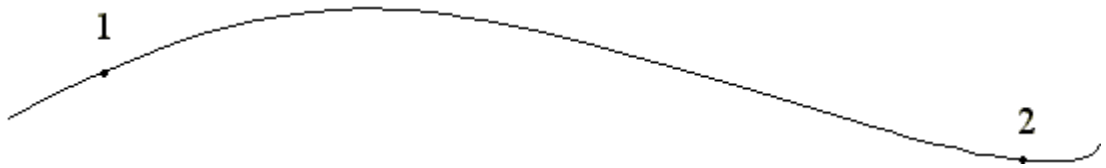
Модуль скорости - производная пути по времени.

$$|\vec{v}| = \left|\frac{d\vec{r}}{dt}\right| = \left|\lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}\right| = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} \overset{(3.7)}{=} \frac{ds}{dt} = \dot{s}.$$

По теореме Пифагора: $|\vec{v}| = v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$.

Вычисление пройденного пути

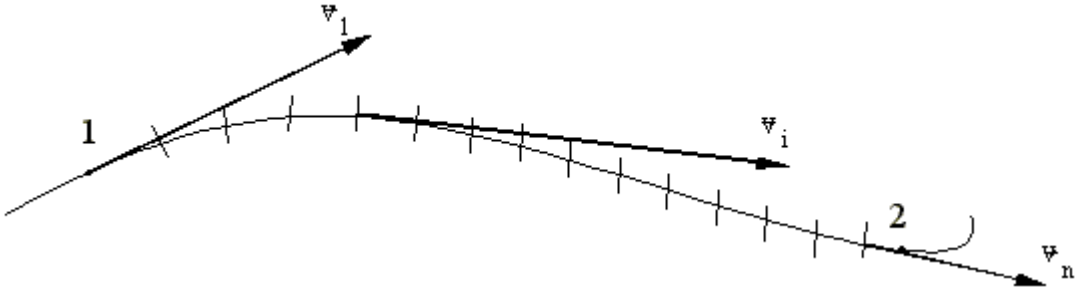
Для равномерного движения $s_{12} = v \cdot \Delta t$, Δs_{12} – весь путь, Δt – весь отрезок времени, $|\vec{v}|$ –const.



Для произвольного движения:

$$s_{12} = \Delta s_1 + \Delta s_2 + \ldots + \Delta s_i + \ldots + \Delta s_n \approx v_1 \Delta t_1 + v_2 \Delta t_2 + \ldots + v_i \Delta t_i + \ldots + v_n \Delta t_n$$

.



v_1 в течение отрезка Δt_i приблизительно постоянны, если Δt достаточно мало. В пределе:

$$s = \lim_{\Delta t \to 0} \sum_{i=1}^{n} v_i \Delta t_i = \int_{t_1}^{t_2} v(t)dt ,$$

т.е. ***путь - это определенный интеграл от модуля скорости по времени***.

Ускорение – это производная скорости по времени.

$$\boxed{\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}} \text{ или } \boxed{\vec{a} = \dot{\vec{v}}}$$

Учитывая, получим:

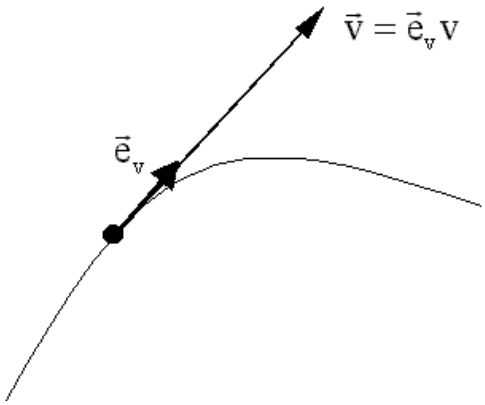
$$\vec{a} = \frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \right) = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \ddot{\vec{r}}$$

Ускорение – вторая производная радиус-вектора по времени. Производную по времени от какой-либо величины называют скоростью изменения этой величины.

Ускорение – это скорость изменения скорости.

Нормальное и тангенциальное ускорение

Направим единичный вектор $\vec{e}_v$ вдоль вектора скорости:



Тогда $\vec{a} = \dot{\vec{v}} = \dot{\vec{e}}_v v + \vec{e}_v \dot{v}$

(по правилу нахождения производной от произведения).

Первый член, ***нормальное ускорение***,

$$\boxed{\vec{a}_n = \dot{\vec{e}}_v v}$$

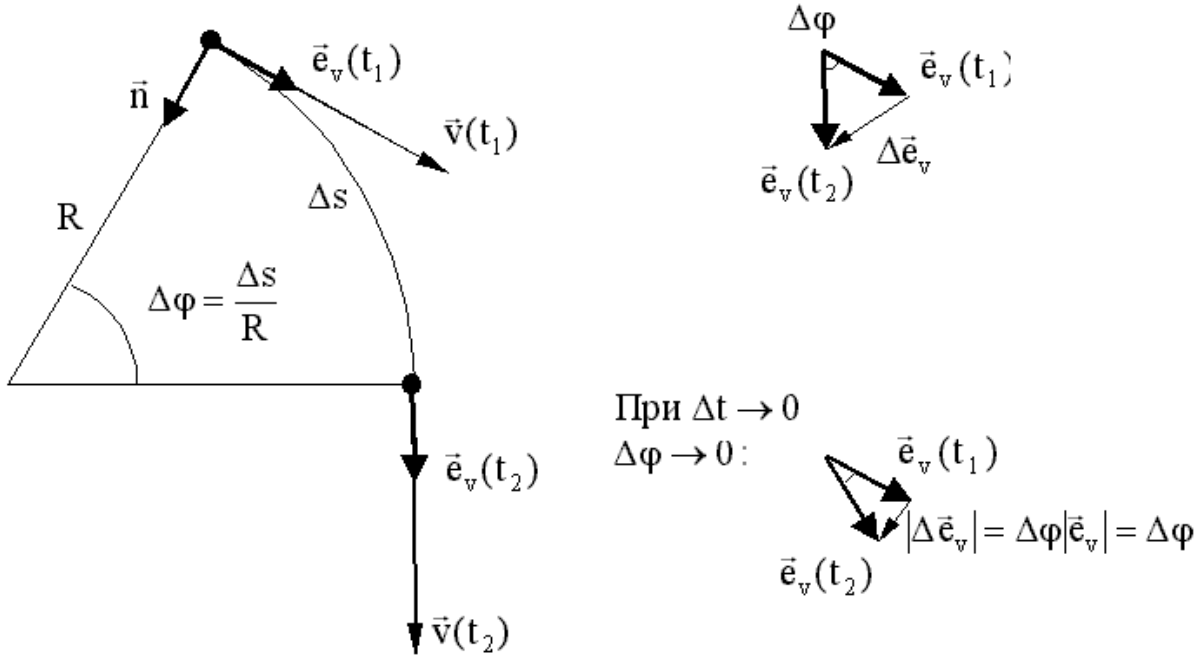
показывает быстроту изменения направления скорости.

Второй, ***тангенциальное ускорение***,

$$\vec{a}_\tau = \vec{e}_v \dot{v}$$

направлен вдоль скорости и ***показывает быстроту изменения ее модуля***.

Направление и величину нормального ускорения найдем для частного случая равномерного движения материальной точки по окружности:



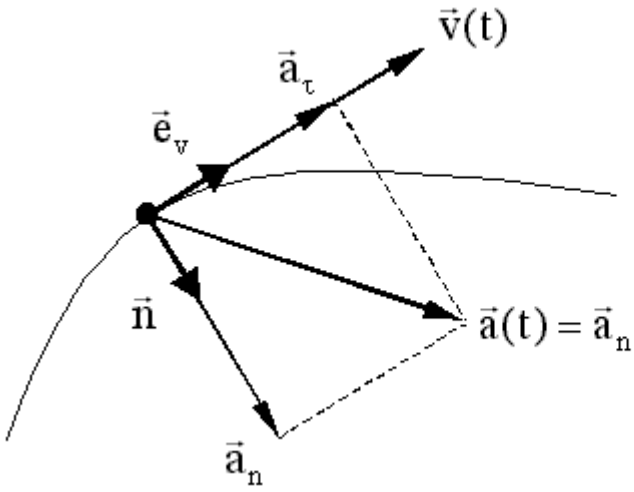
Направлен $\Delta\vec{e}_v$, при $\Delta t \to 0$, по вектору $\vec{i}\,\Delta\vec{e}_v = \vec{n}\cdot\Delta\varphi$

$$\vec{a}_n = \dot{\vec{e}}_v v = \left[\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{e}_v}{\Delta t}\right]\cdot v = \vec{n}\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}v = \vec{n}\cdot\left[\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t}\right]\cdot\frac{v}{R} \overset{(3.8.3)}{=} \vec{n}\frac{v^2}{R}$$

Нормальное ускорение направлено по нормали к скорости, его модуль:

$$a_n = \frac{v^2}{R}$$

Для движения по произвольной кривой R - радиус кривизны траектории - не будет величиной постоянной.



$$\vec{a}(t) = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau = \vec{n}\frac{v^2}{R} + \vec{e}_v \dot{v}$$

$$|\vec{a}| = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}.$$

Вопросы для закрепления:

1. В чем состоит главная задача механики?
2. Основные характеристики механического движения?
3. Как определить положение точки в пространстве?
4. Охарактеризовать прямолинейное движение
5. Что такое система отсчета?
6. Может ли координата быть отрицательной величиной?
7. Чем отличается векторная величина от скалярной?

2. Ускорение свободного падения. Движение тела под действием силы тяжести. Вращательное движение

Многие явления в природе объясняются действием сил всемирного тяготения. Движение планет в Солнечной системе, движение искусственных спутников Земли, траектории полета баллистических ракет, движение тел вблизи поверхности Земли – все эти явления находят объяснение на основе закона всемирного тяготения и законов динамики. Одним из проявлений силы всемирного тяготения является **сила тяжести**. Так принято называть силу притяжения тел к Земле вблизи ее поверхности. Если М – масса Земли, RЗ – ее радиус, m – масса данного тела, то сила тяжести равна:

$$F = G\frac{M}{R_3^2}m = mg,$$

где g – **ускорение свободного падения** у поверхности Земли: $g = G\frac{M}{R_3^2}$.

Сила тяжести направлена к центру Земли. В отсутствие других сил тело свободно падает на Землю с ускорением свободного падения. Среднее значение ускорения свободного падения для различных точек поверхности Земли равно 9,81 м/с2.

Вес тела – сила, с которой тело вследствие притяжения к Земле, действует на опору или подвес (сила, с которой тело давит на опору или растягивает подвес). Относится к силам *электромагнитной* природы. Измеряется динамометром. Единица измерения – ньютон (Н).

Точка приложения веса – точка опоры или подвеса.

Вес имеет направление, противоположное силе реакции опоры или силе натяжения нити. Способ определения модуля веса: по третьему закону Ньютона, P=N, или P=T, или P=Fупр

Вес тела, если тело и опора (подвес) неподвижны P=mg. Невесомость P=0

Не путайте вес и массу!

Если тело находится в жидкости, жидкость не является опорой или подвесом.

Рассмотрим простой случай: тело лежит на горизонтальной плоскости. На тело действует сила тяжести, она направлена вниз. F=mg. Вес тела равен по величине силе тяжести. Но вес действует на опору, а не на рассматриваемое тело. Возникает сила реакции опоры, направленная вверх. Сила реакции опоры действует на тело. Таким образом, силы, действующие на тело по вертикали, уравновешиваются, и тело не движется ни вверх, ни вниз. Рисунок сделайте самостоятельно

Если тело находится на наклонной плоскости, сила реакции направлена перпендикулярно плоскости. Оси координат выбираются соответственно вдоль направления возможного движения и перпендикулярно друг другу.

Сила тяжести – сила, с которой планета (например, Земля) притягивает к себе окружающие тела. Сила тяжести имеет *гравитационную* природу. Направление силы тяжести – вертикально вниз:



Вращательное движение

При вращательном движении все точки тела описывают окружности вокруг общей неподвижной оси.

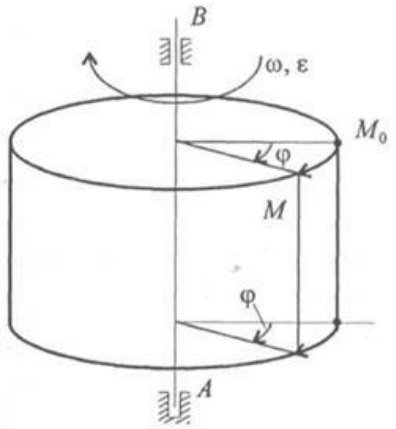
Неподвижная ось, вокруг которой вращаются все точки тела, называется осью вращения.

При этом каждая точка движется по окружности, радиус которой равен расстоянию точки до оси вращения. Точки на оси вращения не перемещаются.

Для описания вращательного движения тела вокруг неподвижной оси можно использовать только угловые параметры:

φ – угол поворота тела, [φ] = рад;

ω – угловая скорость, определяет изменение угла поворота в единицу времени, [ω] = рад/с.



Для определения положения тела в любой момент времени используется уравнение φ =f/(t).

Следовательно, для определения угловой скорости можно пользоваться выражением:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$$

Иногда для оценки быстроты вращения используют угловую частоту вращения n, которая оценивается в оборотах в минуту.

Угловая скорость и частота вращения физически близкие величины:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}.$$

Изменение угловой скорости во времени определяется угловым ускорением ε, [ε] = рад/с2;

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}.$$

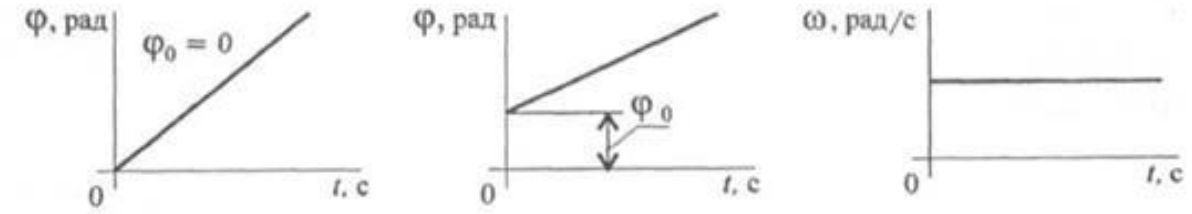
Частные случаи вращательного движения

Равномерное вращение (угловая скорость постоянна): ω = const.

Уравнение (закон) равномерного вращения в данном случае имеет вид: φ = φ0 + φt,

где φ0 — угол поворота до начала отсчета.

Кинематические графики для этого вида движения изображены на рисунке



Равнопеременное вращение (угловое ускорение постоянно): ε = const.

Уравнение (закон) равнопеременного вращения

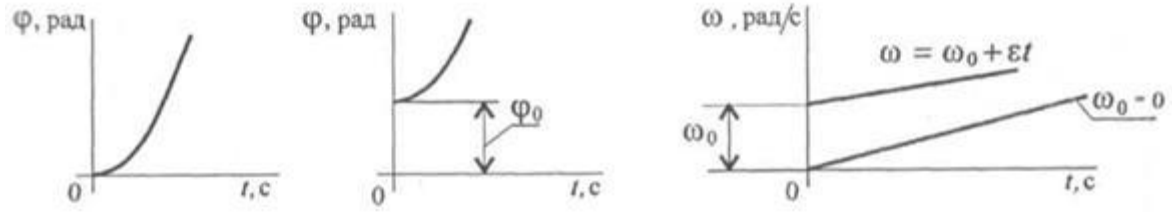
$$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2},$$

где ω0 — начальная угловая скорость.

Угловое ускорение при ускоренном движении – величина положительная; угловая скорость будет все время возрастать.

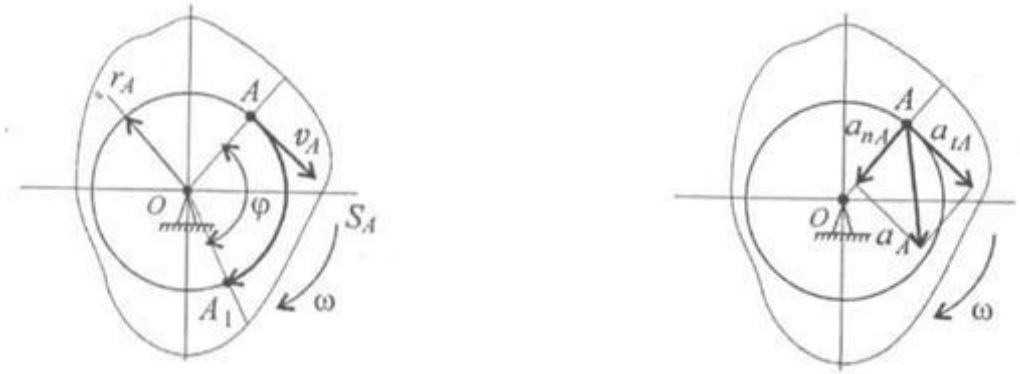
Угловое ускорение при замедленном движении – величина отрицательная; угловая скорость убывает.

Для данного движения кинематические графики представлены на рисунке



Скорости и ускорения точек вращающегося тела

Тело вращается вокруг точки О. Определим параметры движения точки Л, расположенной на расстоянии г а от оси вращения.



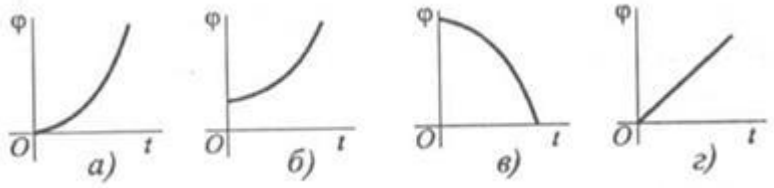
Путь точки А: SA = φrA.

Линейная скорость точки А: vA = ωrA.

Ускорение точки А: atA = εrA – касательное

Вопросы для закрепления:

1. Какими кинематическими параметрами характеризуется поступательное движение и почему?
2. Запишите уравнение равномерного поступательного движения твердого тела.
3. Запишите уравнение равнопеременного поступательного движения твердого тела.
4. Запишите уравнения равномерного и равнопеременного вращательного движений твердого тела.
5. Задано уравнение движения тела S = f(t). Как определяют скорость и ускорение?
6. Для заданного закона (уравнения) движения φ = 6,28 + 12t + 3t3 выберите соответствующий кинематический график движения



7. Для движения, закон которого задан в вопросе б, определите угловое ускорение в момент t = 5 с.

3. Законы Ньютона. Закон всемирного тяготения.

Первый закон Ньютона.

Закон инерции впервые был установлен Галилеем для случая горизонтального движения: когда тело движется по горизонтальной плоскости, то его движение является равномерным и продолжалось бы постоянно, если бы плоскость простиралась в пространстве без конца. Ньютон дал более общую формулировку закону инерции как первому закону движения: *всякое тело пребывает в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока действующие на него силы не изменят это состояние.*

Недостатком данной формулировки закона является то, что в ней не содержалось указания на необходимость отнесения движения к инерциальной системе координат. Дело в том, что Ньютон не пользовался понятием инерциальной системы координат, – вместо этого он вводил понятие абсолютного пространства – однородного и неподвижного, – с которым и связывал некую абсолютную систему координат, относительно которой и определялась скорость тела. Когда бессодержательность абсолютного пространства как абсолютной системы отсчета была выявлена, закон инерции стал формулироваться иначе: ***относительно инерциальной системы координат свободное тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.***

Второй закон Ньютона.

В формулировке второго закона Ньютон ввел понятия:

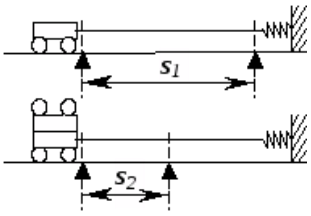
- Ускорение (α) – векторная величина (Ньютон называл его количеством движения и учитывал при формулировании правила параллелограмма скоростей), определяющая быстроту изменения скорости движения тела.
- Сила (F) – векторная величина, понимаемая как мера механического воздействия на тело со стороны других тел или полей, в результате воздействия которой тело приобретает ускорение или изменяет свою форму и размеры.
- Масса тела (m) – физическая величина – одна из основных характеристик материи, определяющая ее инерционные и гравитационные свойства.

Второй закон механики гласит: ***<u>сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на сообщаемое этой силой ускорение.</u>*** Такова его современная формулировка.

$$\vec{\alpha} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Ньютон сформулировал его иначе: *изменение количества движения пропорционально приложенной действующей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует, и обратно пропорционально массе тела или математически:*

На опыте этот закон легко подтвердить, если к концу пружины прикрепить тележку и отпустить пружину, то за время t тележка пройдет путь s_1, затем к той же самой пружине прикрепить две тележки, т.е. увеличить массу тела в два раза, и отпустить пружину, то за то же время t они пройдут путь s_2, в два раза меньший, чем s_1.



Этот закон также справедлив только в инерциальных системах отсчета. Первый закон с математической точки зрения представляет собой частный случай второго закона, потому что, если равнодействующие силы равны нулю, то и ускорение также равно нулю. Однако первый закон Ньютона рассматривается как самостоятельный закон, т.к. именно он утверждает о существовании инерциальных систем.

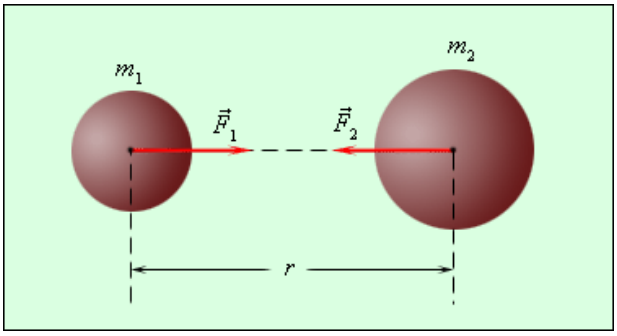
Третий закон Ньютона.

Третий закон Ньютона гласит: действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе тела действуют друг на друга с силами, направленными вдоль одной прямой, равными по модулю и противоположными по направлению или математически: $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$

Ньютон распространил действие этого закона на случай и столкновения тел, и на случай их взаимного притяжения. Простейшей демонстрацией этого закона может служить тело, расположенное на горизонтальной плоскости, на которое действуют сила тяжести F_m и сила реакции опоры F_o, лежащие на одной прямой, равные по значению и противоположно направленные,

Закон всемирного тяготения.

По второму закону Ньютона причиной изменения движения, то есть причиной ускорения тел, является сила. В механике рассматриваются силы различной физической природы. Многие механические явления и процессы определяются действием сил **тяготения**. **Закон всемирного тяготения** был открыт И. Ньютоном в 1682 году. По его гипотезе между всеми телами Вселенной действуют силы притяжения (гравитационные силы), направленные по линии, соединяющей **центры масс**. У тела в виде однородного шара центр масс совпадает с центром шара.



$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$$

Гравитационные силы притяжения между телами.

В последующие годы Ньютон пытался найти физическое объяснение з**аконам движения планет**, открытых астрономом И. Кеплером в начале XVII века, и дать количественное выражение для гравитационных сил. Зная, как движутся планеты, Ньютон хотел определить, какие силы на них действуют. Такой путь носит название **обратной задачи механики.** Если основной задачей механики является определение координат тела известной массы и его скорости в любой момент времени по известным силам, действующим на тело, и заданным

начальным условиям (**прямая задача механики)**, то при решении обратной задачи необходимо определить действующие на тело силы, если известно, как оно движется. Решение этой задачи и привело Ньютона к открытию закона всемирного тяготения. **Все тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:**

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

Коэффициент пропорциональности G одинаков для всех тел в природе. Его называют **гравитационной постоянной:** G = 6,67·10–11 Н·м2/кг2 (СИ).

Вопросы для закрепления:

1. Первый закон Ньютона, системы, для которых он справедлив.
2. Второй закон Ньютона.
3. Третий закон Ньютона.
4. Закон всемирного тяготения.
5. Что такое сила и центр тяжести?

4. Потенциальная энергия тела в гравитационном поле

Потенциальная энергия может быть введена только для поля консервативных сил

Так как их работа не зависит от траектории, а только от начального и конечного положений материальной точки, то эту работу можно записать в виде разности двух чисел: одно – W_{n1} – будет зависеть от начального положения тела, второе – W_{n2} – от конечного положения тела.

$$\boxed{A_{12} = W_{n1} - W_{n2}}.$$

W_{n1} – потенциальная энергия тела в положении 1; W_{n2} – в положении 2.

Некоторые конкретные выражения для потенциальной энергии $W_n(r)$. Для нахождения конкретного вида зависимости $W_n(r)$ необходимо вычислить работу

$$A_{12} = \int_1^2 \vec{F}(\vec{r})\, d\vec{s}.$$

В частности, для однородного поля тяжести, где $\vec{F} = m \cdot \vec{g}$, используя, получим: W_n = mgh.

Если $F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$ – гравитационная сила, то $W_n(r) = -G\frac{m_1 m_2}{r}$;

Если $F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$ – кулоновская сила, то $W_n(r) = k\frac{q_1 q_2}{r}$.

Если $F = -kx$ – сила упругости, то $W_n(x) = \frac{kx^2}{2}$.

Энергия взаимодействия тела с гравитационным полем Земли описывается формулой Еп = mgh только в том случае, если гравитационное поле Земли можно считать однородным, не зависящим от координат. Гравитационное поле определяется законом всемирного тяготения:

$$F_{\text{тяг}} = G\frac{m_1 m_2}{R^3}R\ ,$$

где R – радиус-вектор, проведенный от центра масс Земли (принятого за начало отсчета) до данной точки (напомним, что в законе тяготения тела считаются точечными и неподвижными). По аналогии с электростатикой можно записать эту формулу в виде: Fтяг = m1g,

$g = G\frac{m_2}{R^3}R$ и назвать вектором напряженности гравитационного поля в данной точке. Ясно, что это поле изменяется с расстоянием от создающего поле тела. Когда же можно считать гравитационное поле с достаточной точностью однородным? Очевидно, это возможно в области пространства, размеры которой h много меньше расстояния до центра поля R. Иными словами, если вы рассматриваете падение камня с верхнего этажа дома, можно спокойно пренебречь разницей в значении гравитационного поля на верхнем и нижнем этажах. Однако, изучая движение планет вокруг Солнца, нельзя считать, что планета движется в однородном поле, и следует пользоваться общим законом тяготения.

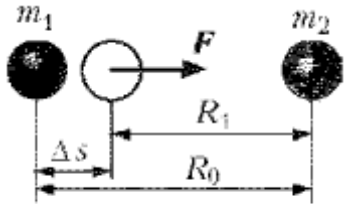


Рис. 4

Можно вывести общую формулу потенциальной энергии гравитационного взаимодействия тел (но не просить учеников воспроизводить этот вывод, хотя окончательную формулу они, конечно, должны знать). Например, рассмотрим два точечных неподвижных тела массами m1 и m2, расположенные на расстоянии R0 друг от друга (рис. 4). Обозначим энергию гравитационного взаимодействия этих тел через Еп0. Предположим далее, что тела немного сблизились до расстояния R1. Энергия взаимодействия этих тел стала Еп1. Согласно закону сохранения энергии:

ΔЕп = Еп1 – Еп0 = Fтяг. ср Δs,

где Fтяг. ср – величина средней силы тяготения на участке Δs = R1 - R0 перемещения тела в направлении силы. По закону всемирного тяготения величина силы есть:

$$F_{\text{тяг. ср}} = G\frac{m_1 m_2}{R_{\text{ср}}^2},$$

поэтому

$$E_{\text{п1}} - E_{\text{п0}} = G\frac{m_1 m_2}{R_{\text{ср}}^2}(R_1 - R_0)\ .$$

Если расстояния R1 и R0 мало отличаются друг от друга, то можно заменить расстояние Rср2 произведением R1R0. Тогда:

$$G\frac{m_1 m_2}{R_{\text{ср}}^2}(R_1 - R_0) = G\frac{m_1 m_2}{R_1 R_0}(R_1 - R_0) = G\frac{m_1 m_2}{R_0} - G\frac{m_1 m_2}{R_1},$$

откуда:

$$E_{\text{п1}} - E_{\text{п0}} = G\frac{m_1 m_2}{R_0} - G\frac{m_1 m_2}{R_1}.$$

В этом равенстве Еп1 соответствует , $-G\frac{m_1m_2}{R_1}$, а $-E_{n0}$ соответствует $+G\frac{m_1m_2}{R_0}$. Таким образом: $E_n = -G\frac{m_1m_2}{R}$.

Мы получили формулу, которая указывает на две особенности потенциальной энергии гравитационного взаимодействия (ее еще называют энергией тяготения):

1. В самой формуле уже заложен выбор нулевого уровня потенциальной энергии тяготения, а именно: энергия гравитационного взаимодействия тел обращается в нуль, когда расстояние между рассматриваемыми телами бесконечно велико. Обратите внимание, что такой выбор нулевого значения энергии гравитационного взаимодействия тел имеет наглядную физическую интерпретацию: при бесконечно большом удалении тел друг от друга они практически перестают гравитационно взаимодействовать.

2. Поскольку любое реальное расстояние, например, между Землей и ракетой, конечно, энергия гравитационного взаимодействия при таком выборе начала отсчета всегда отрицательна.

Вопросы для закрепления:

1. Чему равна потенциальная энергия упруго деформированного тела (пружины)?
2. Как связана потенциальная энергия с работой силы тяжести?
3. Как изменяется потенциальная энергия тела при его движении вверх?
4. Изменяется ли потенциальная энергия тела при движении параллельно поверхности Земли?
5. Что такое нулевой уровень потенциальной энергии?

5. Закон сохранения и превращения энергий. Закон сохранения импульса

Закон сохранения механической энергии

Для одной материальной точки, движущейся в поле консервативных сил,

из $A_{12}=W_{k2}-W_{k1}$,

из $A_{12}=W_{n1}-W_{n2}$.

Откуда $W_{n1}-W_{n2}=W_{k2}-W_{k1}$

или $W_{k1}+Wn1=W_{k2}+W_{n2}$.

В поле консервативных сил сумма кинетической и потенциальной энергии материальной точки остается постоянной, т.е. сохраняется.

$\boxed{W_k + W_n = W}$ – полная энергия материальной точки.

Полная энергия материальной точки в поле консервативных сил сохраняется.

Полная энергия системы материальных точек

Для системы, состоящей из N взаимодействующих между собой материальных точек, полная энергия

$$W = \sum_{i=1}^{N}\frac{m_i v_i^2}{2} + \frac{1}{2}\sum_{\substack{i,k=1\\ i\neq k}}^{N} W_{п\,i,k} = W_k + W_n$$

,

где $W_{п\ i,k}$ – потенциальная энергия взаимодействия i-й материальной точки с k-й материальной точкой.

$W_п$ – потенциальная энергия взаимодействия всех частиц системы между собой.

Закон сохранения энергии для системы материальных точек

Если система материальных точек находится во внешнем поле консервативных сил, то её полная механическая энергия

$$W = W_к + W_п + W'_п,$$

где $W'_п$ – потенциальная энергия системы во внешнем поле.

Полная механическая энергия системы материальных точек, находящейся только под действием консервативных сил, остается постоянной.

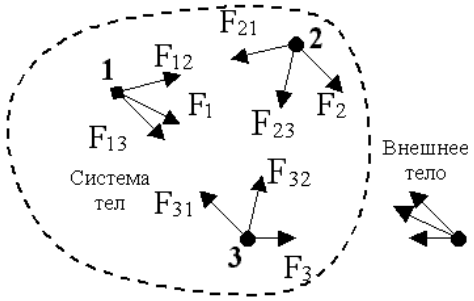
При наличии неконсервативных сил полная механическая энергия системы не сохраняется, ее убыль равна работе неконсервативных сил.

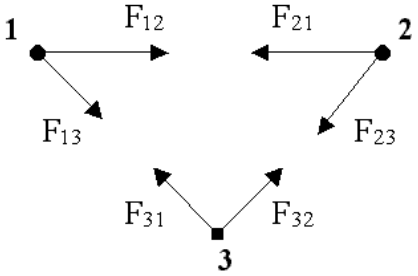
Механическая система – это совокупность тел, выделенных нами для рассмотрения Внутренние и внешние силы

Внутренние силы – силы, с которыми взаимодействуют тела системы между собой.

Внешние силы действуют со стороны тел, не входящих в систему.

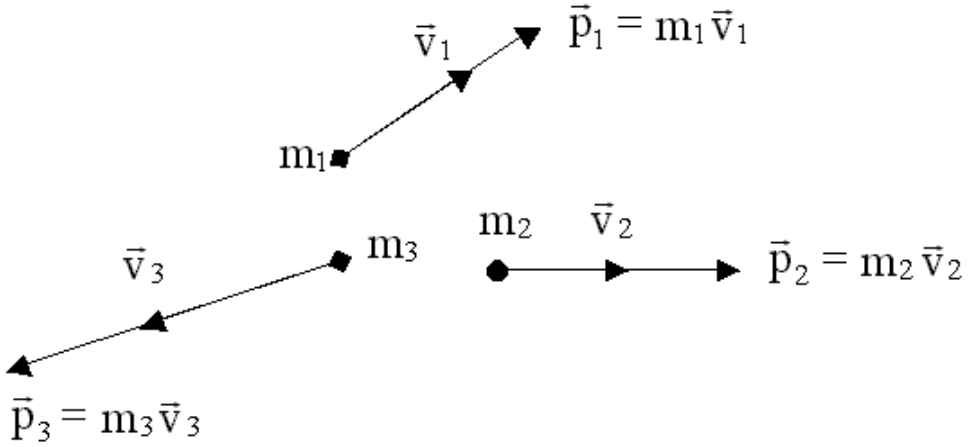
Замкнутая система – это система, на которую внешние силы не действуют.





Импульс системы материальных точек –это ***векторная сумма импульсов всех материальных точек, входящих в систему***

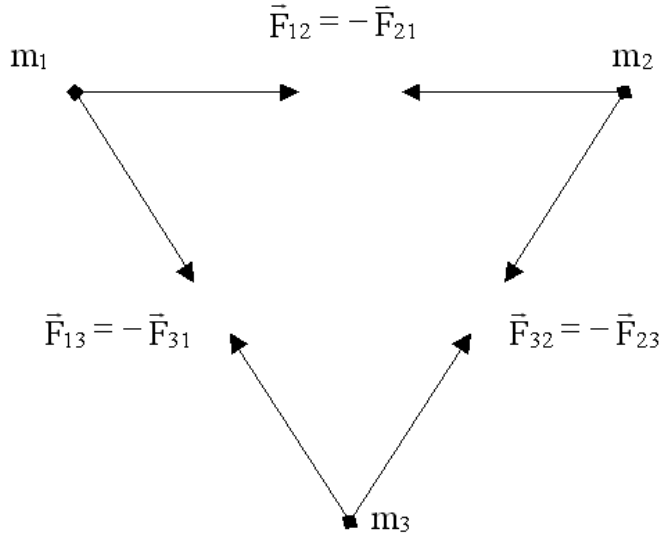
$$\vec{p} \equiv \sum_{i=1}^{N} \vec{p}_i = \sum_{i=1}^{N} m_i \vec{v}_i,$$



Закон сохранения импульса

Импульс замкнутой системы сохраняется, т.е. не изменяется со временем.

На рисунке изображена замкнутая система, состоящая из трех тел.



По II закону Ньютона, примененному к каждому телу рассматриваемой замкнутой системы, имеем:

$$\frac{d\vec{p}_1}{dt} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13},$$

$$\frac{d\vec{p}_2}{dt} = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{23},$$

$$\frac{d\vec{p}_3}{dt} = \vec{F}_{31} + \vec{F}_{32}.$$

Сложим эти уравнения. Справа, по III закону Ньютона, получим ноль. Слева - производную по времени от полного импульса системы.

$$\frac{d}{dt}\left(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3\right) = 0$$

Производная - ноль, значит, сама величина - константа.

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 = \text{const},$$

если нет внешних сил (система замкнута).

$$\vec{p} = \text{const} \Leftrightarrow \begin{array}{l} p_x = \text{const, если } F_x = 0, \\ p_y = \text{const, если } F_y = 0, \\ p_z = \text{const, если } F_z = 0. \end{array}$$

Если система не замкнута, но внешние силы не действуют на неё вдоль каких-либо осей, то соответствующие компоненты импульса сохраняются, например:

$$\vec{p} \neq \text{const} \qquad \begin{array}{l} p_x = \text{const, если } F_x = 0, \\ p_y \neq \text{const, если } F_y \neq 0, \\ p_z \neq \text{const, если } Fz \neq 0. \end{array}$$

Вопросы для закрепления:

1. Что такое импульс тела? Какая система называется замкнутой?
2. Закон сохранения импульса.
3. Понятие механической энергии. Кинетическая и потенциальная энергии.
4. Закон сохранения полной механической энергии.
5. Что такое момент силы относительно оси вращения, лежащей внутри тела вращения?

6. От чего зависит знак момента силы, лежащей в плоскости вращения?

6. Уравнение Бернулли. Вязкая жидкость. Обтекание тел. Подъемная сила крыла

Определение и формула уравнения Бернулли.

При рассмотрении движения жидкости очень часто считают, что перемещение одних частей жидкости относительно других не порождает сил трения. При этом жидкость, у которой вязкость (внутреннее трение) равна нулю, носит название идеальной.

Сжимаемой называют жидкость, плотность которой изменяется и может зависеть от температуры и давления.

Баротропной называют жидкость (или газ), плотность которой валяется функцией давления (не является функцией температуры).

Течение жидкости или газа называют стационарным, если скорость и давление жидкости остаются постоянными в каждой точке жидкости (газа).

Установившееся течение идеальной баротропной жидкости в потенциальном поле сил подчиняется **уравнению Бернулли**:

$$\varphi_F + \frac{v^2}{2} + \int \frac{dp}{\rho} = C\,(1)$$

где φ_F – потенциал поля массовых сил; C – величина постоянная для всех точек, которые принадлежат одной линии тока и переменная при переходе к другой линии тока; ρ – плотность идеальной жидкости; p – давление, v – скорость жидкости.

Частные случаи уравнения Бернулли.

При воздействии на жидкость только силы тяжести (нет других массовых сил), то потенциал поля можно представить:

$$\varphi_F = gz$$

где g – ускорение свободного падения, ось OZ имеет направление вверх (z – координата (или высота) по данной оси), тогда уравнение Бернулли можно записать как:

$$gz + \frac{v^2}{2} + \int \frac{dp}{\rho} = C\,(2)$$

В том случае, если идеальную жидкость можно считать несжимаемой, уравнение Бернулли применяют в виде:

$$\rho g z + \frac{\rho v^2}{2} + p = C_1\,(3)$$

$$z + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} = C_2\,(4)$$

где $\frac{\rho v^2}{2}$ – называют скоростным напором или динамическим давлением; p – статическое давление в той точке пространства, где расположен центр массы исследуемого элемента жидкости; $\frac{p}{\rho g}$ – носит название пьезометрической высоты; $\frac{v^2}{2g}$ – скоростная высота, z – высота на которой находится элемент жидкости, который рассматривается.

Расчеты, которые проводят для реальных жидкостей с применением уравнения Бернулли, дают неплохие результаты.

Следствие уравнения Бернулли.

1. Пусть все точки текущей жидкости имеют одинаковые величины скоростей. В таком случае для любых произвольных точек, относящихся к одной линии тока, выполняется равенство:

$$p_1 - p_2 = \rho g (z_2 - z_1) \, (5)$$

где p_1 и p_2 – давления в точках жидкости, находящихся на высоте z_1 и z_2, соответственно по вертикальной оси OZ.

Выражение (5) означает, что распределение давления является таким же, как в жидкости, находящейся в покое.

2. Для линии тока, если она горизонтальна уравнение Бернулли (3) примет вид:

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = C_1 \, (6)$$

что означает: давление оказывается меньше там, где скорость больше.

Вязкая жидкость, подчиняющаяся в своём течении закону вязкого трения Ньютона, то есть касательное напряжение и градиент скорости в такой **жидкости** линейно зависимы. Коэффициент пропорциональности между этими величинами известен как вязкость

При поступательном движении тела в вязкой среде, как было показано в предыдущем параграфе, подъемная сила возникает в том случае, если тело расположено асимметрично по отношению к обтекаемому его потоку жидкости или газа. Для крыла самолета найдена наилучшая по обтекаемости форма, так называемый профиль Жуковского, который используется при создании самолетов. Крыло самолета имеет асимметричный профиль. В передней части оно плавно закруглено, а задняя его кромка заострена. Кроме этого, крыло ориентируется по отношению к направлению обтекающего потока воздуха под некоторым небольшим углом α , называемым углом атаки. Обтекаемое крыло с профилем Жуковского так построено, что, рассекая воздух, образует у своего острого края пониженное давление. Следовательно, скорость обтекания крыла у задней кромки достигает максимума при большом градиенте скорости. В результате на этой кромке возникает мощный вихрь (для изображенного на рисунке случая – против часовой стрелки). Этот первый вихрь, образовавшийся в начале движения, называют «разгонным вихрем». Достаточно развившись, как и другие вихри, он срывается с кромки и уносится воздушным потоком. На его месте возникает следующий и т. д. На задней кромке при полете самолета устанавливается постоянное явление срыва струй, обтекающих крыло. Каждый такой вихрь имеет свой момент импульса. Поскольку внешних моментов сил, действующих на систему крыло – воздух, нет (изолированная система), то момент импульса этой системы должен оставаться постоянным (равным нулю). Это означает, что в воздухе около крыла должно возникнуть какое-то круговое движение воздуха, которое бы обладало одинаковым с вихрем моментом импульса, но противоположного направления. Жуковский показал, что вместе с вихрем в воздухе около крыла возникает круговое течение – циркуляция Г воздушных масс (в нашем случае – по часовой стрелке). Жуковский впервые предложил рассматривать обтекание крыла идеальной жидкостью или газом как одновременно существующие два течения идеальной жидкости: плавное обтекание крыла и циркуляционное течение вокруг крыла. Наличие циркуляции вокруг крыла приводит к увеличению относительной скорости потока воздуха над крылом, поскольку там скорость циркуляции по направлению совпадает со скоростью плавного обтекания крыла воздухом. Под крылом же скорость потока воздуха относительно крыла уменьшается, поскольку там скорости указанных двух движений противоположны друг другу. В результате давление воздуха на крыло снизу вверх возрастает, что и проявляется как подъемная сила

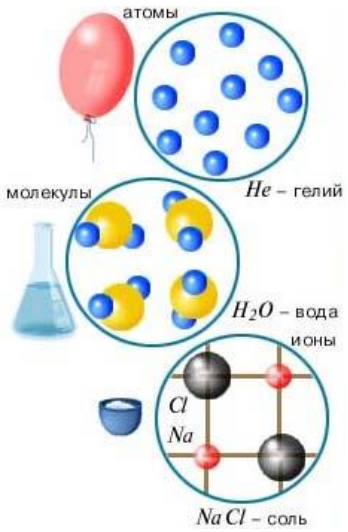
Вопросы для закрепления:

1. В чем состоит закон Бернулли?
2. Можно ли считать, что закон Бернулли – следствие закона сохранения энергии?

3. Почему в узких частях трубы скорость движения жидкости больше, чем в широких?
4. К какому виду механических сил относится сила, ускоряющая движение жидкости в узких местах трубы?
5. Почему на наконечниках пожарных шлангов отверстия узкие?
6. В чем различие между водоструйным насосом и пульверизатором?

Раздел 2. Основы молекулярно-кинетической теории и термодинамики

7. Основные положения МКТ и их опытное обоснование. Броуновское движение. Опыты Штерна

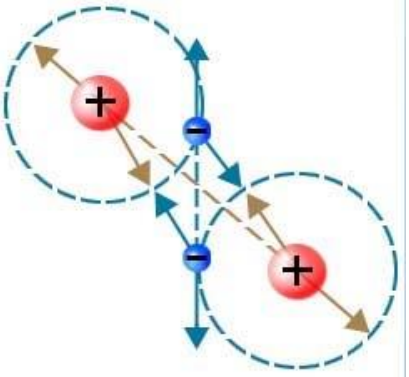


Молекулярно-кинетическая теория (МКТ) занимается изучением свойств веществ, основываясь при этом на представлениях о частицах вещества.

Левкипп и Демокрит – 400 лет до н.э.

М. В. Ломоносов – XVIII в. «О причине теплоты и холода», «О коловратном движении корпускул».

1. ***Все вещества состоят из мельчайших частиц (молекул и атомов). Молекулы разделены промежутками.***
2. ***Молекулы находятся в беспрерывном хаотическом движении.***
3. ***Между молекулами существуют силы взаимодействия (притяжение и отталкивание).***



Взаимодействие заряженных частиц в веществе.



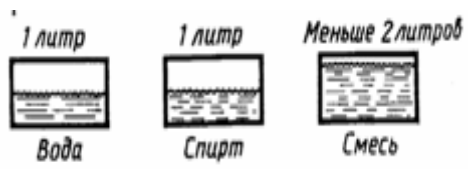
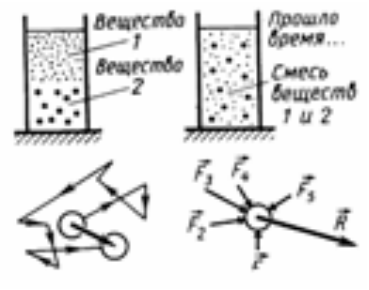
r_0 – среднее расстояние между частицами

АТОМ – наименьшая частица химического элемента, которая является носителем его химических свойств. А. состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов, движущихся в кулоновском поле ядра по законам квантовой механики. Размеры А. порядка $\mathbf{10^{-10}}$ **м**.

МОЛЕКУЛА – наименьшая устойчивая частица вещества, обладающая всеми химическими свойствами и состоящая из одинаковых (простое вещество) или разных (сложное вещество) атомов, объединенных химическими связями.

Опытные обоснования МКТ

Существование молекул	1. Делимость вещества 2. Наблюдение молекул с помощью ионного проектора, электронного микроскопа, туннельного микроскопа. 3. Явление ***диффузии***.	

Наличие промежутков	1. При смешивании различных жидкостей объем смеси меньше суммы объемов отдельных жидкостей. 2. Явление ***диффузии***. 3. Деформация.	
Хаотическое движение молекул	1. Броуновское движение. 2. Явление ***диффузии***. 3. Давление газа на стенки сосуда. 4. Стремление газа занять любой объем. 5. Опыты по измерению скоростей атомов и молекул методом молекулярных пучков: И. Штерн, 1920.	
Силы взаимодействия	1. Деформация тела. 2. Сохранение формы твердого тела. 3. Поверхностное натяжение жидкости. 4. Свойства прочности, упругости, твердости и т.п. 5. Опыт со свинцовыми цилиндрами.	

Диффузия – явление проникновения частиц одного вещества в промежутки между частицами другого. Скорость диффузии зависит от температуры и состояния вещества.

Броуновское движение **–** беспорядочное движение мелких частиц, взвешенных в жидкости или газе, происходящее под влиянием теплового движения молекул.

Р. Броун (1827) наблюдал. Создание теории – А. Эйнштейн и М. Смолуховский (1905).

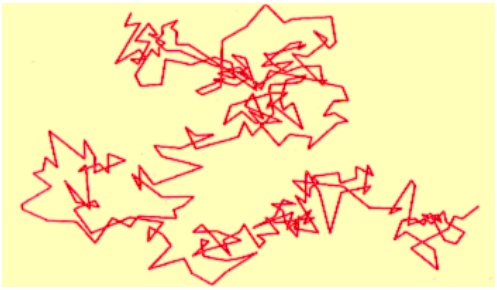
Ж. Б. Перрен (1908—1911) – опыты. Движение не прекращается

Роль в природе, технике

1. Питание растений из почвы.
2. В организмах человека и животных всасывание питательных веществ происходит через стенки органов пищеварения.
3. Работа органов обоняния.

Броуновское движение и диффузия.

Беспорядочное (хаотичное) движение атомов и молекул в веществе называют ***тепловым движением***, потому что скорость движения частиц увеличивается с ростом температуры. Экспериментальным подтверждением непрерывного движения атомов и молекул в веществе является ***броуновское движение и диффузия.*** При контакте двух тел вследствие этого движения наблюдается взаимное проникновение частиц одного тела в другое, называемое ***диффузией.*** Быстрее всего диффундируют газы, медленнее всего – твердые тела.



Броуновское движение **–** это хаотичное движение мелких частиц под действием молекул окружающей среды. Характер этого движения зависит от вида жидкости, размера и формы частиц и не зависит от вещества частицы. Чем больше температура, тем больше скорость броуновского движения. Причина этого движения –

нескомпенсированность импульсов, которые получает частица со стороны молекул окружающей среды.

Броуновское движение проявляется тем заметнее, чем меньше частицы и вязкость среды, и чем выше температура системы. Зависимость от температуры свидетельствует о том, что скорость хаотического движения молекул возрастает с увеличением температуры, именно поэтому его и называют тепловым движением

Диффузия – это явление самопроизвольного проникновения молекул одного вещества в другое. В результате взаимной диффузии веществ происходит постепенное выравнивание их концентрации во всех областях занимаемого ими объёма. Установлено, что скорость протекания процесса диффузии зависит от рода диффундирующих веществ и температуры.

Взаимодействие молекул.

Межмолекулярные силы имеют электромагнитную природу и сводятся к двум типам – притяжению и отталкиванию. Эти силы являются короткодействующими и проявляются лишь на расстояниях, сравнимых с размерами молекул. Силы притяжения и отталкивания быстро убывают с увеличением расстояния между молекулами, однако скорость их убывания различна. Сила отталкивания преобладает на малых расстояниях и неограниченно растёт по мере приближения расстояния между центрами масс молекул r к некоторой величине d, которую можно рассматривать как эффективный диаметр молекул.

Сила притяжения уменьшается с увеличением r намного медленнее силы отталкивания, поэтому существует некоторое значение межмолекулярного расстояния r = r0, на котором силы отталкивания и притяжения компенсируют друг друга, так что результирующая сила межмолекулярного взаимодействия обращается в нуль.

Дискретное строение вещества

Все вещества состоит из частиц (атомов и молекул). Молекулы (атомы) всех тел находятся в непрерывном хаотическом движении и взаимодействуют друг с другом с силами, имеющими электрическую природу. Гравитационное взаимодействие между частицами пренебрежимо мало. Количество молекул в окружающих нас телах очень велико, а размеры частиц очень малы. Вещество состоит из атомов и молекул, которые находятся в непрерывном хаотическом движении. Молекулы (атомы) взаимодействуют друг с другом с силами, имеющими электрическую природу. Гравитационное взаимодействие между частицами пренебрежимо мало.

Скорость теплового движения молекул

МКТ газов основана на том, что газы состоят из беспорядочно движущихся молекул. Понятие температуры связано со скоростью хаотического движения молекул

формулой $\frac{m_0\overline{v^2}}{2}=\frac{3kT}{2}$,

где $\overline{v^2}$ – среднее значение квадрата скорости. Следовательно $v_{кв.ср}=\sqrt{\overline{v^2}}=\sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$

Так как $N_A \cdot k = const = R$, то $v_{кв.ср.}=\sqrt{\frac{3RT}{M}}$

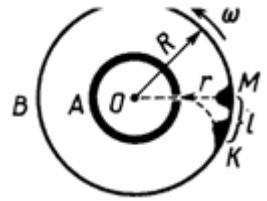
При $t^0=0$ **С** средние скорости для **азота – 500 м/с**, для **водорода – 1800 м/с**.

Экспериментальное определение скорости движения молекул

Сущность опыта О. Штерна (1920)

1. Если цилиндры неподвижны, то атомы попадают в точку М.
2. При вращении цилиндров со скоростью ω атомы попадают в точку К. Так как скорости атомов неодинаковы, то полоска размыта.

$$l = \omega R t,\ t = \frac{r}{v} \rightarrow l = \omega R \frac{r}{v} \rightarrow \boxed{v = \frac{\omega R r}{l}}.$$



Вопросы для закрепления:

1. Какие явления доказывают, что между молекулами существуют промежутки?
2. Какие явления доказывают, что между молекулами существуют силы отталкивания?
3. Как зависит скорость диффузии от агрегатного состояния вещества при постоянной температуре?
4. Какое явление, названное затем его именем, впервые наблюдал Роберт Броун?
5. В чем сущность опыта О. Штерна?

8. Масса и размеры молекул. Количество вещества. Молярная масса

РАЗМЕРЫ И МАССЫ МОЛЕКУЛ

Атомная единица массы (а.е.м.) – $1{,}6 \cdot 10^{-27}$кг – единица массы, равная 1/12 массы изотопа углерода с массовым числом 12.

$$1 \text{ а. е. м.} = \frac{1}{12} m_{0C} = 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

, где m_0 – масса молекулы (атома);

m_{0C} – масса атома углерода (изотоп ^{12}C)

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

– относительная атомная масса определяется по таблице Менделеева!

Относительная молекулярная масса сложного вещества определяется как сумма относительных атомных масс всех атомов, входящих в состав данного вещества.

$$1 \text{ а. е. м.} = \frac{1}{12} m_{0C} = 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

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

Пример:

Для H_2: $\mathbf{M_r = 1+1 = 2}$

Для O_2: $\mathbf{M_r = 16+16 = 32}$

Для H_2O: $\mathbf{M_r = 1+1+16 = 18}$

Для воздуха M_r=29

ν – количество вещества; [ν]=моль;

1 моль углерода имеет массу 0,012 кг

$N_A=6{,}02\cdot10^{24}$ моль$^{-1}$ – число (постоянная) Авогадро – количество структурных элементов (атомов, молекул) в 1 моле вещества (в 12 г углерода ^{12}C).

$$\nu=\frac{N}{N_A}=\frac{m}{M}$$, где **M** – молярная масса (масса 1 моля);

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

$$M=m_0\cdot N_A=\frac{1}{12}\cdot 0{,}012\frac{кг}{моль}\cdot M_r=M_r\cdot 10^{-3}\frac{кг}{моль}$$

$$n=\frac{N}{V}$$ – концентрация – количество частиц в единице объема вещества. [n]=м$^{-3}$

$$\rho=\frac{m}{V}=m_0 n$$ – плотность – масса единицы объема вещества. **[ρ]= кг/м^3**.

$N_A=6{,}02\cdot10^{24}$ моль$^{-1}$

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

$$M=m_0\cdot N_A=M_r\cdot 10^{-3}\frac{кг}{моль}$$

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

$$\rho=\frac{m}{V}$$

$$1\frac{г}{см^3}=1000\frac{кг}{м^3}$$

Оценим размеры молекулы, считая, что молекулы шарики. $V_{шара}=\frac{4}{3}\pi R^3$, следовательно, используя понятия плотности и молярной массы получим: $$R=\sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}}=\sqrt[3]{\frac{3M}{4\pi N_A\rho}}$$

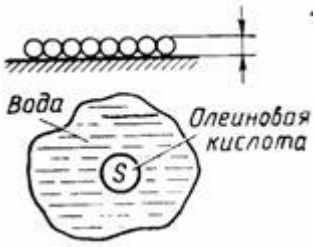
Например, для воды **$R=10^{-10}$м**.

Другой способ оценки размеров молекул. Известно, что некоторые несмешивающиеся с водой жидкости (масло, нефть, олеиновая кислота и др.), растекаясь по поверхности воды, могут образовывать очень тонкие пленки (толщиной до одного молекулярного ряда). Можно провести опыт, в котором, зная объем жидкости и измерив площадь, которую она заняла на поверхности воды, можно оценить размер молекулы. Например:

$$V=Sd_0,$$

$$d_0=\frac{V}{S}=\frac{V\cdot 4}{\pi D^2}=\frac{4\cdot10^{-11}\ м^3}{3{,}14\cdot4\cdot10^{-2}\ м^2}=3\cdot10^{-10}\ м,$$

$$d_0=3\cdot10^{-10}\ м.$$



Олеиновая кислота – одноосновная насыщенная карбоновая кислота

$$CH_3(CH_2)_7CH=CH(CH_2)_7COOH$$

Количество молекул в окружающих нас телах очень велико, а размеры частиц малы. Количество вещества ν определяется как отношение числа частиц вещества к *постоянной Авогадро* N_A:

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

где $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$. Количество вещества измеряется в молях. Моль – это количество вещества, содержащее столько же частиц (молекул), сколько содержится атомов в 0,012 кг углерода ^{12}C, а постоянная Авогадро – это количество частиц в одном моле вещества.

Масса одного моля вещества называется *молярной массой*. Она равна произведению массы одной молекулы вещества m_0 на число Авогадро: $M = m_0 \cdot N_A$.

Для молярной массы справедливо соотношение:

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

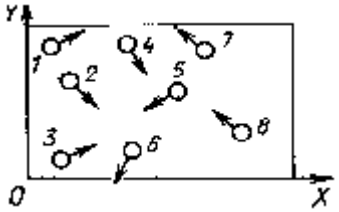
Вопросы для закрепления:

1. Чему равна относительная молекулярная масса воды?
2. Сколько молекул в двух молях воды?
3. Чему равно количество вещества в литре воды?
4. Какие измерения нужно произвести, чтобы оценить размеры молекулы?
5. Перечислите известные Вам доказательства существования молекул не упомянутые в тексте?

9. Идеальный газ. Основное уравнение МКТ идеального газа. Термодинамические параметры. Температура и способы ее измерения

Модель идеального газа.

1. Межмолекулярные силы притяжения отсутствуют (можно пренебречь потенциальной энергией).
2. Взаимодействия молекул газа происходят только при их соударениях и являются упругими
3. Молекулы газа не имеют объема – рассматриваются как материальные точки.



Хаотичность молекулярного движения

Задача: связать макроскопические параметры (то, что можно измерить) и микроскопические параметры (характеристики молекул), например давление и скорость движения молекул.

Следствие опыта: давление газа объясняется ударами молекул о дно и стенки сосуда.

1. Давление тем больше, чем больше количество ударов. Количество ударов определяется концентрацией молекул. Значит, *давление зависит от концентрации.*
2. Давление тем больше, чем больше энергия соударения. Д*авление зависит от массы молекул и квадрата скорости движения молекул.*
3. Т.к. все молекулы движутся с различными скоростями, то некоторые молекулы не успеют долететь до стенки.
4. Т.к. молекул много, то скорости молекул можно усреднить.

Причина – удары

Вывод основного уравнения МКТ.

$$p = \frac{F}{S} \qquad \left.\begin{matrix} F = f \cdot N \\ N = n \cdot V \end{matrix}\right\} \Rightarrow F = f \cdot n \cdot V \qquad \vec{f} \cdot \Delta t = m_0 \vec{v} - m_0 \vec{v}_0$$

В проекциях:

$$f_x \cdot \Delta t = m_0 v_x - m_0 v_{0x} \qquad m_0 v_x - m_0 v_{0x} = 2 m_0 v_x$$

Предварительный итог:

$$p = \frac{2 m_0 v_x n V}{S \cdot \Delta t}$$

f – сила удара одной молекулы

m_0 – масса одной молекулы

Все направления равноправны:

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$$

В среднем $\frac{1}{2}$ молекул имеет составляющую скорости, направленную ***к*** выбранной стенке:

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

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

Это уравнение, выведенное впервые немецким физиком Р. Клаузиусом, называется ***<u>основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа.</u>***

Оно устанавливает связь между микроскопическими параметрами и макроскопическими (измеряемыми) величинами.

Учитывая, что $\overline{E}_к = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$ – средняя кинетическая энергия молекулы газа, получим:

$$p = \frac{2}{3} n \overline{E}_к$$

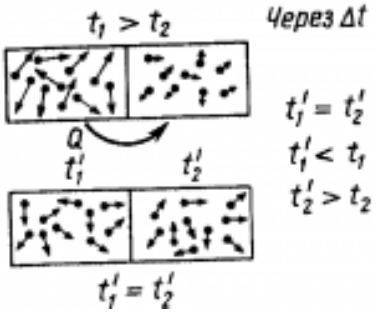
Давление идеального газа прямо пропорционально средней кинетической энергии поступательного движения молекул, содержащихся в единице объема газа.

Т.к. $m_0 n = \frac{m}{N} \cdot \frac{N}{V} = \frac{m}{V} = \rho$, то уравнение можно переписать в виде: $p = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2}$

Температура

Важнейшим внутренним параметром газа является температура, чувствительность к которой заложена в живых системах, однако она субъективна («степень нагретости тела»).

<u>Основные свойства температуры</u>



Тепловое (термодинамическое) равновесие – состояние тела или системы тел, при котором его термодинамические параметры (p, V, m и др.) остаются неизменными сколь угодно долго. Температура – характеристика внутреннего состояния макроскопической системы – состояния теплового равновесия. Температура – термодинамический параметр, одинаковый во всех частях термодинамической системы, находящейся в тепловом равновесии. Температуры тел, находящихся в тепловом контакте, выравниваются.

<u>Измерение температуры.</u>

1.Тело необходимо привести в тепловой контакт с термометром.

2.Термометр должен иметь массу значительно меньше массы тела.

3.Показание термометра следует отсчитывать после наступления теплового равновесия.

Термометры.

1.Жидкостный термометр (ртуть: температура от -38 до 260^0C; глицерин: от -50 до 100^0C) – тепловое расширение.

2.Термопара (температура от -269 до 2300^0 C).

3.Термисторы (зависимость сопротивления от температуры).

4.Манометрические (зависимость давления от температуры).

5.Газовые термометры – тепловое расширение.

6.Акустические, магнитные и др.

Температурные шкалы:

1. Шкала Цельсия. 0^0C – таяние льда, 100^0C – кипение воды (изначально – наоборот).
2. Шкала Реомюра. 0^0C -0^0R, 100^0C - 80^0R → 1^0R=1,25^0C.
3. Шкала Фаренгейта. 0^0C=32^0F, 100^0C=212^0F → t^0C=5/9(t^0F-32).

Недостаток этих шкал – произвольность выбора реперных точек (точек отсчета), их зависимость от внешних условий.

Физический смысл температуры

Опыт: давление газа зависит от температуры – $p = f(T)$ и $\bar{E}_к = f(T)$.

Из основного уравнения МКТ идеального газа: $p = \frac{2}{3} n \bar{E}_к$. Следовательно $\bar{E}_к = \frac{3p}{2n} = \frac{3pV}{2N}$.

Если мы установим, как меняется это выражение при переходе от одного состояния теплового равновесия к другому, то можно будет ввести понятие температуры и изучить ее свойства. Физическая величина, одинаковая у любых тел при тепловом равновесии. Опыт показывает, что для любых веществ $\frac{pV}{N} \sim T$.

Заменяя знак пропорциональности на знак равенства, получим: $\frac{pV}{N} = kT$,

где k – коэффициент пропорциональности, называемый постоянная Больцмана, а T – абсолютная термодинамическая температура.

Абсолютная температура.

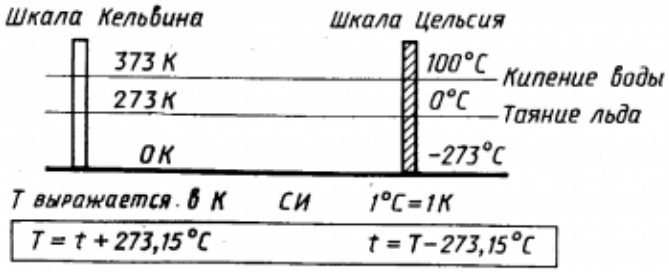
$\frac{pV}{N} = kT \geq 0$ – абсолютная температура неотрицательна!

Т.к. объем газа равен нулю быть не может, то температура равна нулю, если давление равно нулю, а значит, равна нулю скорость поступательного теплового движения (сохраняются т.н. нулевые колебания).

$$\frac{pV}{N} = kT \geq 0 \qquad T \geq 0$$

Единица температуры – Кельвин (К). Кельвин равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды. Шкала строится так, что $\Delta t^0C = \Delta T\,K$.

Температура абсолютного нуля не зависит от внешних условий и одинакова для всех веществ.



Связь температуры и средней кинетической энергии поступательного движения молекул.

Сравнивая два выражения $\bar{E}_к = \frac{3p}{2n} = \frac{3pV}{2N}$ и $\frac{pV}{N} = kT$, получим: $\bar{E}_к = \frac{3}{2}kT$.

Т.о. ***средняя кинетическая энергия прямо пропорциональна абсолютной температуре.***

$$\boxed{\bar{E}_к = \frac{3}{2}kT}$$

Температура – мера средней кинетической энергии молекул.

Постоянная Больцмана $\boxed{k = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К}}$

Температуру можно измерять в энергетических единицах – Джоулях.

При Т=0 средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул равна нулю. При комнатной температуре (300К) энергия примерно $6 \cdot 10^{-21}$Дж – очень маленькая (барабанные перепонки – шум в ушах; движение частиц мозга – передача сигналов).

Т.к. $\bar{E}_к = \frac{3p}{2n}$ и $\bar{E}_к = \frac{3}{2}kT$, то $p = nkT$ – связь давления и температуры (еще одна форма основного уравнения МКТ идеального газа).

Вопросы для закрепления:

1. Что представляет собой модель идеального газа?
2. Что называют температурой?
3. Перечислить основные свойства температуры?
4. Какая связь существует между температурой и средней кинетической энергией поступательного движения молекул?
5. Основное уравнения МКТ?

10. Уравнения состояния идеального газа. Закон Дальтона и Авогадро. Изопроцессы. Газовые законы

Уравнением состояния называется уравнение, связывающее параметры физической системы и однозначно определяющее ее состояние.

В 1834 г. французский физик Б. Клапейрон, работавший длительное время в Петербурге, вывел уравнение состояния идеального газа для постоянной массы газа. В 1874 г. Д. И. Менделеев вывел уравнение для произвольного числа молекул газа.

p – Давление
V – Объем, который занимает вещество
m – Масса вещества
ν – Число молей газа (Количество вещества)
V_m – Молярный объем вещества
M – Молярная масса

$R = 8,31$ – Универсальная газовая постоянная

T – Абсолютная температура

Вывод уравнения Менделеева-Клапейрона.

В МКТ и термодинамике идеального газа макроскопическими параметрами являются: p, V, T, m.

Мы знаем, что $\mathbf{p = nkT = \frac{NkT}{V}}$. Следовательно, $\mathbf{pV = NkT}$. Учитывая, что $\mathbf{N = \frac{m}{M} N_A = \nu N_A}$, получим: $\mathbf{pV = \nu N_A kT}$.

Произведение постоянных величин есть величина постоянная, следовательно: $\mathbf{N_A k = R = 8,31 \frac{Дж}{К \cdot моль}}$ – универсальная газовая постоянная (универсальная, т.к. для всех газов одинаковая).

$$\boxed{\mathbf{R = 8,31 \frac{Дж}{К \cdot моль}}}$$

Таким образом, имеем:

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

$\mathbf{pV = \nu RT}$ – уравнение состояния (уравнение Менделеева-Клапейрона).

Другие формы записи уравнения состояния идеального газа.

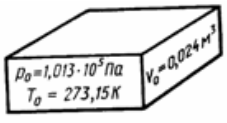
1.Уравнение для 1 моля вещества.

Если n=1 моль, то, обозначив объем одного моля $V_м$, получим: $\mathbf{pV_м = RT}$.

Для нормальных условий получим: $\mathbf{V_м = \frac{RT}{p} = \frac{8,31 \frac{Дж}{К \cdot моль} \cdot 273К}{1,013 \cdot 10^5 Па} = 0,0224 м^3 = 22,4 л}$

2. Запись уравнения через плотность: $\mathbf{p = \frac{\rho}{M} RT}$ – плотность зависит от температуры и давления!

$$\mathbf{p = \frac{\rho}{M} RT}$$



3. Уравнение Клапейрона.

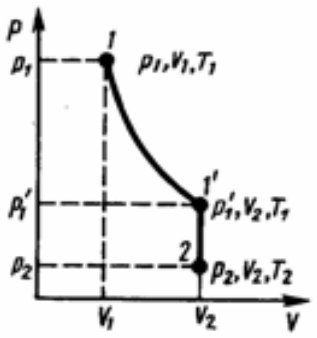
Часто необходимо исследовать ситуацию, когда меняется состояние газа при его неизменном количестве (m=const) и в отсутствие химических реакций (M=const). Это означает, что количество

вещества n=const. Тогда: $\mathbf{\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} R = const}$

Эта запись означает, что *для данной массы данного газа* справедливо равенство: $\mathbf{\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_3 V_3}{T_3} = _ = const}$

Для постоянной массы идеального газа отношение произведения давления на объем к абсолютной температуре в данном состоянии есть величина постоянная:

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



Газовые законы.

Изопроцесс – изменения состояния термодиодинамической системы при неизменном значении одного из параметров (p V, T)

Давление *p*, объем *V* и температура *T* идеального газа связаны между собой ***уравнением Менделеева–Клапейрона***:

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

$$pV = \nu RT$$

Здесь ν – количество вещества, *R* = 8,31 Дж/(моль·К) –***универсальная газовая постоянная***.

Закон Бойля Мариотта – *При постоянной температуре и массе идеального газа произведение его давления и объёма постоянно.* $T = const \Rightarrow P_1V_1 = P_2V_2 = const$

pV = const

Изотермический процесс

Это означает, что с ростом давления на газ его объем уменьшается, и наоборот. Для неизменного количества газа закон Бойля-Мариотта можно также интерпретировать следующим образом: при неизменной температуре произведение давления на объем является величиной постоянной.

Закон Бойля-Мариотта выполняется строго для идеального газа и является следствием уравнения Менделеева-Клапейрона.

Для реальных газов закон Бойля-Мариотта выполняется приближенно. Практически все газы ведут себя как идеальные при не слишком высоких давлениях и не слишком низких температурах.

Закон Гей Люссака – *при постоянном давлении объём постоянной массы газа пропорционален абсолютной температуре*

$$P = const \Rightarrow \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = const$$

Изобарный процесс

Объем V данной массы газа при постоянном давлении газа прямо пропорционален изменению $V_T = V_0(1 + \alpha_V \Delta T)$ температуры

Закон Гей-Люссака справедлив только для идеальных газов, реальные газы подчиняются ему при температурах и давлениях, далеких от критических значений. Является частным случаем уравнения Клайперона.

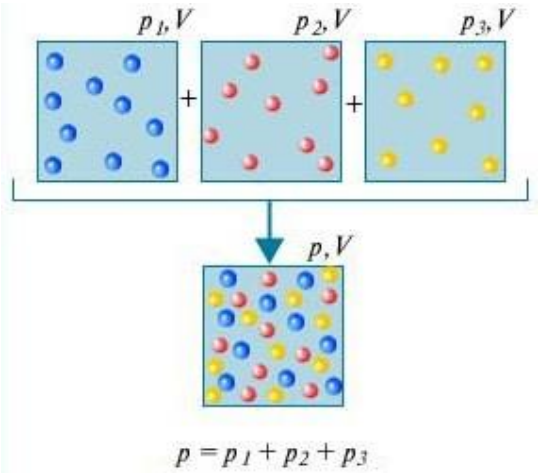
Закон Шарля – **давление данной массы идеального газа при постоянном объеме прямо пропорционально абсолютной температуре**

$$V = const \Rightarrow \frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = const$$

Изохорный процесс

Закон Авогадро.

В равных объемах различных газов при одинаковых внешних условиях находится одинаковое число молекул (атомов).



Закон Дальтона.

Закон Дальтона – *давление смеси газов, не взаимодействующих друг с другом химически, равно сумме парциальных давлений этих газов.*

$$p = \sum_{i=1}^{n} p_i = p_1 + p_2 + p_3 + \ldots + p_n$$

Закон Дальтона утверждает, что общее давление всех газов вместе взятых равно сумме парциальных давлений каждого газа в отдельнсти.

Закон Паскаля.

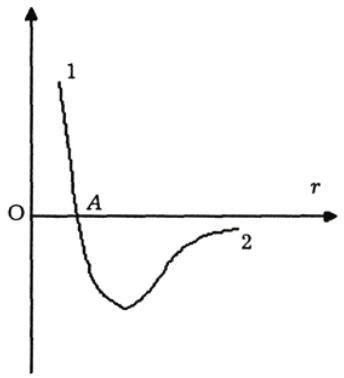
Давление, производимое на жидкость или газ, передается во все стороны без изменения.

Вопросы для закрепления:

1. Что называют уравнением состояния?
2. Вывод уравнения Менделеева-Клапейрона?
3. Универсальная газовая постоянная ?
4. Дать определение изопроцесса?
5. Перечислить газовые законы? Для какого изопроцесса:
   а) Закон Бойля-Мариотта?
   б) Закон Гей-Люссака?
   в) Закон Шарля?

11. Реальные газы. Применение газов в технике

В разреженном газе расстояния между молекулами в десятки раз превосходят размеры молекул, поэтому размерами молекул и силами межмолекулярного взаимодействия оказывается возможным пренебречь. Характер изменения сил взаимодействия **F** молекул от расстояния **r** между их центрами



1 – силы отталкивания,
2 – силы притяжения.

Силы межмолекулярного взаимодействия имеют электромагнитную природу и являются короткодействующими (на расстояниях порядка 10^{-10}).

Газ, для описания свойств которого необходимо учитывать собственный объем молекул и силы взаимного притяжения молекул, в отличие от идеального, принято называть реальным газом.

Объем, доступный для свободного движения молекул, меньше объема **V**, занимаемого газом, на некоторую величину **b**, равную объему самих молекул.

В связи с этим в уравнении состояния идеального газа для 1 моля **PV=RT** вместо объема V надо написать объем V-b, т.е. P(V-b) = RT. Это означает, что давление реального газа P = RT/(V-b), занимающего объем V при температуре T, несколько больше давления идеального газа при тех же условиях.

Для N молекул уменьшение свободного объема равно:

$$b = N4v_0 = \frac{4}{3}N4\pi r^3.$$

В результате давления, обусловленного силами молекулярного притяжения, которые действуют дополнительно к силам внешнего давления, давление газа на стенку будет на некоторую величину ΔP больше, это добавочное внутреннее давление: $\Delta P = a/V^2$, где a – постоянная величина для данного газа.

Уравнение состояния реального газа для 1 моля было получено с учетом рассмотренных выше поправок голландским физиком Ван-дер-Ваальсом и носит его имя:

$$\left(P + a/V^2\right)\left(V - b\right) = RT.$$

Для любой массы **m** газа уравнение Ван-дер-Ваальса запишется в виде:

$$\left(P + \nu^2 a/V^2\right)\left(V - \nu b\right) = \nu RT,$$

где $\nu = m/M$ – число молей.

Величины a и b в уравнениях для каждого газа могут быть измерены экспериментально, если измерить параметры газа $P_1,\ V_1,\ T_1$ в одном состоянии и параметры $P_2,\ V_2,\ T_2$ того же газа в другом состоянии, подставить их в уравнение и решить относительно a и b.

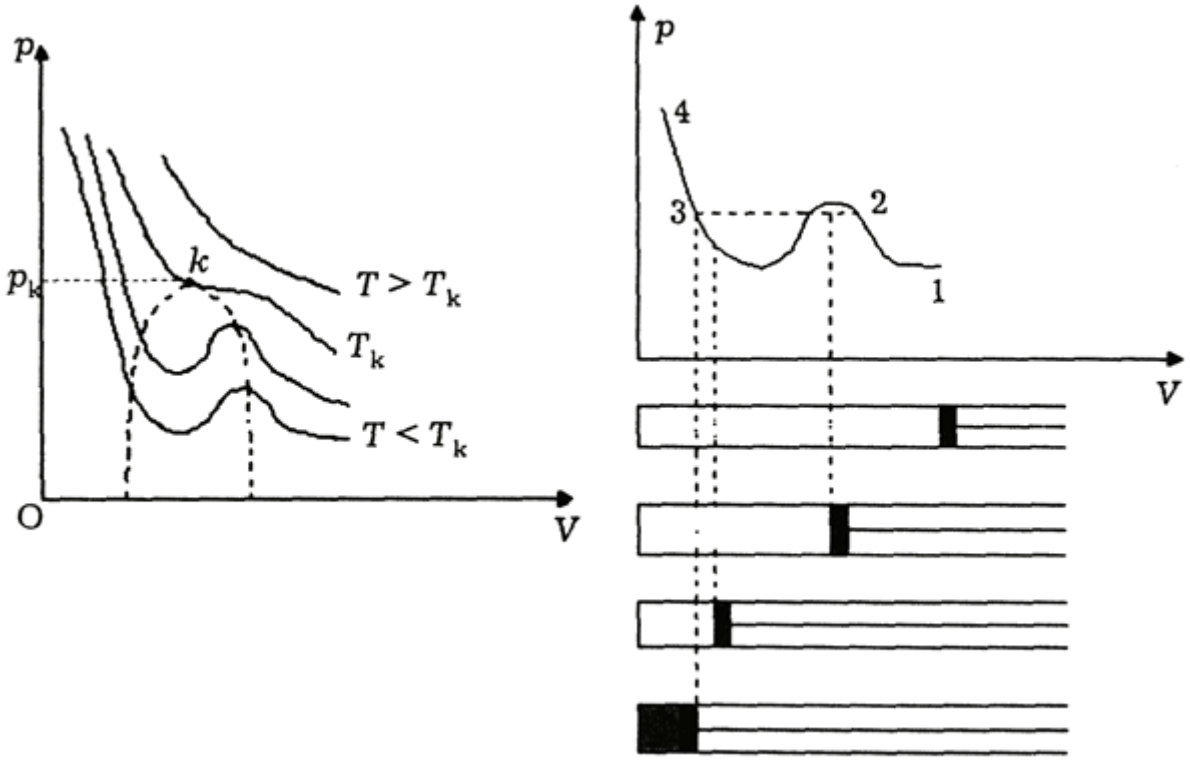
Уравнение Ван-дер-Ваальса – уравнение третьей степени (относительно объема). Это значит, что оно имеет три корня – каждому значению давления P соответствует три значения объема (температуру считаем постоянной).

Исследование уравнения показало, что при температурах выше некоторой температуры $T_к$($T_к$ – критическая температура) два из трех корней являются мнимыми. Кривые, соответствующие уравнению для разных значений температур T – изотермы Ван-дер-Ваальса.

Рассмотрим газ в цилиндре с подвижным поршнем. В начале изотермического сжатия состояние газа будет изменяться в соответствии с участком 1-2 изотермы. По достижении газом объема, соответствующего состоянию 2, газ становится насыщенным паром и начинает конденсироваться. Вследствие этого состояние системы будет меняться не так, как следует по уравнению для газов. Состояние системы будет изменяться в соответствии с изобарой 2-3.

По мере уменьшения объема системы пар конденсируется.

На участке 2-3 система представляет собой смесь двух фаз (жидкость-пар). При достижении состояния 3, когда весь пар конденсируется, состояние системы при сжатии вновь будет изменяться в соответствии с изотермой Ван-дер-Ваальса – изотерма сжатия круто идет вверх, что обозначает относительно малую сжимаемость жидкостей.

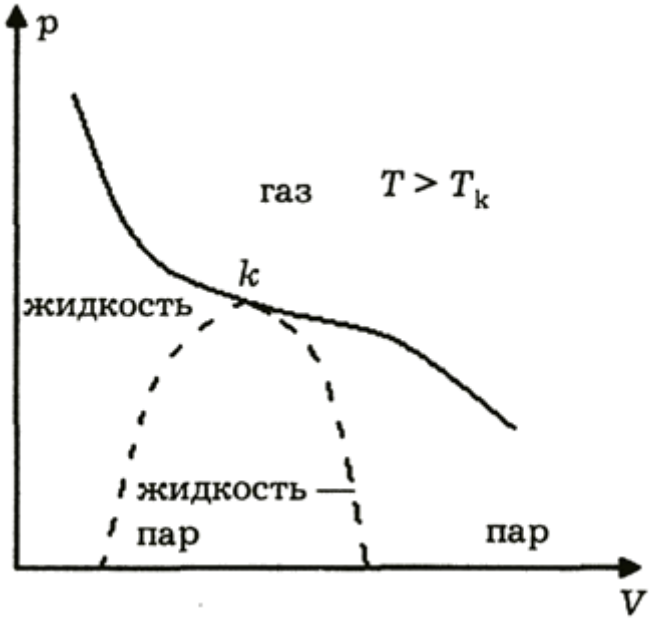


Таким образом, при малых объемах системы изотерма Ван-дер-Ваальса описывает свойства жидкого состояния (участок 3-4), а при больших объемах (участок 1-2) - свойства газообразного состояния. Волнообразный участок изотермы на опыте не воспроизводится: в промежутке между состояниями 2 и 3 газ сжижается – вещество находится одновременно в двух фазах. Следовательно, уравнение Ван-дер-Ваальса не применимо к двухфазной системе (жидкость-пар). Оно применимо к однородной системе – отдельно к газам и отдельно к жидкостям.

Термодинамическая система может находиться в определенном фазовом состоянии или одновременно в различных фазовых состояниях. Под фазой понимают совокупность всех частей системы, обладающих одинаковыми физическими и химическими свойствами. Фазовые превращения – это изменения агрегатного состояния вещества.

Если соединить между собой точки начала и концов горизонтальных метастабильных состояний на всех изотермах, то мы получим некоторую колоколообразную кривую. Эта кривая представляет собой границу, отделяющую состояния, в которых вещество существует в двух находящихся в равновесии фазах, от однофазных состояний. Состояние вещества в точке К называется критическим состоянием. В критическом состоянии исчезает различие между жидкостью и газом, нет никакой границы раздела между ними. При этом теряют смысл такие понятия, как поверхностное натяжение, теплота парообразования.

Фазовая диаграмма состояний реального газа



Область $T > T_k$ – газообразное состояние вещества, в этой области невозможно двухфазное состояние вещества и ни при каких давлениях газообразное состояние не может быть переведено в жидкое.

Газообразные состояния при температурах ниже критических называются паром. Пар отличается от остальных газообразных состояний тем, что при изотермическом сжатии претерпевает процесс сжижения.

Применение газов в технике

Газы обладают рядом свойств, которые делают их незаменимыми в очень большом числе технических устройств. Все особенности поведения газов, позволяющие использовать их на практике, можно установить с помощью уравнения состояния.

Газ – сжатое упругое тело

Это давление исчезает лишь при $m \to 0$ (газа почти нет) или $V \to \infty$(газ неограниченно расширился), а также при $T \to 0$ (молекулы газа не движутся).

Сила давления газа на стенки $F=pS$, представляет собой частный вид силы упругости. Газ подобен пружине, которая всегда сжата. Важно, что газ малой массы способен создавать сравнительно большое давление.

Управление давлением газа

Давление газа можно менять, изменяя его объем или температуру. Кроме того, силу давления газа легко регулировать и не меняя его объема или температуры. Газ – это сжатая «пружина», «жесткость» которой можно быстро изменить, используя прямо пропорциональную зависимость давления газа от его массы. Увеличивая массу газа в любом замкнутом пространстве, мы можем увеличить давление. Так и поступают, например, накачивая автомобильную шину или футбольный мяч воздухом. Выпуская часть газа из сосуда, уменьшают его давление.

Большая сжимаемость газов

Газы, особенно при давлениях, близких к атмосферному, по сравнению с жидкостями и твердыми телами легко сжимаются. Это означает, что небольшое изменение давления заметно меняет их объем. И наоборот, значительное изменение объема не приводит к большому изменению давления.

Благодаря большой сжимаемости газа сила его давления мало меняется при расширении или сжатии. Поэтому газ, толкая поршень, совершает значительную работу на большом отрезке пути.

Хорошая сжимаемость газов позволяет запасать их в больших количествах в баллонах, удобных для хранения. Сжатый природный газ транспортируется по трубам на расстояния в тысячи километров.

Зависимость объема газа от температуры

Объем газов значительно увеличивается при увеличении температуры. При нагревании на 1° С объем газа при постоянном давлении увеличивается в сотни раз больше, чем объем жидких и твердых тел.

Все перечисленные свойства газов используются в технике.

Газ – амортизатор

Свойство газа не сохранять свою форму, малая его плотность и возможность регулировки давления делают газ одним из самых совершенных амортизаторов.

Вот как работает автомобильная или велосипедная шина. Когда колесо наезжает на бугорок, шина с находящимся в ней воздухом деформируется и толчок, получаемый осью колеса, значительно смягчается. Если бы шина была жесткой, то ось подпрыгнула бы вверх на высоту бугорка или еще больше.

Газ – рабочее тело двигателей

Большая сжимаемость газов и ярко выраженная зависимость их давления и объема от температуры делают газ «удобным» рабочим телом в двигателях, работающих на сжатом газе, и в тепловых двигателях.

В двигателях, работающих на сжатом газе, в частности на сжатом воздухе, газ (воздух) при расширении вследствие хорошей сжимаемости совершает работу почти при постоянном давлении. Сжатый воздух, оказывая давление на поршень, открывает двери в автобусах, поездах метро и электричках. Сжатым воздухом приводят в движение поршни воздушных тормозов железнодорожных вагонов и грузовиков. Пневматический молоток и другие пневматические инструменты приводятся в движение сжатым воздухом.

Даже на космических кораблях имеются небольшие реактивные двигатели, работающие на сжатом газе – гелии. Они ориентируют корабль нужным образом.

В двигателях внутреннего сгорания на автомобилях, тракторах, самолетах и в реактивных двигателях в качестве рабочего тела, приводящего поршень, турбину или ракету в движение, используют газы высокой температуры.

При сгорании горючей смеси в цилиндре (например, паров бензина и воздуха) температура резко увеличивается, давление на поршень растет и газ, расширяясь, совершает работу на всей длине рабочего хода поршня

Практически только газ можно эффективно использовать в качестве рабочего тела в двигателях. Нагревание жидкого или твердого тела до такой же температуры, как и газа, вызвало бы лишь незначительное перемещение поршня.

Любое огнестрельное оружие в сущности является тепловой машиной. Рабочее тело здесь тоже газ – продукты сгорания взрывчатых веществ. Сила давления газа выталкивает пулю из канала ствола или снаряд из дула орудия. И существенно, что эта сила совершает работу на всей длине канала. Поэтому скорости пули и снаряда оказываются огромными: сотни метров в секунду.

Вопросы для закрепления:

1. Дайте определение реального газа
2. Назовите примеры применения газов в технике
3. Что понимают под разреженным газом?
4. Почему сжатые газы называют сжатой пружиной?
5. Применимо ли уравнение Ван-дер-Ваальса к двухфазной системе (жидкость-пар)?
6. Газ – как рабочее тело
7. В чем состоят основные отличия модели идеального газа от модели реального газа?

12. Внутренняя энергия идеального газа и способы ее изменения. I закон термодинамики. Работа газов

Внутренняя энергия реальных газов помимо кинетической энергии движения молекул должна содержать потенциальную энергию взаимодействия молекул.

На малых расстояниях между молекулами проявляются положительные силы отталкивания и эти силам соответствует положительная потенциальная энергия. Отрицательным силам притяжения соответствует отрицательная потенциальная энергия.

При рассмотрении внутренней энергии идеального газа мы установили, что она включает в себя кинетическую энергию поступательного и вращательного движений молекул и для 1 моля равна:

$$U_1 = \frac{i}{2} RT = C_v T,$$

где C_v – изохорная молярная теплоемкость, Т – температура.

Межмолекулярное взаимодействие в реальных газах приводит к дополнительному давлению $P = \frac{a}{V^2}$, а оно связано с работой $dA = PdV = \frac{a}{V^2} dV.$

Изменение потенциальной энергии произошло за счет совершения работы $dU_2 = dA$, следовательно

$$dU_2 = \frac{a}{V^2} dV.$$

В результате решения этого уравнения получим потенциальную энергию

$U_2 = -a/V.$

Внутренняя энергия U для 1 моля реального газа равна сумме кинетической энергии U_1 и потенциальной энергии молекул U_2, т.е. $U = U_1 + U_2$:

$U = C_v T - a/V.$

Следовательно, внутренняя энергия реального газа зависит как от температуры Т, так и от его объема V.

Первый закон термодинамики.

Закон сохранения и превращения энергии, распространенный на тепловые явления, носит название ***первого закона термодинамики.***

В термодинамике рассматриваются тела, положение центра тяжести которых практически не меняется. Механическая энергия таких тел остается постоянной, изменяться может лишь внутренняя энергия каждого тела.

В *общем случае* при переходе системы из одного состояния в другое внутренняя энергия изменяется одновременно как за счет совершения работы, так и за счет передачи теплоты.

Первый закон термодинамики формулируется именно для таких общих случаев: ***Изменение внутренней энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе***

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

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

Закон сохранения энергии управляет всеми явлениями природы и связывает их воедино. Этот закон был открыт в середине XIX в. немецким ученым, врачом по образованию Р. Майером (1814-1878), английским ученым Дж. Джоулем (1818-1889) и получил наиболее точную формулировку в трудах немецкого ученого Г. Гельмгольца (1821-1894).

$$\Delta U = A + Q. \qquad (13.10)$$

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 $\Delta U = U_2 - U_1 = 0$ или $U_1=U_2$. *Внутренняя энергия изолированной системы остается неизменной (сохраняется).*

Часто вместо работы A внешних тел над системой рассматривают работу A системы над внешними телами. Учитывая, что $A' = -A$, первый закон термодинамики (13.10) можно записать так:

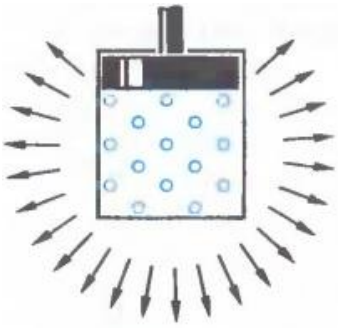
$$Q = \Delta U + A'. \qquad (13.11)$$

Количество теплоты, переданное системе, идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами.

Невозможность создания вечного двигателя.

Из первого закона термодинамики вытекает невозможность создания вечного двигателя – устройства, способного совершать неограниченное количество работы без затрат топлива или каких-либо других материалов. Если к системе не поступает тепло (Q=0), то работа A'согласно уравнению (13.11) может быть совершена только за счет 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.



Передаваемое тепло

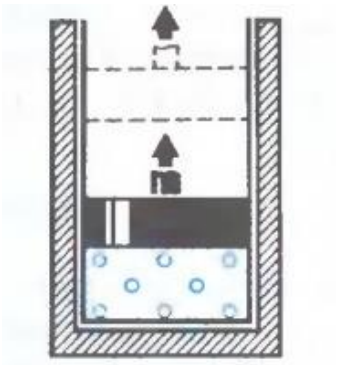
Рис. 13.6

В данном состоянии система всегда обладает определенной внутренней энергией.

Но нельзя говорить, что в системе содержится определенное 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 одинаково как за счет совершения системой работы, так и за счет передачи окружающим телам какого-либо количества теплоты. Например, нагретый газ в цилиндре может уменьшить свою энергию остывая, без совершения работы (*рис.13.6*). Но он может потерять точно такое же количество энергии, перемещая поршень, без отдачи теплоты окружающим телам. Для этого стенки цилиндра и поршень должны быть теплонепроницаемыми (*рис.13.7*).

В дальнейшем на протяжении всего курса физики мы будем знакомиться с другими формами энергии, способами их превращения и передачи.



Теплоизолирующая оболочка

Рис. 13.7

Внутренняя энергия системы тел изменяется при совершении работы и при передаче количества теплоты. В каждом состоянии система обладает определенной внутренней энергией. Работа и количество теплоты не содержатся в теле, а характеризуют процесс изменения его внутренней энергии.

Вопросы для закрепления:

1. Как формулируется первый закон термодинамики?

2. В каком случае изменение внутренней энергии отрицательно?
3. Почему можно говорить, что система обладает внутренней энергией, но нельзя сказать, что она обладает запасом определенного количества теплоты или работы?
4. Чему равна внутренняя энергия идеального одноатомного газа?
5. Почему газы при сжатии нагреваются?
6. Положительную или отрицательную работу совершают внешние силы при изотермическом процессе?

13. Количество теплоты. Теплоемкость. Уравнение теплового баланса. Применение I закона термодинамики к изопроцессам. Адиабатный процесс.

Энергия, которую получает или теряет тело, или система тел в процессе теплообмена с окружающей средой называется **количеством теплоты** или просто **теплотой**. Обозначается Q. В международной системе (СИ) единицей количества теплоты, также как работы и энергии, является Джоуль: Дж[Q]=Дж.

На практике еще иногда применяется внесистемная единица количества теплоты – калория: 1кал=4,19 Дж.

Если Q>0, то теплота подводится к системе. Если Q<0, то теплота отводится от системы. Если Q=0, то теплота не подводится, не отводится, т. е. система является теплоизолированной.

Количество теплоты является функцией процесса, а не функцией состояния, то есть количество теплоты, полученное системой, зависит от способа, которым она была приведена в текущее состояние. Поэтому формула для количества теплоты Q зависит от протекающего процесса.

Если в результате теплообмена телу передается некоторое количество теплоты, то внутренняя энергия тела и его температура изменяются. Количество теплоты Q, необходимое для нагревания 1 кг вещества на 1 К называют ***удельной теплоемкостью вещества*** c: $c=Q/(m\Delta T)$.

Во многих случаях удобно использовать ***молярную теплоемкость*** C: $C=M\cdot c$,

где M – молярная масса вещества.

Определенная таким образом теплоемкость **не является** однозначной характеристикой вещества. Согласно первому закону термодинамики изменение внутренней энергии тела зависит не только от полученного количества теплоты, но и от работы, совершенной телом. В зависимости от условий, при которых осуществлялся процесс теплопередачи, тело могло совершать различную работу. Поэтому одинаковое количество теплоты, переданное телу, могло вызвать различные изменения его внутренней энергии и, следовательно, температуры.

Такая неоднозначность определения теплоемкости характерна только для газообразного вещества. При нагревании жидких и твердых тел их объем практически не изменяется, и работа расширения оказывается равной нулю. Поэтому все количество теплоты, полученное телом, идет на изменение его внутренней энергии. В отличие от жидкостей и твердых тел, газ в процессе теплопередачи может сильно изменять свой объем и совершать работу. Поэтому теплоемкость газообразного вещества зависит от характера термодинамического процесса. Обычно рассматриваются два значения теплоемкости газов: C_V – ***молярная теплоемкость в изохорном процессе*** (V=const) и C_p – ***молярная теплоемкость в изобарном процессе*** (p=const).

В процессе при постоянном объеме газ работы не совершает: $A=0$. Из первого закона термодинамики для 1 моля газа следует $Q_V=C_V\Delta T=\Delta U$

Изменение ΔU внутренней энергии газа прямо пропорционально изменению ΔT его температуры.

Для процесса при постоянном давлении первый закон термодинамики дает:

$$Q_p=\Delta U+p(V_2-V_1)=C_V\Delta T+p\Delta V,$$

где ΔV – изменение объема 1 моля идеального газа при изменении его температуры на ΔT.

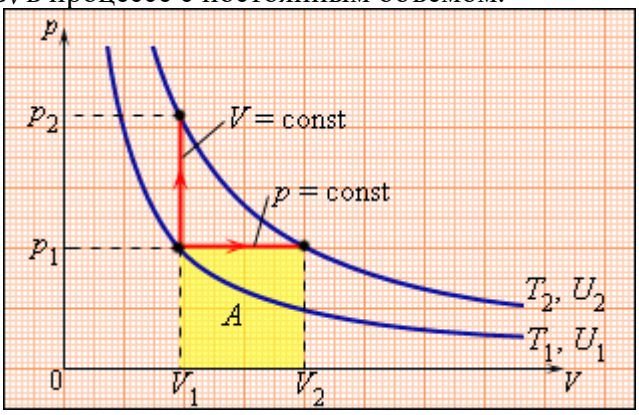
Отсюда следует: $C_p=\dfrac{Q_p}{\Delta T}=C_V+p\dfrac{\Delta V}{\Delta T}.$

Отношение $\Delta V/\Delta T$ может быть найдено из уравнения состояния идеального газа, записанного для 1 моля: $pV=RT$, где R – универсальная газовая постоянная.

При p=const $\quad p\Delta V=R\Delta T \qquad \dfrac{\Delta V}{\Delta T}=\dfrac{R}{p}.$

Таким образом, соотношение, выражающее связь между молярными теплоемкостями C_p и C_V, имеет вид (***формула Майера***): $C_p=C_V+R$.

Молярная теплоемкость C_p газа в процессе с постоянным давлением всегда больше молярной теплоемкости C_V в процессе с постоянным объемом.



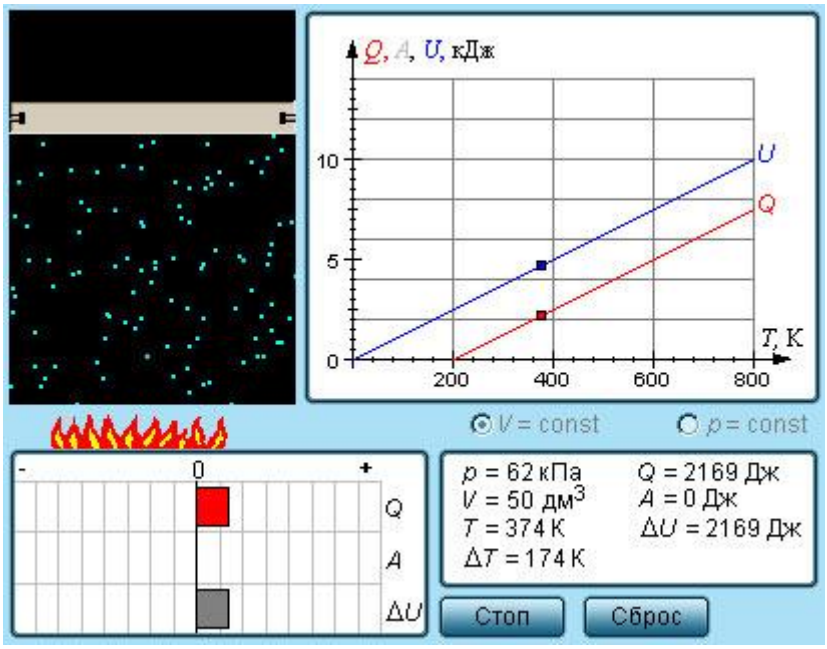
Два возможных процесса нагревания газа на $\Delta T=T_2-T_1$. При p=const газ совершает работу $A=p_1(V_2-V_1)$. Поэтому $C_p>C_V$

Отношение теплоемкостей в процессах с постоянным давлением и постоянным объемом играет важную роль в термодинамике. Оно обозначается греческой буквой γ.

$$\gamma=C_p/C_V.$$

В частности, это отношение входит в формулу для адиабатического процесса.

Между двумя изотермами с температурами T_1 и T_2 на диаграмме (p,V) возможны различные пути перехода. Поскольку для всех таких переходов изменение температуры $\Delta T=T_2-T_1$ одинаково, следовательно, одинаково изменение ΔU внутренней энергии. Однако, совершенные при этом работы A и полученные в результате теплообмена количества теплоты Q окажутся различными для разных путей перехода. Отсюда следует, что у газа имеется бесчисленное количество теплоемкостей. C_p и C_V – это лишь частные (и очень важные для теории газов) значения теплоемкостей.



Модель. Теплоемкости идеального газа

Термодинамические процессы, в которых теплоемкость газа остается неизменной, называются ***политропическими***. Все изопроцессы являются политропическими. В случае изотермического процесса $\Delta T=0$, поэтому $C_T=\infty$. В адиабатическом процессе $\Delta Q=0$, следовательно, $C_{ад}=0$.

Следует отметить, что «теплоемкость», как и «количество теплоты» – крайне неудачные термины. Они достались современной науке в наследство от теории ***теплорода***, господствовавшей в XVIII веке. Эта теория рассматривала теплоту как особое невесомое вещество, содержащееся в телах. Считалось, что оно не может быть ни создано, ни уничтожено. Нагревание тел объяснялось увеличением, а охлаждение – уменьшением содержащегося внутри них теплорода. Теория теплорода несостоятельна. Она не может объяснить, почему одно и то же изменение внутренней энергии тела можно получить, передавая ему разное количество теплоты в зависимости от работы, которую совершает тело. Поэтому лишено физического смысла утверждение, что «в данном теле содержится такой-то запас теплоты».

В молекулярно-кинетической теории устанавливается следующее соотношение между средней кинетической энергией $\vec{E}$ **поступательного движения** молекул и абсолютной температурой T:

$$\vec{E}=\frac{3}{2}kT.$$

Внутренняя энергия 1 моля идеального газа равна произведению $\vec{E}$ на число Авогадро N_A:

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

При изменении температуры на ΔT внутренняя энергия изменяется на величину

$$\Delta U=\frac{3}{2}R\Delta T=C_V\Delta T.$$

Коэффициент пропорциональности между ΔU и ΔT равен теплоемкости C_V при постоянном давлении:

$$C_V=\frac{3}{2}R=12{,}47\ \text{Дж/моль·К}.$$

Это соотношение хорошо подтверждается в экспериментах с газами, состоящими из одноатомных молекул (гелий, неон, аргон). Однако, для двухатомных (водород, азот) и многоатомных (углекислый газ) газов это соотношение не согласуется с экспериментальными данными. Причина такого расхождения состоит в том, что для двух- и многоатомных молекул средняя кинетическая энергия должна включать энергию не только поступательного, но и вращательного движения молекул.

Молекула может совершать пять независимых движений: три поступательных движения вдоль осей *X, Y, Z* и два вращения относительно осей *X* и *Y*. Опыт показывает, что вращение относительно оси *Z*, на которой лежат центры обоих атомов, может быть возбуждено только при очень высоких температурах. При обычных температурах вращение около оси *Z* не происходит, так же как не вращается одноатомная молекула. Каждое независимое движение называется **степенью свободы**. Таким образом, одноатомная молекула имеет 3 поступательные степени свободы, «жесткая» двухатомная молекула имеет 5 степеней (3 поступательные и 2 вращательные), а многоатомная молекула – 6 степеней свободы (3 поступательные и 3 вращательные).

В классической статистической физике доказывается так называемая ***теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы***:

Если система молекул находится в тепловом равновесии при температуре *T*, то средняя кинетическая энергия равномерно распределена между всеми степенями свободы и для каждой степени свободы молекулы она равна

$$\frac{1}{2}kT.$$

Из этой теоремы следует, что молярные теплоемкости газа C_p и C_V и их отношение γ могут быть записаны в виде

$$C_V = \frac{i}{2}R,\ C_p = C_V + R = \frac{i+2}{2}R,\ \gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i},$$

где *i* – число степеней свободы газа.

Для газа, состоящего из ***одноатомных молекул*** (*i*=3)

$$C_V = \frac{3}{2}R,\ C_p = C_V + R = \frac{5}{2}R,\ \gamma = \frac{5}{3} = 1{,}66.$$

Для газа, состоящего из ***двухатомных молекул*** (*i*=5)

$$C_V = \frac{5}{2}R,\ C_p = C_V + R = \frac{7}{2}R,\ \gamma = \frac{7}{5} = 1{,}4.$$

Для газа, состоящего из ***многоатомных молекул*** (*i*=6)

$$C_V = 3R,\ C_p = C_V + R = 4R,\ \gamma = \frac{4}{3} = 1{,}33.$$

Экспериментально измеренные теплоемкости многих газов при обычных условиях достаточно хорошо согласуются с приведенными выражениями. Однако, в целом классическая теория теплоемкости газов не может считаться вполне удовлетворительной. Существует много примеров значительных расхождений между теорией и экспериментом. Это объясняется тем, что классическая теория не в состоянии полностью учесть энергию, связанную с внутренними движениями в молекуле.

Теорему о равномерном распределении энергии по степеням свободы можно применить и к тепловому движению частиц в твердом теле. Атомы, входящие в состав кристаллической решетки, совершают колебания около положений равновесия. Энергия этих колебаний и представляет собой внутреннюю энергию твердого тела. Каждый атом в кристаллической решетке может колебаться в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Следовательно, каждый атом имеет 3 колебательные степени свободы. При гармонических колебаниях

средняя кинетическая энергия равна средней потенциальной энергии. Поэтому в соответствии с теоремой о равномерном распределении на каждую колебательную степень свободы приходится средняя энергия kT, а на один атом – $3kT$. Внутренняя энергия 1 моля твердого вещества равна: $U=3N_Ak T=3RT$.

Поэтому молярная теплоемкость вещества в твердом состоянии равна: $C=3R=25{,}12$ Дж/моль·К.

Это соотношение называется ***законом Дюлонга-Пти***. Для твердых тел практически не существует различия между C_p и C_V из-за ничтожно малой работы при расширении или сжатии.

Опыт показывает, что у многих твердых тел (химических элементов) молярная теплоемкость при обычных температурах действительно близка к $3R$. Однако, при низких температурах наблюдаются значительные расхождения между теорией и экспериментом. Это показывает, что гипотеза о равномерном распределении энергии по степеням свободы является приближением. Наблюдаемая на опыте зависимость теплоемкости от температуры может быть объяснена только на основе квантовых представлений.

Применение первого закона термодинамики к различным процессам

С помощью первого закона термодинамики можно делать важные заключения о характере протекающих процессов. Рассмотрим различные процессы, при которых одна из физических величин остается неизменной (изопроцессы), например случай, когда система представляет собой идеальный газ.

Изохорный процесс. При изохорном процессе объем газа не меняется, и поэтому работа газа равна нулю. Изменение внутренней энергии газа согласно уравнению равно количеству переданной ему теплоты:

$$\Delta U = Q. \qquad (13.12)$$

Если газ нагревается, то $Q > 0$ и $\Delta U > 0$, его внутренняя энергия увеличивается.

При охлаждении газа $Q < 0$ и $\Delta U = U_2 - U_1 < 0$, изменение внутренней энергии отрицательно и внутренняя энергия газа уменьшается.

Изотермический процесс. При изотермическом процессе (T=const) внутренняя энергия идеального газа не меняется. Согласно формуле все переданное газу количество теплоты идет на совершение работы:

$$Q = A'. \qquad (13.13)$$

Если газ получает тепло $(Q > 0)$, то он совершает положительную работу $(A' > 0)$. Если, напротив, газ отдает тепло окружающей среде (термостату), то $Q < 0$ и $A' < 0$. Работа же внешних сил над газом в последнем случае положительна.

Изобарный процесс. При изобарном процессе согласно формуле передаваемое газу количество теплоты идет на изменение его внутренней энергии и на совершение им работы при постоянном давлении:

$$Q = \Delta U + A' = \Delta U + p\Delta V.$$

Адиабатный процесс. Рассмотрим теперь процесс, протекающий в системе, которая не обменивается теплом с окружающими телами. Процесс в теплоизолированной системе называют **адиабатным**.

При адиабатном процессе Q=0 и согласно уравнению изменение внутренней энергии происходит только за счет совершения работы:

$$\Delta U = A. \qquad (13.14)$$

Конечно, нельзя окружить систему оболочкой, абсолютно не допускающей теплопередачу. Но в ряде случаев можно считать реальные процессы очень близкими к адиабатным. Для этого они должны протекать достаточно быстро, так, чтобы за время процесса не произошло заметного теплообмена между системой и окружающими телами.

Согласно уравнению (13.14) при совершении над системой положительной работы, например при сжатии газа, его внутренняя энергия увеличивается, что означает повышение температуры газа. И наоборот, при расширении газа сам газ совершает положительную работу $(A' > 0)$ и его внутренняя энергия уменьшается – газ охлаждается.

Нагревание воздуха при быстром сжатии нашло применение в двигателях Дизеля. В этих двигателях отсутствует система зажигания горючей смеси, необходимая для обычных карбюраторных двигателей внутреннего сгорания. В цилиндр засасывается не горючая смесь, а атмосферный воздух. К концу такта сжатия в цилиндр с помощью специальной форсунки впрыскивается жидкое топливо (*рис.13.8*). К этому моменту температура воздуха так велика, что горючее воспламеняется. Двигатели Дизеля имеют больший коэффициент полезного действия, чем обычные, но более массивны и сложны в изготовлении и эксплуатации.

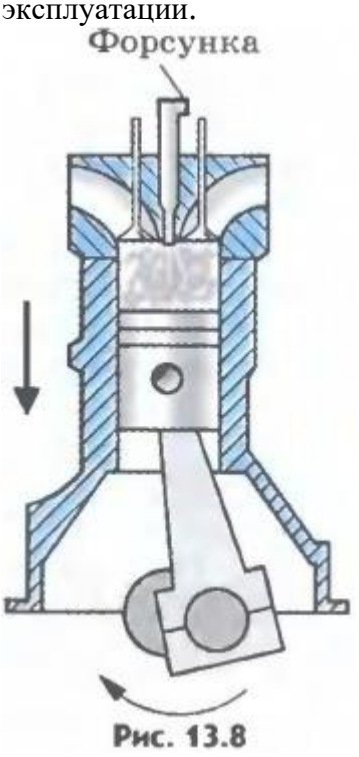


Рис. 13.8

При работе мощных компрессоров, сжимающих воздух, температура воздуха настолько увеличивается, что приходится прибегать к специальной системе охлаждения цилиндров. Адиабатное охлаждение газов при их расширении используется в машинах для сжижения газов.

Охлаждение газа при адиабатном расширении происходит в грандиозных масштабах в атмосфере Земли. Нагретый воздух поднимается вверх и расширяется, так как атмосферное давление падает с увеличением высоты. Это расширение сопровождается значительным охлаждением. В результате водяные пары конденсируются и образуют облака.

Теплообмен в изолированной системе.

Рассмотрим теплообмен внутри системы, состоящей из нескольких тел, имеющих первоначально различные температуры, например теплообмен между водой в сосуде и опущенным в воду горячим железным шариком. Будем считать, что система достаточно изолирована от окружающих тел и ее внутренняя энергия не изменяется (изолированная система). Никакой работы внутри этой системы не совершается. Тогда согласно первому закону термодинамики изменение энергии любого тела системы равно количеству теплоты, отданной или полученной этим телом до наступления теплового равновесия внутри системы. Складывая подобные выражения для всех тел системы и учитывая, что суммарная внутренняя энергия не меняется $(\Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \ldots = 0)$, получим следующее уравнение:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots = 0. \qquad (13.15)$$

Это уравнение носит название **уравнения теплового баланса**.

Внутренняя энергия идеального газа не изменяется только при изотермическом процессе. При изохорном она изменяется за счет теплопередачи, а при изобарном процессе внутренняя энергия газа изменяется как за счет теплопередачи, так и за счет совершения работы. В теплоизолированной системе происходит адиабатный процесс. Изменение энергии системы в этом процессе равно работе внешних сил.

Вопросы для закрепления:

1. Как формулируется первый закон термодинамики?
2. В каком случае изменение внутренней энергии отрицательно?
3. Почему можно говорить, что система обладает внутренней энергией, но нельзя сказать, что она обладает запасом определенного количества теплоты или работы?
4. В каком случае работа газа больше: при изотермическом расширении от объема V_1 до объема V_2 или при изобарном расширении от объема V_1 до объема V_2?

5. Как следует записать уравнение теплового баланса для изолированной системы из трех тел, переходящей в равновесное состояние?

14. Необратимость тепловых процессов. Тепловые двигатели и их К.П.Д. Холодильная машина. II закон термодинамики.

Необратимость процессов в природе.

Закон сохранения энергии утверждает, что количество энергии при любых ее превращениях остается неизменным. Между тем многие процессы, вполне допустимые с точки зрения закона сохранения энергии, никогда не протекают в действительности.

Примеры необратимых процессов. Нагретые тела постепенно остывают, передавая свою энергию более холодным окружающим телам. Обратный процесс передачи теплоты от холодного тела к горячему не противоречит закону сохранения энергии, если количество теплоты, отданное холодным телом, равно количеству теплоты, полученному горячим, но такой процесс самопроизвольно никогда не происходит.

Колебания маятника, выведенного из положения равновесия, затухают (рис.13.9). За счет работы сил трения механическая энергия маятника убывает, а температура маятника и окружающего воздуха слегка повышается. Механическая энергия самопроизвольно переходит во внутреннюю, но не наоборот.

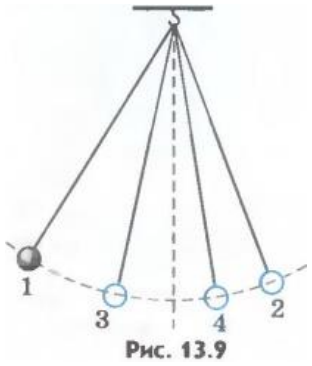


Рис. 13.9

Общее заключение о необратимости процессов в природе.

Переход тепла от горячего тела к холодному и механической энергии во внутреннюю – это примеры наиболее типичных необратимых процессов. Все макроскопические процессы в природе протекают только в одном определенном направлении. В обратном направлении они самопроизвольно протекать не могут. Все процессы в природе необратимы, и самые трагические из них – старение и смерть организмов.

Точная формулировка понятия необратимого процесса. Для правильного понимания существа необратимости процессов необходимо сделать следующее уточнение: необратимыми называются такие процессы, которые могут самопроизвольно протекать лишь в одном определенном направлении; в обратном направлении они могут протекать только при внешнем воздействии. Так, можно вновь увеличить размах колебаний маятника, подтолкнув его рукой. Но это увеличение возникает не само собой, а становится возможным в результате более сложного процесса, включающего движение руки.

Математически необратимость механических процессов выражается в том, что уравнения движения макроскопических тел изменяются с изменением знака времени. Они, как говорят в таких случаях, не инвариантны при преобразовании t→-t. Ускорение не меняет знака при замене t→-t. Силы, зависящие от расстояний, также не изменяют знака. Знак при замене t на –t меняется у скорости. Именно поэтому при совершении работы силами трения, зависящими от скорости, кинетическая энергия тела необратимо переходит во внутреннюю.

Кино «наоборот». Яркой иллюстрацией необратимости явлений в природе служит просмотр кинофильма в обратном направлении. Например, прыжок в воду будет при этом выглядеть следующим образом. Спокойная вода в бассейне начинает бурлить, появляются ноги, стремительно движущиеся вверх, а затем и весь ныряльщик. Поверхность воды быстро успокаивается. Постепенно скорость ныряльщика уменьшается, и вот уже он спокойно стоит на вышке. То, что мы видим на экране, могло бы происходить в действительности, если бы процессы можно было обратить. Нелепость происходящего на экране проистекает из того, что мы привыкли к определенной направленности процессов и не сомневаемся в невозможности их обратного течения. А ведь такой процесс, как вознесение ныряльщика на вышку из воды, не противоречит ни закону сохранения энергии, ни законам механики, ни вообще каким-либо законам, кроме второго закона термодинамики.

Второй закон термодинамики. Второй закон термодинамики указывает направление возможных энергетических превращений, т. е. направление процессов, и тем самым выражает необратимость процессов в природе. Этот закон был установлен путем непосредственного обобщения опытных фактов. Есть несколько формулировок второго закона, которые, несмотря на внешнее различие, выражают, в сущности, одно и то же и поэтому равноценны.

Немецкий ученый Р. Клаузиус (1822-1888) сформулировал этот закон так: невозможно перевести тепло от более холодной системы к более горячей при отсутствии других одновременных изменений в обеих системах или в окружающих телах. Здесь констатируется опытный факт определенной направленности теплопередачи: тепло само собой переходит всегда от горячих тел к холодным. Правда, в холодильных установках осуществляется теплопередача от холодного тела к более теплому, но эта передача связана с другими изменениями в окружающих телах: охлаждение достигается за счет работы.

Важность этого закона в том, что из него можно вывести заключение о необратимости не только процесса теплопередачи, но и других процессов в природе. Если бы тепло в каких-либо случаях могло самопроизвольно передаваться от холодных тел к горячим, то это позволило бы сделать обратимыми и другие процессы.

Все процессы самопроизвольно протекают в одном определенном направлении. Они необратимы. Тепло всегда переходит от горячего тела к холодному, а механическая энергия макроскопических тел – во внутреннюю.

Направление процессов в природе указывается вторым законом термодинамики.

Принцип действия тепловых двигателей. Коэффициент полезного действия (КПД) тепловых двигателей

Запасы внутренней энергии в земной коре и океанах можно считать практически неограниченными.

Принципы 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 счет 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 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. Ее 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 атмосферы.

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

Тепловой двигатель совершает работу за счет внутренней энергии рабочего тела. Причем в этом процессе происходит передача теплоты от более горячих тел (нагревателя) к более холодным (холодильнику).

Принципиальная схема теплового двигателя изображена на рисунке 13.11.

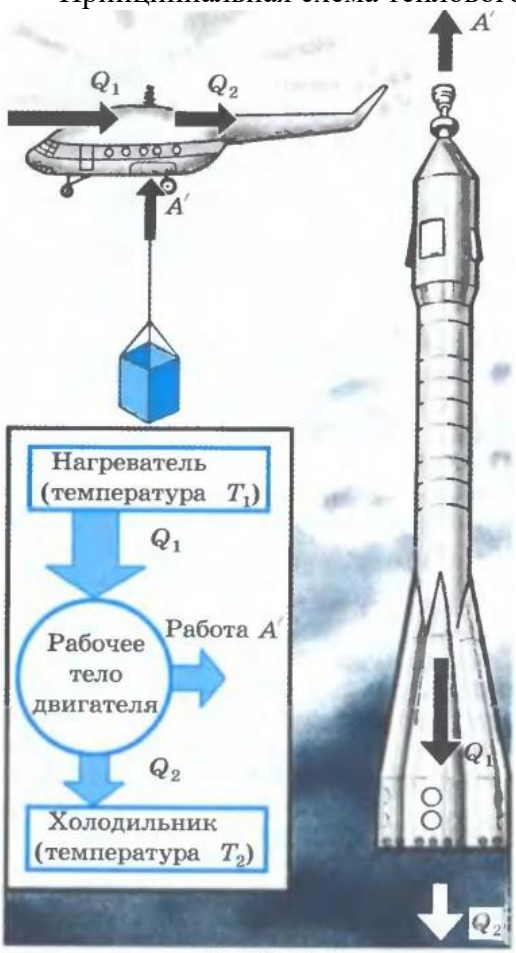


Рис. 13.11

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

Коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя.

Невозможность полного превращения внутренней энергии газа в работу тепловых двигателей обусловлена необратимостью процессов в природе.

Если бы тепло могло самопроизвольно возвращаться от холодильника к нагревателю, то внутренняя энергия могла бы быть полностью превращена в полезную работу с помощью любого теплового двигателя.

Согласно закону сохранения энергии работа, совершаемая двигателем, равна:

$$A' = Q_1 - |Q_2|, \qquad (13.17)$$

где Q_1 – количество теплоты, полученное от нагревателя, а Q2 – количество теплоты, отданное холодильнику.

Коэффициентом полезного действия (КПД) теплового двигателя называют отношение работы A′, совершаемой двигателем, к количеству теплоты, полученной от нагревателя:

$$\eta = \frac{A'}{|Q_1|} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}. \qquad (13.18)$$

Так как у всех двигателей некоторое количество теплоты передается холодильнику, то $\eta<1$.

КПД теплового двигателя пропорционален разности температур нагревателя и холодильника. При $T_1-T_2=0$ двигатель не может работать.

Максимальное значение КПД тепловых двигателей. Законы термодинамики позволяют вычислить максимально возможный КПД теплового двигателя, работающего с нагревателем, имеющим температуру T_1, и холодильником с температурой T_2. Впервые это сделал французский инженер и ученый Сади Карно (1796-1832) в труде «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (1824).

Идеальная тепловая машина. Карно придумал идеальную тепловую машину с идеальным газом в качестве рабочего тела. Идеальная тепловая машина Карно работает по циклу, состоящему из двух изотерм и двух адиабат. Сначала сосуд с газом приводят в контакт с нагревателем, газ изотермически расширяется, совершая положительную работу, при температуре T_1, при этом он получает количество теплоты Q_1.

Затем сосуд теплоизолируют, газ продолжает расширяться уже адиабатно, при этом его температура понижается до температуры холодильника T_2. После этого газ приводят в контакт с холодильником, при изотермическом сжатии он отдает холодильнику количество теплоты Q_2, сжимаясь до объема $V_4<V_1$. Затем сосуд снова термоизолируют, газ сжимается адиабатно до объема V_1и возвращается в первоначальное состояние.

Карно получил для КПД этой машины следующее выражение:

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \qquad (13.19)$$

Как и следовало ожидать, КПД машины Карно прямо пропорционален разности абсолютных температур нагревателя и холодильника.

Главное значение этой формулы состоит в том, что любая реальная тепловая машина, работающая с нагревателем, имеющим температуру T_1, и холодильником с температурой T_2, не может иметь КПД, превышающий КПД идеальной тепловой машины.

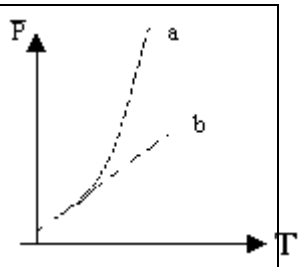
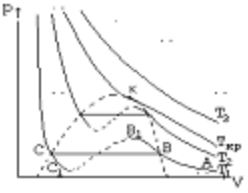
$$\frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} \leqslant \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Вопросы для закрепления:

1. Какие процессы называются необратимыми? Назовите наиболее типичные необратимые процессы.
2. Как формулируется второй закон термодинамики?
3. Если бы реки потекли вспять, означало бы это, что нарушается закон сохранения энергии?
4. Какое устройство называют тепловым двигателем?
5. Какова роль нагревателя, холодильника и рабочего тела в тепловом двигателе?
6. Что называется коэффициентом полезного действия двигателя?
7. Чему равно максимальное значение коэффициента полезного действия теплового двигателя?

15. Свойства паров. Кипение. Критическое состояние вещества. Влажность воздуха.

НАСЫЩЕННЫЙ И НЕНАСЫЩЕННЫЙ ПАР.

Вещество в газообразном состоянии, находящееся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется **насыщенным паром. Динамическое равновесие** заключается в том, что процессы испарения и конденсации уравновешены. Давление насыщенного пара в зависимости от температуры (кривая a) растет быстрее, чем идеального газа (график b), т.к. с ростом температуры увеличивается концентрация, а p=nkT.	
Основное свойство насыщенного пара – давление пара при постоянной температуре не зависит от объема (см. изотерму). Участок BC соответствует насыщенному пару.	

Число молекул, вылетающих с единицы площади поверхности жидкости за одну секунду, зависит от температуры жидкости. Число молекул, возвращающихся из пара в

жидкость, зависит от концентрации молекул пара и от средней скорости их теплового движения, которая определяется температурой пара. Отсюда следует, что для данного вещества концентрация молекул пара при равновесии жидкости и ее пара определяется их равновесной температурой. Установление динамического равновесия между процессами испарения и конденсации при повышении температуры происходит при более высоких концентрациях молекул пара. Так как давление газа (пара) определяется его концентрацией и температурой, то можно сделать вывод: **давление *насыщенного пара* p_0 данного вещества зависит только от его температуры и не зависит от объема**. Поэтому изотермы реальных газов на плоскости (p, V) содержат горизонтальные участки, соответствующие двухфазной системе (рис. 3.4.1).

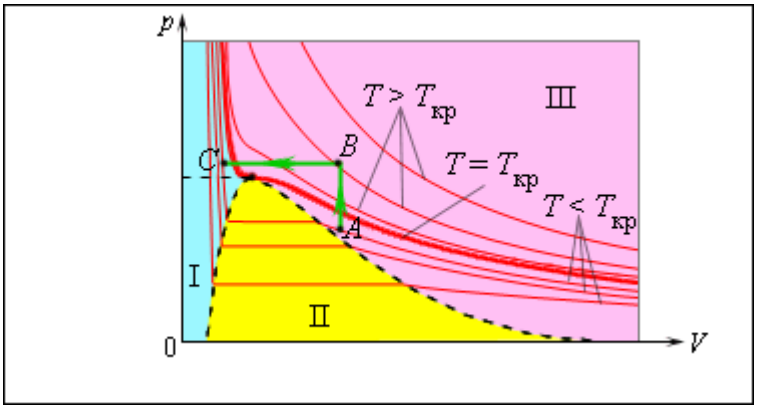
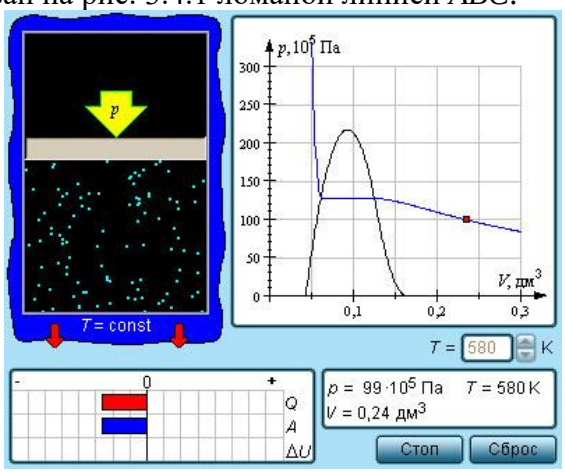


Рисунок 3.4.1. Изотермы реального газа. Область I – жидкость, область II – двухфазная система «жидкость + насыщенный пар», область III – газообразное вещество. *K* – критическая точка

При повышении температуры давление насыщенного пара и его плотность возрастают, а плотность жидкости уменьшается из-за теплового расширения. При температуре, равной критической температуре $T_{кр}$ для данного вещества, плотности пара и жидкости становятся одинаковыми. При $T>T_{кр}$ исчезают физические различия между жидкостью и ее насыщенным паром.

Если изотермически сжимать ненасыщенный пар при $T<T_{кр}$, то его давление будет возрастать, пока не станет равным давлению насыщенного пара. При дальнейшем уменьшении объема на дне сосуда образуется жидкость и устанавливается динамическое равновесие между жидкостью и ее насыщенным паром. С уменьшением объема все большая часть пара конденсируется, а его давление остается неизменным (горизонтальный участок на изотерме). Когда весь пар превращается в жидкость, давление резко возрастает при дальнейшем уменьшении объема вследствие малой сжимаемости жидкости.

Из газообразного состояния в жидкое можно перейти, минуя двухфазную область. Для этого нужно совершить процесс в обход критической точки *K*. Один из возможных процессов такого рода показан на рис. 3.4.1 ломаной линией *ABC*.



Модель. Изотермы реального газа

Кривая 0*T*, соответствующая равновесию между твердой и газообразной фазами, называется **кривой сублимации**. Кривая *TK* равновесия между жидкостью и паром называется **кривой испарения**, она обрывается в критической точке *K*. Кривая *TM* равновесия между твердым телом и жидкостью называется **кривой плавления**.

Кривые равновесия сходятся в точке *T*, в которой могут сосуществовать в равновесии все три фазы. Эта точка называется **тройной точкой**.

Для многих веществ давление $p_{тр}$ в тройной точке меньше 1 атм$\approx 10^5$ Па. Такие вещества при нагревании при атмосферном давлении плавятся. Например, тройная точка воды имеет координаты $T_{тр}$=273,16 К, $p_{тр}=6{,}02\cdot 10^2$ Па и используется в качестве опорной для калибровки абсолютной температурной шкалы Кельвина. Существуют, однако, и такие вещества, у которых $p_{тр}$ превышает 1 атм. Так для углекислоты (CO_2) давление $p_{тр}$=5,11 атм. и температура $T_{тр}$=216,5 К. Поэтому при атмосферном давлении твердая углекислота может существовать только при низкой температуре, а в жидком состоянии при p=1 атм. она вообще не существует. В твердом состоянии в равновесии со своим паром при атмосферном давлении углекислота находится при температуре 173 К или -80 °С. Это широко применяемый «сухой лед», который никогда не плавится, а только испаряется (сублимирует).

Кипение – процесс активного парообразования во всем объеме жидкости. Сопровождается образованием и ростом пузырьков пара внутри жидкости. Пузырьки образуются около центров парообразования (примеси, микротрещины).

Кипение происходит:

1. Во всем объеме,
2. При постоянной температуре (температура кипения). Поэтому требует постоянного притока тепла.

Температура кипения определяется

1. Свойствами жидкости (таблица температур кипения).
2. Внешними условиями (давлением).

Условие роста пузырьков: $\mathbf{p_{пара} > p_{атм} + rgh}$ **–** следовательно, с понижением атмосферного давления температура кипения понижается.

Условие подъема пузырька: $\mathbf{F_{Apx} = mg.}$

На границе раздела пар жидкость фазовый переход при кипение осуществляется путем ***испарения***. Пузырьки растут вследствие испарения в них жидкости, всплывают, и содержащийся в них насыщенный пар переходит в паровую фазу над жидкостью.

Кипение – одно из фундаментальных физических явлений, используемое во многих процессах химической технологии. Особенность последних состоит в широком применении растворов и смесей различных веществ в качестве рабочих тел.

С понижением давления уменьшается плотность пара, возрастает минимальный радиус образования зародышей, поверхность нагрева обедняется центрами генерации паровых пузырей. Это приводит к нестабильному кипению, при котором происходит конвективное движение перегретой жидкости, сменяемое бурным вскипанием, инициированным одной или несколькими микровпадинами подходящего радиуса. С понижением температуры при вскипании жидкости эти микровпадины "выключаются", и снова повторяется цикл перегрева движущейся конвективно жидкости.

Если давление насыщенного пара жидкости равно внешнему давлению (т. е. давлению газа в пузырьках) или превышает его, жидкость будет испаряться внутрь пузырьков. Пузырьки, наполненные паром, расширяются и всплывают на поверхность. Этот процесс называется ***кипением***. Таким образом, **кипение жидкости начинается при такой температуре, при которой давление ее насыщенных паров становится равным внешнему давлению**.

В частности, при нормальном атмосферном давлении вода кипит при температуре 100 °С. Это значит, что при такой температуре давление насыщенных паров воды равно 1 атм.

При подъеме в горы атмосферное давление уменьшается, и поэтому температура кипения воды понижается (приблизительно на 1 °С на каждые 300 метров высоты). На высоте 7 км давление составляет примерно 0,4 атм, и температура кипения понижается до 70 °С.

В герметически закрытом сосуде жидкость кипеть не может, т. к. при каждом значении температуры устанавливается равновесие между жидкостью и ее насыщенным паром.

Великий русский ученый Д.И.Менделеев впервые выяснил в 1869г., что не при всякой температуре можно пар обратить в жидкость, и что для каждой жидкости существует температура, выше которой ее пары ни при каком давлении не могут быть обращены в жидкость.Такая температура называется критической. Например для воды она равна +374 °С, для кислорода – 188,82 °С.

Кипение – это парообразование, которое происходит в объеме всей жидкости и при постоянной температуре. При кипении по всему объему жидкости образуются быстро растущие пузырьки пара, которые всплывают наверх. В пузырьке пар насыщенный.

Температура кипения. Температура, при которой происходит кипение жидкости, находящейся под постоянным давлением (напр., атмосферным), называется ***температурой кипения ($T_{кип}$).***

В качестве $T_{кип}$ принимают температуру насыщенного пара (температуру насыщения) над плоской поверхностью жидкости, кипящей при данном давлении. Температура кипения при атмосферном давлении приводится обычно как одна из основных физико-химических характеристик химически чистого вещества. С возрастанием давления $T_{кип}$ увеличивается. Предельная $T_{кип}$ – критическая температура вещества. Понижение $T_{кип}$ с уменьшением внешнего давления лежит в основе определения барометрического давления.

С увеличением температуры окружающей жидкости давление насыщенного пара увеличивается, гидростатическое давление при подъеме пузырька уменьшается. Когда пузырек достигает поверхности жидкости, то давление насыщенного пара в нем практически равно атмосферному давлению на поверхности жидкости и пузырек лопается.

Кипение жидкости происходит при одинаковой температуре всей жидкости, когда давление насыщенного пара равно внешнему давлению. Чем больше внешнее давление, тем выше температура кипения. И наоборот, при уменьшении давления температура кипения понижается. Так, откачивая насосом воздух из сосуда, где находится стакан с водой, можно заставить воду кипеть при комнатной температуре.

Прямопропорциональна зависимость жидкости от атмосферного давления, чем он более, тем выше температура, при которой проходит кипение воды. Температура, при которой кипит жидкость, именуется температурой кипения. Температура кипения жидкости при нормальном атмосферном давлении именуется точкой кипения.

Однако вода может кипеть и при 150 °С, и при 200 °С, и т.д., а может кипеть и при 500 °С. Повышенное давление и повышенная температура кипения создаются в автоклавах.

Температура кипения воды самая крупная в шахтах, а наименьшая в горах.

При кипении, при пониженном давлении температура жидкости понижается, так как она кипит за счет своей внутренней энергии.

Критическая температура вещества.

Критической температурой вещества именуется подобная температура, при которой плотность жидкости и плотность ее насыщенного пара становятся одинаковыми. Кислород и другие газы при обычных температурах не могут быть обращены в жидкое состояние, какому бы давлению их не подвергали, потому, что их температура при этом значительно выше критической. Если поместить жидкость в замкнутый сосуд и нагревать ее, то упругость паров, полученных из этой жидкости, будет расти с ростом температуры. Одновременно будет расти и плотность паров, а плотность жидкости будет уменьшаться, пока различие между паром и жидкостью не исчезнет.

Критическое давление.

Давление, при котором исчезает различие между паром и жидкостью, находящихся при критической температуре, ***называется критическим.***

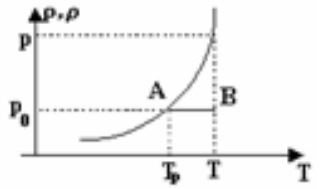
Например критическая температура углекислого газа + 31,1 °С, а критическое давление 73 *атм*. Критическая температура аммиака + 132 °С, а критическое давление 109 *атм*. Состояние, в котором находится вещество при критической температуре и критическом давлении, называется критическим. В критическом состоянии жидкость и ее пар становятся неразличимыми. Удельная теплота парообразования при критической температуре становится равной нулю.

Влажность – величина, характеризующая содержание водяных паров в воздухе.

Абсолютную влажность измеряют плотностью водяного пара в воздухе (r, $\frac{г}{м^3}$,) или его парциальным давлением р (Па).

Относительная влажность показывает, сколько процентов составляет абсолютная влажность от необходимой для насыщения воздуха при данной температуре: $\varphi = \frac{\rho}{\rho_0} 100\% = \frac{p}{p_0} 100\%$.

Температура, при которой воздух в процессе своего охлаждения становится насыщенным водяными парами, называется точкой росы (см. рис.).



Приборы для измерения влажности: волосной гигрометр, жидкостный (конденсационный) гигрометр, гигрометр психрометрический (психрометр).

В атмосферном воздухе всегда присутствуют пары воды при некотором парциальном давлении p, которое, как правило, меньше давления насыщенного пара p_0. Отношение p/p_0, выраженное в процентах, называется ***относительной влажностью*** воздуха.

Вопросы для закрепления:

1. Что такое кипение? При каких условиях происходит кипение?
2. Что называют критической температурой вещества?
3. Какое давление называется критическим?
4. От чего зависит испарение и конденсация?
5. При каких условиях пар становится насыщенным?
6. От чего зависит давление насыщенного пара?
7. Что называют точкой росы?
8. Приборы для определения относительной влажности воздуха?

16. Свойства поверхностного слоя жидкости. Капиллярные явления, смачивание.

Основные свойства жидкостей:

- не имеют формы
- имеют объем

- несжимаемы, т. к. молекулы жидкости находятся на малых расстояниях друг от друга.

Поэтому для сжатия жидкостей надо преодолевать силы молекулярного отталкивания. Из-за того, что расстояние между молекулами в жидкости малы, увеличиваются силы притяжения молекул друг к другу. Образно говоря, при переходе из газообразного состояния в жидкое молекулы как бы слипаются.

Специально поставленные эксперименты показали, что в жидкостях вблизи каждой молекулы другие молекулы располагаются в определенном порядке. Однако в масштабе больших областей порядка в расположении молекул нет. Поэтому говорят, что в расположении молекул жидкости имеется ближний порядок и отсутствует дальний порядок.

Каждая молекула в течении некоторого времени хаотически колеблется около определенного положения равновесия. Время от времени молекула меняет место равновесия, перемещаясь скачком в новое положение, отстоящее от предыдущего на расстояние порядка самих молекул. Таким образом, молекулы лишь медленно перемещаются внутри жидкости, пребывая часть времени около определенных мест, т. е. молекулы странствуют по всему объему жидкости, ведя кочевой образ жизни, при котором кратковременные переезды сменяются относительно длинными периодами оседлой жизни. Длительности этих “стоянок” весьма различны и беспорядочно меняются со временем, резко убывают с повышением температуры

Поверхностное натяжение

Молекулы поверхностного слоя оказывают молекулярное давление на жидкость, стягивая ее поверхность к минимуму. Этот эффект называют **поверхностным натяжением.**

Поверхность жидкости, соприкасающейся с другой средой, например с ее собственным паром, с какой-либо другой жидкостью или с твердым телом (в частности, со стенками сосуда, в котором она содержится), находится в особых условиях по сравнению с остальной массой жидкости.

Возникают эти особые условия потому, что молекулы пограничного слоя жидкости, в отличие от молекул в ее глубине, окружены молекулами т. ж. жидкости не со всех сторон (рис.1).

Часть “соседей” поверхностных молекул- это частицы второй среды, с которой жидкость граничит. Имея же разных соседей, молекулы поверхностного слоя и взаимодействуют с ними различным способом. Поэтому силы, действующие на каждую молекулу в этом слое, оказываются неуравновешенными: существует некоторая равнодействующая сила, направленная либо в сторону объема жидкости, либо в сторону граничащей с ней среды.(рис.1)

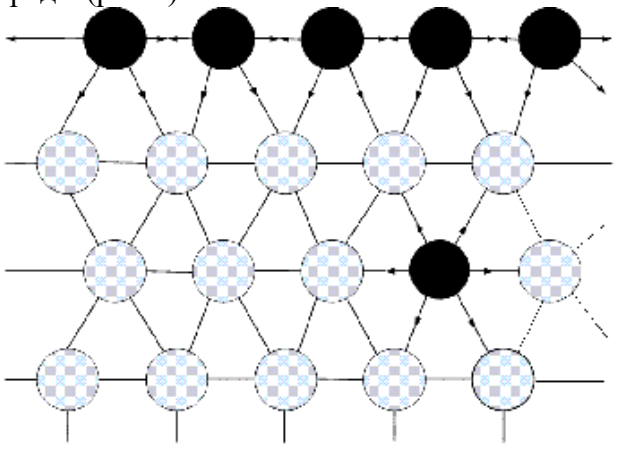


Рис.1

На каждую молекулу жидкости действуют силы притяжения к окружающим ее молекулам, удаленным от нее на расстояние порядка 10^{-9} м.

Рассмотрим молекулу М ,расположенную внутри жидкости, налитой в сосуд. Со всех сторон эту молекулу окружают т.ж. молекулы, и силы притяжения выделенной молекулы к ее соседям уравновешиваются. Выделим молекулу М, находящуюся на поверхности жидкости. Результирующая сила притяжения этой молекулы к молекулам пара меньше результирующей силы ее притяжения к молекулам жидкости. Благодаря этому появляется равнодействующая сила, направленная внутрь жидкости. То же можно сказать о всех молекулах жидкости, находящихся в поверхностном слое, толщина которого равна радиусу действия молекулярных сил.

Поверхностный слой давит на молекулы, находящиеся внутри жидкости. В этом отношении он напоминает оболочку детского воздушного шара. (рис.2).

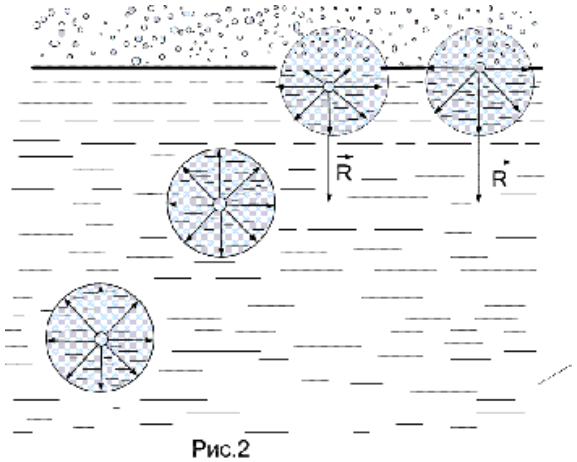


Рис.2

Чтобы переместить молекулу М , расположенную непосредственно под поверхностным слоем, необходимо совершить работу против сил молекулярного давления, следовательно молекулы образующие поверхностный слой жидкости, обладают дополнительной потенциальной энергией по сравнению с молекулами находящимися внутри жидкости.

Любая механическая система, будучи предоставлена самой себе, стремится занять такое положение, в котором ее потенциальная энергия наименьшая. Когда жидкость находится в свободном состоянии и не взаимодействует с опорой или сосудом она принимает форму шара.

Поверхностное натяжение – стремление вещества (жидкости или твердой фазы) уменьшить избыток своей потенциальной энергии на границе раздела с др. фазой (поверхностную энергию). Определяется как работа, затрачиваемая на создание единицы площади поверхности раздела фаз (размерность Дж/м^2). Согласно др. определению, поверхностное натяжение – сила, отнесенная к единице длины контура, ограничивающего поверхности раздела фаз (размерность Н/м); эта сила действует тангенциально к поверхности и препятствует ее самопроизвольному увеличению.

Поверхностное натяжение – основная термодинамическая характеристика поверхностного слоя жидкости на границе с газовой фазой или др. жидкостью. Поверхностное натяжение различных жидкостей на границе с собственным паром изменяется в широких пределах: от единиц для сжиженных низкокипящих газов до нескольких тыс. мН/м для расплавленных тугоплавких веществ. Поверхностное натяжение зависит от температуры. Для многих однокомпонентных неассоциированных жидкостей (вода, расплавы солей, жидкие металлы) вдали от критической температуры хорошо выполняется линейная зависимость: $\sigma = \sigma_0 - \alpha(T - T_0)$,

ФРОНТАЛЬНЫЙ ОПЫТ

№1 ***Цель: выяснить какую форму принимает жидкость под действием одних только сил поверхностного натяжения***. В колбу с разбавленным спиртом помещаем пипеткой каплю растительного масла. Какой восхитительный золотистый шар плавает внутри раствора! Вновь тема для размышления.

ВЫВОД: Жидкость в отсутствии силы тяжести, или когда она уравновешена силой Архимеда, принимает сферическую форму, имеющую минимальную поверхность при одном и том же объеме.

Некоторые жидкости (мыльная вода) обладают свойством образовывать тонкие пленки.

F= σ **l**

σ – коэффициент поверхностного натяжения

l – периметр смачивания

МЕТОД КАПЕЛЬ.

Малый объем жидкости сам по себе принимает форму, близкую к шару, т.к. благодаря малой массе жидкости мала и сила тяжести, действующая на нее.

Поверхностная энергия и в этом случае превышает потенциальную энергию силы тяжести и форма жидкости определяется именно ею. Этим объясняется шарообразная форма капель жидкости

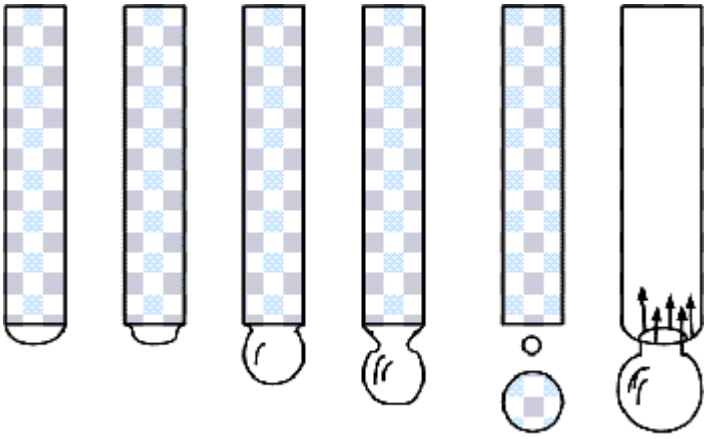


Рис.5

При выходе из трубки размер капли постепенно нарастает, но отрывается она только тогда, когда достигает вполне определенного размера. Это происходит потому, что пока капля недостаточно велика, силы поверхностного натяжения достаточны для того, чтобы противостоять силе тяжести и предотвратить отрыв.

Отрыв же произойдет т.к. вес капли станет равен силе поверхностного натяжения удерживающей ее.

Отсюда следует, что из наблюдений над отрывом капель можно определить численное значение коэффициента поверхностного натяжения.

ВЫВОД: форма капли, ее окружность и тонкая шейка обусловлены существованием силы поверхностного натяжения.

Чем меньше поверхностное натяжение, тем легче жидкость проникает в ткань .Высокая проникающая способность мыльного раствора, позволяющая лучше очищать ткани объясняется его малым поверхностным натяжением.

Поверхностное натяжение зависит:

- от рода жидкости
- наличия примесей
- от температуры (при высокой температуре коэффициент поверхностного натяжения стремится к нулю.)

На поверхности жидкости, вблизи границы, разделяющей жидкость и ее пар, взаимодействие между молекулами жидкости отличается от взаимодействия молекул внутри объема жидкости**.**

Смачивание – это поверхностное явление, заключающееся во взаимодействии жидкости с поверхностью твёрдого тела или другой жидкостью при условии, что присутствует третья (обычно, но не обязательно, газовая) фаза, причём происходит одновременный контакт всех этих трёх не смешивающихся фаз. Смачивание ответственно за растекание жидкости по твёрдой поверхности, за форму лежащих на ней капель, за пропитывание порошков и пористых веществ (капиллярные явления) и др.

Смачивание зависит от соотношения между силами сцепления молекул жидкости с молекулами (или атомами) смачиваемого тела (адгезия) и силами взаимного сцепления молекул жидкости (когезия).

1. Сильное притяжение друг к другу молекулы жидкости, чем к молекулам твёрдого тела . Тогда получается, что силы притяжения между молекулами жидкости собирают её в капельку. Например: ртуть (когда она на стекле), вода (на парафине или «жирной» поверхности). Это случай, когда жидкость не смачивает поверхность;
2. Когда молекулы жидкости слабее притягиваются друг к другу, чем к молекулам твёрдого тела. Тогда жидкость пытается прижаться к поверхности и расплывается по ней. Например: ртуть (на цинковой пластине), вода (на чистом стекле или дереве). Это случай смачивания поверхности.

Угол смачивания (показывает степень смачивания) – это угол, который образованный касательными плоскостями к межфазным поверхностям, которые ограничивают смачивающую жидкость, при этом всём вершина угла лежит на линии раздела трёх фаз. Измерение происходит методом лежащей капли.

На рисунке 3 показана схема смачивания и не смачивания

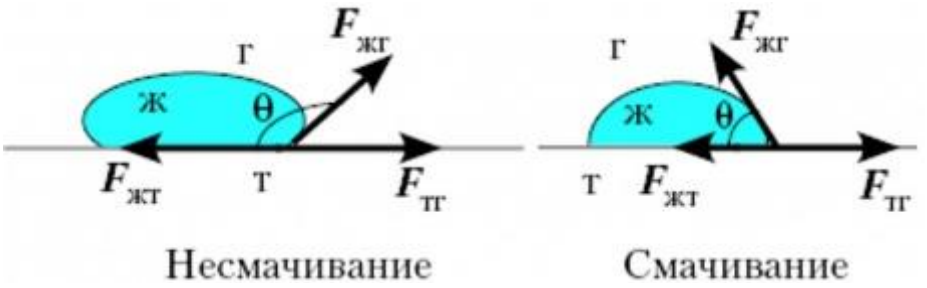
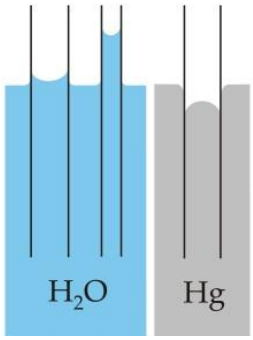


Рис.3. Смачивание и не смачивание.

Капиллярные явления – физические явления, обусловленные действием поверхностного натяжения на границе раздела несмешивающихся сред. К капиллярным явлениям относят обычно явления в жидких средах, вызванные искривлением их поверхности, граничащей с др. жидкостью, газом или собственным паром.

Капиллярность – заключается в том что жидкость может изменять уровень в трубках, а так же узких каналах, которые имеют произвольную форму, в простых телах.



Поднимается жидкость при методе смачивания каналов жидкостями. Например: вода в стеклянной трубке, грунте, песке. Понижается жидкость при методе не смачивания жидкостью. Например: ртуть в трубке стеклянной.

Капилляры – тонкие трубки (очень тонкие сосуды в организме и животных).

Измерение степени смачивания весьма важно во многих отраслях промышленности (лакокрасочная, фармацевтическая, косметическая и т.д.). К примеру, на лобовые стёкла автомобилей наносят особые покрытия, которые должны быть устойчивы против разных видов загрязнений. Состав и физические свойства покрытия стёкол и контактных линз можно сделать оптимальным по результатам измерения контактного угла.

К примеру, популярный метод увеличения добычи нефти при помощи закачки воды в пласт исходит из того, что вода заполняет поры и выдавливает нефть. В случае мелких пор и чистой воды это далеко не так, поэтому приходится добавлять специальные ПАВ. Оценку смачиваемости горных пород при добавлении различных по составу растворов можно измерить различными приборами.

Высота поднятия жидкости в капиллярной трубке h определяется уравновешиванием лапласовского и гидростатичесого давлений:

Высота подъёма (опускания) уровня жидкости в капилляре будет равна:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r} \qquad \frac{2\sigma}{R} = \rho g h$$

где

- ρ - плотность жидкости
- σ - поверхностное натяжение
- R - радиус сферической формы мениска

Капиллярные явления в природе.

Большинство растительных и животных тканей пронизано громадным числом капиллярных сосудов. Именно в капиллярах происходят основные процессы, связанные с дыханием и питанием организма. Стволы деревьев, ветви и стебли растений пронизаны огромным числом капиллярных трубочек, по которым питательные вещества поднимаются до самых верхних листочков. Корневая система растений оканчивается тончайшими нитями-капиллярами. И сама почва, источник питания для корня, может быть представлена как

совокупность капиллярных трубочек. Ранняя весенняя вспашка земли разрушает капилляры, т.е. сохраняет подпочвенную влагу и увеличивает урожай.

В технике капиллярные явления имеют огромное значение, например, в процессах сушки капиллярно-пористых тел и т.п. Большое значение капиллярные явления имеют в строительном деле. Например, чтобы кирпичная стена не сырела, между фундаментом дома и стеной делают прокладку из вещества, в котором нет капилляров (рубероид). В бумажной промышленности приходится учитывать капиллярность при изготовлении различных сортов бумаги. Например, при изготовлении писчей бумаги (бумага, предназначенная для письма чернилами) ее пропитывают специальным составом, закупоривающим капилляры.

В быту капиллярные явления используют при самых разнообразных обстоятельствах. Прикладывая промокательную бумагу, удаляют излишек чернил с письма, хлопчатобумажной или льняной тряпкой вытирают мокрые места на столе или на полу. Применение полотенец, салфеток возможно только благодаря наличию в них капилляров. Поднятие керосина или расплавленного стеарина по фитилям ламп и свечей обусловлено наличием в фитилях капиллярных каналов. В технике как один из способов подвода смазки к деталям машин применяют иногда фитильный способ подачи масла.

Смачивание может объяснить применение моющих средств, тот факт, почему руки, которые в масле или смазке легче смыть бензином, чем водой, а так же почему гуси выходят сухими их воды и др. Объяснение капиллярных явлений происходит в движении воды в растениях и капиллярах. А так же при обработке почвы. Например: сохранение влаги рыхлением и др., разрушая капилляры. А так же капиллярное явление может объяснить электрические и ядерные явления, позволяет выявлять трещины с раскрытием от 1 мкм, которые невозможно увидеть невооруженным глазом.

Выводы.

Мы живём в мире самых удивительных явлений природы. Их очень много. Мы сталкиваемся с ними каждый день, не задумываясь о сущности. Но человек как разумный феномен должен понимать суть этих явлений. Такие явления как смачивание и не смачивание, капиллярное явление очень широко распространены в технике и природе. Они незаменимы в повседневной жизни и в решении научно-технических задач. Эти знания дают нам ответы на многие вопросы. Например, почему капля является в свободном полете или почему планеты и звёзды имеют шарообразную форму, одни твёрдые тела хорошо смачиваются жидкостью, а другие нет. Почему капиллярные явления могут всасывать питательные элементы, влагу из почвы корней растений, или почему кровообращение в животных организмах основано на капиллярном явлении и т. д.

Вопросы для закрепления:

1. Что такое капилляр?
2. Как распознать смачивание и не смачивание?
3. Приведите пример смачивания.
4. Что такое капиллярное явление?
5. Приведите пример не смачивания.

17. Строение кристаллических и амофорных тел. Деформация и ее виды. Закон Гука. Модуль Юнга.

Отличие твердых тел (и жидкостей) от газов заключается в том, что при незначительных изменениях объема в твердых телах (и жидкостях) возникают значительные силы упругости, тогда как в газах даже при значительном изменении объема (до определенного предела)

увеличения сил упругости почти не происходит. От жидкостей твердые тела отличаются тем, что силы упругости в них возникают и при изменении формы (сдвиг), чего не происходит в жидкости, способной принимать любую форму.

Твердые тела могут существовать в двух различных состояниях – кристаллическом и аморфном.

Большинство окружающих нас твердых тел – вещества в твердом состоянии .Специальная область физики – физика твердого тела – занимается изучением строения и свойств твердых тел.



По характеру относительного расположения частиц, твердые тела делятся на три вида:

1. кристаллические
2. аморфные
3. композиты

Кристаллические тела

Если рассмотреть при помощи лупы или микроскопа крупинки соли, то можно заметить, что они ограничены плоскими гранями. Наличие таких граней – признак нахождения тела в кристаллическом состоянии.

Кристаллы – это твёрдые тела, атомы или молекулы которых занимают определённые, упорядоченные положения в пространстве.

Кристаллы одного и того же вещества имеют разнообразную форму. Углы между отдельными гранями кристаллов одинаковы. Некоторые формы кристаллов симметричны. Кристаллические тела имеют определенную температуру плавления, неизменную при постоянном давлении. Идеальная форма кристалла имеет вид многогранника. Такой кристалл ограничен плоскими гранями, прямыми ребрами и обладает симметрией.

На первый взгляд кажется, что число видов симметрии может быть бесконечно большим. В 1867 г. русский инженер А. В. Гадолин впервые доказал, что кристаллы могут обладать лишь 32 видами симметрии. Убедимся в симметрии кристаллика снега - снежинки.

Симметрия кристаллов и другие их свойства, о которых мы будем говорить далее, привели к важной догадке о закономерностях в расположении частиц, составляющих кристалл. Может кто-нибудь из вас попытается ее сформулировать?

Частицы в кристалле располагаются так, что они образуют определенную правильную форму, решетку.

Частицы в кристалле образуют правильную пространственную решетку. Пространственные решетки различных кристаллов различны. Перед вами модель пространственной решетки поваренной соли. (Демонстрирует модель.) Шарики одного цвета имитируют ионы натрия, шарики другого цвета – ионы хлора. Если соединить эти узлы прямыми линиями, то образуется пространственная решетка, аналогичная представленной модели. В каждой пространственной решетке можно выделить некоторые повторяющиеся элементы ее структуры, иначе говоря, элементарную ячейку. К наиболее простым элементарным ячейкам относятся куб, объемно-центрированный куб, гранецентрированный куб, гексагональная призма. Основы кристаллохимического анализа, т.е. способа определения химического состава вещества по форме его кристаллов (по значению угла между гранями),разработал выдающийся русский ученый Е. С. Федоров (1853-1919). Он внес большой вклад в развитие науки о кристаллах – кристаллографии. Федоров доказал, что может существовать только 230 различных форм кристаллов, все из которых на сегодняшний день известны.

Для наглядного представления внутренней структуры кристалла используют его изображение с помощью кристаллической решётки. Различают несколько типов кристаллов, которые определяются характером взаимодействия атомов и молекул, образующих кристалл:

1. ионные
2. атомные

3. металлические
4. молекулярные

Этот материал вы довольно подробно изучали в курсе химии 8 класса, поэтому мы только вспомним, как образуются эти кристаллы.

Ионные кристаллы. В узлах решетки находятся положительно и отрицательно заряженные ионы. Эти кристаллы обладают значительной прочностью. К их числу относится большинство неорганических соединений, например соли.

Атомные кристаллы. Кристаллические решетки образуются путем плотной упаковки атомов, чаще всего одинаковых (при взаимодействии одинаковых атомов ионы не образуются). Эти вещества наиболее прочны, отличаются большой прочностью и тугоплавкостью. Типичные примеры таких кристаллов – алмаз, графит, германий.

Молекулярные кристаллы. В узлах решетки находятся молекулы вещества, связь между которыми обеспечивается силами молекулярного взаимодействия. Эти кристаллы наименее прочны, плавятся при очень низкой температуре (твердые гелий, водород, азот), легко испаряются (нафталин).

Металлические кристаллы. Во всех узлах решетки расположены положительные ионы металла. Наличие свободных электронов в металле обеспечивает хорошую электропроводность и теплопроводность этих веществ.

Дефекты кристаллов

Все сказанное выше о строении кристаллов, строго говоря, относится только так говоря к идеальным кристаллам. Всякий же реальный кристалл не имеет совершенной структуры и обладает рядом нарушений пространственной решетки, которые называются дефектами в кристалле. В частности, в реальных кристаллах часть узлов решетки может оказаться не занятой частицами, заполненной чужеродными атомами или ионами или чужеродные атомы могут внедриться где-то между узлами решетки. Из-за этого нарушается дальний порядок в упаковке атомов или других частиц кристалла.

Тело, представляющее собой один кристалл, называется ***монокристаллом.*** (Кварц, алмаз)

Большинство кристаллических тел состоит из множества расположенных беспорядочно мелких кристаллов, которые срослись между собой. Такие тела называются ***поликристаллами.*** (Металлы, сахар, поваренная соль)

Размеры кристаллов поликристаллического типа могут меняться с течением времени. Мелкие кристаллы железа переходят в крупные, этот процесс ускоряется при ударах и сотрясениях, он происходит в стальных мостах, железнодорожных рельсах, от этого прочность сооружения с течением времени уменьшается.

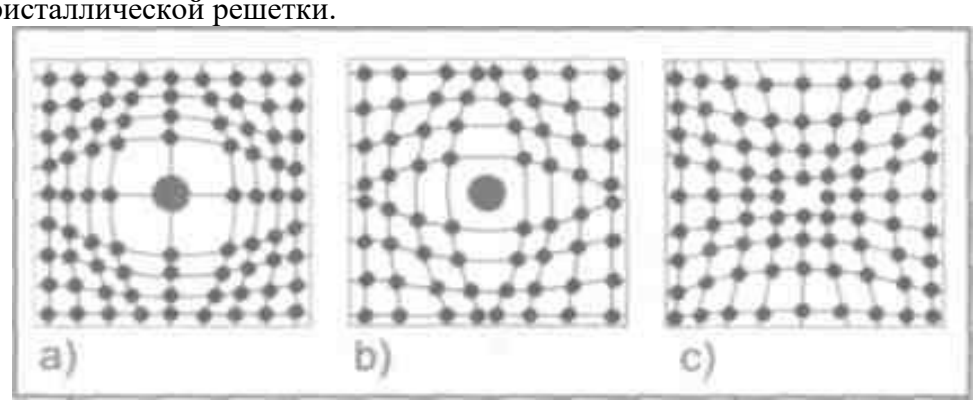
Очень многие тела одинакового химического состава в кристаллическом состоянии в зависимости от условий могут существовать в двух или более разновидностях. Это свойство называется ***полиморфизмом.*** У льда известно до десяти модификаций. Полиморфизм углерода – графит и алмаз. Между алмазом и графитом оказывается много общего, хотя на первый взгляд это общее трудно увидеть. Алмаз необычно тверд, прозрачен, не проводит электрический ток (диэлектрик), обработанные алмазы – драгоценность, известны в быту как бриллианты.

Графит мягок, легко расслаивается, непрозрачен, электропроводен и не похож на драгоценный камень. А между тем и алмаз, и графит – это чистый углерод. Различие свойств алмаза и графита связано только с различием кристаллических решеток. При определенных условиях возможен переход вещества из одной кристаллической модификации в другую. Если нагреть графит до температуры 2000—2500 К под давлением 10^9 Па, то произойдет перестройка кристаллической решетки, в результате чего графит превратится в алмаз. Так получают искусственные алмазы.

Частицы, составляющие кристалл, расположены в определенном порядке и на определенном расстоянии друг от друга. Совокупность узлов, т.е. точек, совпадающих с

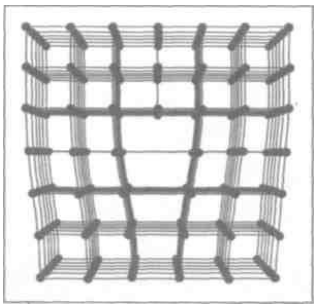
центрами атомов или молекул, составляющих кристалл, называют кристаллической решеткой данного кристалла. Многие каркасы зданий и мостов, транспортные средства, линии электропередач и так далее сделаны из металлов, имеющих кристаллическую структуру. Поэтому большой практический интерес представляют вопросы прочности кристаллических тел. Как выяснилось, реальная прочность кристаллов во много раз меньше расчетной из-за наличия внутренних и поверхностных дефектов в кристаллической решетке. О механических свойствах твердых тел подробнее можно прочесть в главе, посвященной механике твердого тела

Точечные дефекты возникают при замещении собственного атома чужеродным, внедрении атома в пространство между узлами решетки или при отсутствии атома в одном из узлов кристаллической решетки.



Примеры точечных дефектов: a) замещение собственного атома чужеродным, b) внедрение атома в пространство между узлами кристаллической решетки, c) отсутствие атома в одном из узлов кристаллической решетки.

Линейные дефекты возникают при нарушении в порядке расположения атомных плоскостей в кристаллах.



Пример линейного дефекта в кристаллической решетке

Аморфные тела

Аморфные тела **–** это твёрдые тела, где сохраняется только ближний порядок в расположении атомов. (Кремнезём, смола, стекло, канифоль, сахарный леденец).

Аморфные тела изотропны. Признаком аморфного тела является неправильная форма поверхности при изломе. Аморфные тела после длительного промежутка времени все же теряют свою форму под действием силы тяжести. При повышении температуры это происходит быстрее. Аморфное состояние неустойчиво, происходит переход в кристаллическое (стекло мутнеет). Беспорядок в расположении атомов аморфных тел приводит к тому, что среднее расстояние между атомами по разным направлениям одинаково, поэтому они изотропны. Сходство с жидкостями объясняется тем, что атомы и молекулы аморфных тел, подобно молекулам жидкости, имеют время «оседлой жизни» определенной температуры плавления нет, поэтому аморфные тела можно рассматривать как переохлажденные жидкости с очень большой вязкостью. Отсутствие дальнего порядка в расположении атомов приводит к тому, что вещество в аморфном состоянии имеет меньшую плотность, чем в кристаллическом.

Виды деформации твердых тел.

Деформация растяжения

Деформация растяжения – вид деформации, при которой нагрузка прикладывается продольно от тела, то есть параллельно точкам крепления тела.

Схема растяжения образца



Деформация растяжения является одним из основных лабораторных исследований физических свойств материалов. В ходе приложения растягивающих напряжений определяются величины, при которых материал способен:

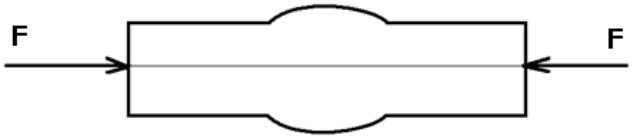
1. воспринимать нагрузки с дальнейшим восстановлением первоначального состояния (упругая деформация)
2. воспринимать нагрузки без восстановления первоначального состояния (пластическая деформация)
3. разрушаться на пределе прочности

Данные испытания являются главными для всех тросов и веревок, которые используются для строповки, крепления грузов, альпинизма. Растяжение имеет значение также при строительстве сложных подвесных систем со свободными рабочими элементами.

Деформация сжатия

Деформация сжатия – вид деформации, аналогичный растяжению, с одним отличием в способе приложения нагрузки, ее прикладывают соосно, но по направлению к телу. Сдавливание объекта с двух сторон приводит к уменьшению его длины и одновременному упрочнению, приложение больших нагрузок образовывает в теле материала утолщения типа «бочка».

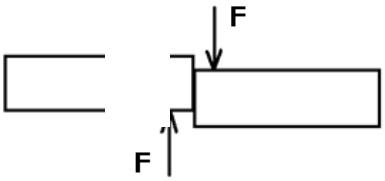
Схема сжатия образца



В качестве примера можно привести тот же прибор что и в деформации растяжения немного выше. Сжатие также важно при строительстве зданий, все элементы конструкции фундамента, свай и стен испытывают давящие нагрузки. Правильный расчет несущих конструкций здания позволяет сократить расход материалов без потери прочности.

Деформация сдвига

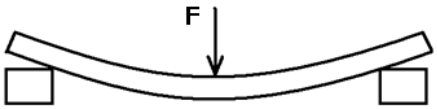
Деформация сдвига – вид деформации, при котором нагрузка прикладывается параллельно основанию тела. В ходе деформации сдвига одна плоскость тела смещается в пространстве относительно другой. На предельные нагрузки сдвига испытываются все крепежные элементы – болты, шурупы, гвозди. Простейший пример деформации сдвига – расшатанный стул, где за основание можно принять пол, а за плоскость приложения нагрузки – сидение.



Деформация изгиба

Деформация изгиба – вид деформации, при котором нарушается прямолинейность главной оси тела. Деформации изгиба испытывают все тела подвешенные на одной или нескольких опорах. Каждый материал способен воспринимать определенный уровень нагрузки, твердые тела в большинстве случаев способны выдерживать не только свой вес, но и заданную нагрузку. В зависимости от способа приложения нагрузки при изгибе различают чистый и косой изгиб.

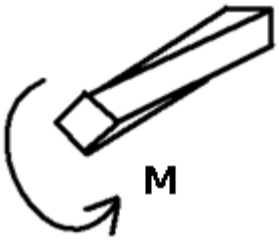
Значение деформации изгиба важно для проектирования упругих тел, таких, как мост с опорами, гимнастический брус, турник, ось автомобиля и другие.



Деформация кручения

Деформация кручения – вид деформации, при котором к телу приложен крутящий момент, вызванный парой сил, действующих в перпендикулярной плоскости оси тела. На кручение работают валы машин, шнеки буровых установок и пружины.

Пластическая и упругая деформация



В процессе деформации важное значение имеет величина межатомных связей, приложение нагрузки достаточной для их разыва приводит к необратимым последствиям (необратимая или **пластическая деформация**). Если нагрузка не превысила допустимых значений, то тело может вернуться в исходное состояние (**упругая деформация**).

Простейший пример поведения предметов, подверженных пластической и упругой деформацией, можно проследить на падении с высоты резинового мяча и куска пластилина. Резиновый мяч обладает упругостью, поэтому при падении он сожмется, а после превращения энергии движения в тепловую и потенциальную, снова примет первоначальную форму. Пластилин обладает большой пластичностью, поэтому при ударе о поверхность оно необратимо утратит свою первоначальную форму.

Упругость.

Упругость – свойство материала деформироваться под нагрузкой и после снятия ее принимать первоначальную форму и размеры. Наибольшее напряжение, при котором еще не наблюдается пластическая (остаточная) деформация, т. е. материал продолжает сохранять упругость, называется пределом упругости. К упругим материалам относятся резина, сталь, древесина.

Пластичность.

Пластичность (от греческого пластикос – годный для лепки, податливый, пластичный) – свойство материала под действием нагрузки изменять (без разрушения) форму и размеры и сохранять их в измененном виде после ее снятия. Пластичность, характеризующаяся остаточной деформацией – свойство, противоположное упругости, которой соответствует упругая деформация. Пластичными материалами являются, например, глиняное тесто и нагретый битум.

Хрупкость.

Хрупкость – свойство материала мгновенно разрушаться под действием внешних сил без заметной пластической деформации. К хрупким материалам относятся природный камень, в том числе облицовочный, а также чугун, стекло, бетон, керамические материалы и т. п.

Механическое напряжение

В деформированном твердом теле, вследствие смещения частиц в кристаллической решетке относительно друг друга, возникают внутренние силы, которые создают в материале напряжение.

Механическим напряжением *называется величина, характеризующая действие внутренних сил в деформированном твердом теле. Механическое напряжение измеряется внутренней силой, действующей на единицу площади сечения деформированного тела:*

$$\sigma = \frac{F}{S}.$$

Выведем единицу измерения напряжения *А:*

$$\sigma = \frac{F}{S}; \quad \sigma = \frac{1\ \text{Н}}{1\ \text{м}^2} = 1\ \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

В системе СИ за единицу s принимается такое механическое напряжение в материале, при котором на площадь сечения в 1 м^2 действует внутренняя сила в 1 Н.

Отметим, что все изложенное верно, если напряжение во всех точках сечения одинаково.

Если внутренняя сила действует перпендикулярно сечению, то напряжение называется нормальным sн (например, при деформации продольного растяжения). Если же эта сила действует параллельно сечению, то напряжение называют касательным sк (например, при деформации сдвига).

Упругость, пластичность, хрупкость и твердость

Свойство деформированных твердых тел принимать свою первоначальную форму и свой объем после прекращения действия внешних сил называется упругостью. *Деформация тела, которая исчезает после снятия внешних нагрузок на это тело, называется упругой деформацией.* Поскольку упруго деформированное тело стремится вернуть свою форму и свой объем, оно действует на тела, вызвавшие его деформацию, с некоторой силой, которую называют ***Силой упругости*.**

Внутренние силы, возникающие в материале при деформации, тоже называют силами упругости.

Опыт показывает, что тело можно деформировать настолько, что оно не восстановит свою прежнюю форму, когда внешние воздействия на него исчезнут.

Свойство тел сохранять деформацию после снятия внешних нагрузок называют ***Пластичностью***.

Остаточная деформация тела, которая сохраняется после снятия внешних нагрузок на тело, называется ***Пластической деформацией***.

Упругость (пластичность) тел в основном определяется материалом, из которого они сделаны. Например, сталь и резина упруги, а медь и воск пластичны. Деление материалов на упругие и пластичные условно, так как каждый материал в большинстве случаев обладает одновременно и пластичностью, и упругостью. Например, стальную пружину можно растянуть так, что она уже не сожмется. С другой стороны, медная спираль при небольших растяжениях пружинит (т. е. сжимается, если ее отпустить).

Кроме того; свойства материала сильно зависят от внешних условий. Например, обычно пластичный свинец при низких температурах становится упругим, а упругая сталь при очень больших давлениях и высоких температурах становится пластичной. Опыт показывает, что при постепенном увеличении нагрузок на материал в теле сначала возникают упругие деформации, а затем появляются пластические деформации.

Важными механическими свойствами материалов, которые приходится учитывать в машиностроении, являются хрупкость и твердость.

На практике встречаются материалы, которые при относительно небольших нагрузках упруго деформируются, а при увеличении внешней нагрузки разрушаются прежде, чем у них появится остаточная деформация. Такие материалы называются хрупкими (например, стекло, кирпич). Хрупкие материалы очень чувствительны к ударной нагрузке. При резком ударе хрупкие тела сравнительно легко разрушаются. Твердость материала можно определить различными способами. Обычно более твердым считают тот материал, который оставляет царапины на поверхности другого материала. Опыт показал, что наиболее твердым материалом является алмаз. В настоящее время твердость материала определяют вдавливанием в его поверхность алмазного конуса или стального шара (рис. 13.20). Чем меньше войдет конус в материал при определенной силе вдавливания, тем тверже этот материал.

Твердость материала существенно влияет на величину трения качения. Например, шариковые подшипники делают из твердой стали, так как при этом трение в них получается очень маленьким. Оказывается, твердость материала связана с его прочностью: чем тверже

материал, тем он прочнее. Таким образом, определение твердости материала имеет существенное практическое значение.



Рис. 13.20. Определение твердости материала.

Закон Гука. Модуль упругости.

Устройство динамометров – приборов для определения сил, основано на том, что упругая деформация прямо пропорциональна силе, вызывающей эту деформацию.

Связь между упругими деформациями и внутренними силами в материале впервые была установлена английским ученым Р. Гуком.

В настоящее время закон Гука формулируется следующим образом:

Механическое напряжение в упруго деформированном теле прямо пропорционально относительной деформации этого тела:‘

$$\sigma = k\varepsilon.$$

Величина k, характеризующая зависимость механического напряжения в материале от рода последнего и от внешних условий, называется *Модулем упругости*. Модуль упругости измеряется механическим напряжением, которое возникает в материале при относительной упругой деформации, равной единице.

Единицей измерения модуля упругости в системе СИ является 1 $Н/м^2$.

Относительную упругую деформацию обычно выражают числом, много меньшим единицы. За редким исключением, получить e, равное единице, практически невозможно, так как материал задолго до этого разрушается. Однако модуль упругости можно найти из опыта по известному напряжению s и при малом e, так как *K* в. формуле – величина постоянная.

В качестве примера рассмотрим применение закона Гука к деформации одностороннего растяжения или сжатия. Формула для этого случая принимает вид

$$\sigma_н = E\frac{\Delta l}{l},$$

где *E* – обозначает модуль упругости для этого вида деформации;
его называют модулем Юнга. Модуль Юнга измеряется нормальным напряжением, которое должно возникнуть в материале при относительной деформации равной единице, т. е, при увеличении длины образца вдвое ($\Delta L=L$). Отметим, что численное значение модуля Юнга определяют по результатам опытов, проведенных в пределах упругой деформации, и при расчетах берут из таблиц. Поскольку $\delta_h=F/S$, получаем: $,F/S=E\Delta L/L$, откуда

$$\Delta l = \frac{Fl}{ES}.$$

Здесь за *F* можно принимать внешнюю силу, которая изменяет, длину тела на ΔL при поперечном сечении тела S.

Наибольшее напряжение в материале, после исчезновения которого форма и объем тела восстанавливаются, называется пределом упругости. Формулы справедливы, пока не перейден предел упругости. При достижении предела упругости в теле возникают пластические деформации. В этом случае может наступить момент, когда при одной и той же нагрузке деформация начнет возрастать и материал разрушается. Нагрузку, при которой в материале возникает наибольшее возможное механическое напряжение, называют разрушающей.

При постройке машин и сооружений всегда создают запас прочности. *Запасом прочности* называется величина, показывающая, во сколько раз разрушающая нагрузка в самом напряженном месте конструкции больше, чем фактическая максимальная нагрузка.

Плавление. **Кристаллизация.**

Плавление – процесс перехода из твердого состояния в жидкое. Этот процесс происходит при постоянной температуре.

Температура, при которой происходит плавление вещества, называется температурой плавления и является измеренной величиной для многих твердых веществ, а потому табличной величиной. Например, температура плавления льда равна 0^oC, а температура плавления золота 1100^oC.

Обратный плавлению процесс – процесс **кристаллизации** – также удобно рассматривать на примере замерзания воды и превращения ее в лед. Если взять пробирку с водой и начать ее охлаждать, то сначала будет наблюдаться уменьшение температуры воды, пока она не достигнет 0^oC, а затем ее замерзание при постоянной температуре, и уже после полного замерзания дальнейшее охлаждение образовавшегося льда.

Сублимация. Десублимация.

Возгонкой, или сублимацией, называют процесс перехода твердой фазы в парообразное состояние без плавления, а десублимацией -процесс кристаллизации твердой фазы из пара, минуя жидкое состояние.

Возгонка вещества в обычных условиях происходит только тогда, когда давление, отвечающее тройной точке вещества выше атмосферного. Возгонку применяют для дополнительной очистки небольших количеств вещества от малолетучих примесей или малолетучего вещества от легколетучих примесей. Важным преимуществом возгонки по сравнению с кристаллизацией того же вещества из раствора является исключение из процесса очистки растворителя, который часто должен быть очень чистым.

Вопросы для закрепления:

1. Какие кристаллы, отличаются наибольшей прочностью?
2. Как называется свойство кристаллов расширятся в разных направлениях по разному?
3. Что влияет на физические свойства кристаллов ?
4. Какие кристаллы практически не растворимы?
5. Перечислить основные свойства твердых тел?
6. Какая деформация учитывается при при строительстве сложных подвесных систем?
7. Какая величина характеризует действие внутренних сил в деформированном твердом теле?
8. Как называется величина определяемая наибольшее напряжение в материале, после исчезновения которого форма и объем тела восстанавливаются?
9. Почему процессы плавления и кристаллизации происходят при постоянной температуре?
10. В чем преимущество возгонки по сравнению с кристаллизацией?

18. Фазы вещества на земле и в космосе. Процессы: плавления, кристаллизации, кипения, конденсации.

Любое вещество при определенных условиях может находиться в различных агрегатных состояниях – твердом, жидком и газообразном. Переход из одного состояния в другое называется ***фазовым переходом***.

Агрегатные и фазовые превращения веществ являются наиболее распространенными явлениями в природе. Всего же в различных литературных источниках называют более двух десятков термодинамических состояний вещества, которые переходят из одного состояния в другое, не изменяя химического состава.

Приведём одну из известных классификаций. Твёрдое тело: аморфное (стеклообразное) состояние, кристаллы (монокристалл, поликристалл, кристаллит), сверхтекучее твёрдое тело. Мезофазное состояние: жидкий кристалл (нематик, смектик, холестерик), мезоген, колончатая фаза, клеточная мембрана. Жидкость: расплав, перегретая жидкость, переохлаждённая жидкость, растянутая жидкость, сверхкритическая жидкость, сверхтекучая жидкость. Газообразное состояние: идеальный газ, реальный газ, пар, насыщенный пар, перегретый пар, пересыщенный пар. Плазменное состояние.

Принято считать, что в основе переходов из одного состояния в другое лежит температура вещества, количество подведенного тепла и в конечном итоге тепловая скорость частиц (атомов, молекул), из которых состоит вещество. И это действительно так. Вопрос не требовал бы дополнительного рассмотрения, если с подводом (отводом) тепла наблюдалось плавное, монотонное изменение свойств вещества. Фактически в большинстве случаев при нагреве твёрдого тела в результате агрегатного (фазового) перехода происходит плавление, а нагреве жидкости – её кипение. Это указывает на сложность явления перехода. Объяснение его механизма помимо теплопередачи требует привлечения других физических закономерностей.

Наиболее сложно дело обстоит с фазовыми переходами 2-го рода. Их чётко зафиксированное количество сравнительно невелико: переход ферромагнитных веществ (железа, никеля) при определенных давлении и температуре в парамагнитное состояние; переход металлов и некоторых сплавов при температуре, близкой к 0 К в сверхпроводящее состояние, характеризуемое скачкообразным уменьшением электрического сопротивления до нуля; превращение обыкновенного жидкого гелия (гелия I) при T -2,9 К в другую жидкую модификацию (гелий II), обладающую свойствами сверхтекучести. Интуиция подсказывает, что фазовые переходы второго рода имеют универсальный всеобщий характер и присущи всем веществам, но с конкретными особенностями проявления для каждого вещества.

Утверждается, что фазовые переходы второго рода не связанны с поглощением или выделением теплоты и изменением объёма. Эти переходы характеризуются постоянством объёма и энтропии, но скачкообразным изменением теплоёмкости. Их трактовка предложена ***Л. Д. Ландау***. Согласно этой трактовке, фазовые переходы второго рода связаны с изменением симметрии. Выше точки перехода система, как правило, обладает более высокой симметрией, чем ниже точки перехода. В настоящее время принято говорить не об изменении симметрии, но о появлении в точке перехода параметра порядка, равного нулю в менее упорядоченной фазе и изменяющегося от нуля (в точке перехода) до ненулевых значений в более упорядоченной фазе.

Как видно из приведенных примеров фазовых переходов 2-го рода, все они совершаются при очень низких температурах, где тепловые эффекты крайне малы и с трудом обнаруживаются экспериментально. Тем не менее, исходя из закона сохранения энергии, трудно представить процесс изменения состояния вещества без выделения или поглощения энергии. Правда, такая возможность появляется, если в выражении термодинамического потенциала вместо термодинамического значения энтропии вводится её вероятностное значение, что, видимо, и было сделано.

Возможен новый подход к проблеме агрегатных и фазовых переходов, если в основу взять предположение о том, что частицы вещества (атомы, молекулы) взаимодействуют между собой своими массами по обратно квадратичному закону тяготения. Поэтому во всех состояниях они находятся в орбитальном движении относительно друг друга. В этом случае агрегатные и фазовые переходы увязываются с характером орбитального движения, изменениями орбит, по которым движутся частицы. Например, переход от реального газа (перегретого пара) к насыщенному состоянию означает изменение орбиты с гиперболической к параболической. Переход к жидкому состоянию вызван сменой разомкнутой параболической орбиты на замкнутую эллиптическую и круговую орбиту. В

том и другом случае мы имеем дело с изменением агрегатного состояния, которое совпадает с фазовым переходом 1-го рода.

Переход от жидкого состояния к твердому, следуя принятой логике, происходит при изменении орбитального движения частиц с кругового на эллиптическое по траектории эллипса, вписанного в круговую орбиту. Наконец, при охлаждении твёрдого тела и, соответственно, снижения энергии орбиты, по которой осуществляется орбитальное движение в твёрдом теле, орбита при очень низких температурах неминуемо из-за потери энергии снова превращается в круговую, но с меньшим радиусом по сравнению с предыдущей круговой орбитой.

В этой статье обосновывается предположение, что это последнее превращение соответствует фазовому переходу 2-го рода. То есть фазовый перехода 2-го рода есть фазовый переход в твёрдом теле, обусловленный изменением эллиптической орбиты на круговую орбиту при охлаждении твёрдого тела до определённой температуры – температуры фазового перехода 2-го рода данного вещества.

При орбитальном движении определяющим параметром является расстояние между взаимодействующими частицами в системе. Для заданных масс гравитирующих частиц оно определяет орбитальную скорость и вид орбиты и, следовательно, тип агрегатного состояния. Таким образом, расстояние между частицами может служить однозначным критерием и признаком того или иного агрегатного состояния. Правда, эта однозначность нарушается, когда в действие вступает параметр ориентации взаимодействующих частиц. Это имеет место при отклонении формы частиц от шарообразной. Например, при кристаллизации расстояние между частицами, предписываемое закономерностями орбитального движения, нарушается вследствие образования сильных межмолекулярных связей, действующих асимметрично. Типичным примером здесь является агрегатный переход «вода-лёд». Он же фазовый переход 1-го рода.

Существует смешение понятий, и даже недопонимание различий между агрегатными и фазовыми переходами. В свете изложенных выше соображений представляется логичным связать явление агрегатного перехода с изменением расстояния между частицами, то есть с типом орбит в орбитальном взаимодействии. А явление фазовый переход – с разной ориентацией молекул во время фазового перехода, но в пределах одного типа орбитального взаимодействия.

В этом случае становится понятным возникновение нескольких фазовых состояний вещества, находящегося в одном и том же агрегатном состоянии, например, в твёрдом, или жидкокристаллическом. В целом «орбитальный» подход к проблеме агрегатных и фазовых переходов, как будет показано ниже, позволяет дать исчерпывающую характеристику фазовым переходам 1-го и 2-го рода и установить их место в общей цепи (картине) агрегатных и фазовых переходов.

С целью более объективного применения постулированного выше «орбитального подхода» к рассмотрению агрегатных состояний веществ рассмотрим некоторые закономерности динамики орбитального движения в астрономии, где оно изучено наиболее детально и имеет богатые традиции.

Испарение и **конденсация** являются примерами фазовых переходов.

Все **реальные газы** (кислород, азот, водород и т.д.) при определенных условиях способны превращаться в жидкость. Однако такое превращение может происходить только при температурах ниже определенной, так называемой ***критической температуры*** $T_{кр}$. Например, для воды критическая температура равна 647,3 К, для азота 126 К, для кислорода 154,3 К. При комнатной температуре (≈ 300 К) вода может находиться и в жидком, и в газообразном состояниях, а азот и кислород существуют только в виде газов.

Парообразование – процесс превращения жидкости в пар.

Конденсация – процесс превращения пара в жидкость.

Испарение – процесс парообразования с поверхности жидкости или твердого тела. Заключается в вылетании частиц (молекул, атомов), $\overline{E_к}$ которых превышает потенциальную энергию их связи с остальными частицами вещества. Скорость испарения зависит от:

1. площади поверхности жидкости.
2. температуры (увеличивается), хотя происходит при любой температуре Температура жидкости уменьшается.
3. движения молекул над поверхностью жидкости или газа, рода вещества.

Любое вещество при определенных условиях может находиться в различных агрегатных состояниях – твердом, жидком и газообразном. Переход из одного состояния в другое называется ***фазовым переходом***.

В закрытом сосуде жидкость и ее пар могут находиться в состоянии **динамического равновесия**, когда число молекул, вылетающих из жидкости, равно числу молекул, возвращающихся в жидкость из пара, т.е. когда скорости процессов испарения и конденсации одинаковы. Такую систему называют ***двухфазной***. Пар, находящийся в равновесии со своей жидкостью, называют **насыщенным**.

Кипение – процесс активного парообразования во всем объеме жидкости. Сопровождается образованием и ростом пузырьков пара внутри жидкости. Пузырьки образуются около центров парообразования (примеси, микротрещины).

Кипение происходит:

1. во всем объеме,
2. при постоянной температуре (температура кипения). Поэтому требует постоянного притока тепла.

Температура кипения определяется

1. свойствами жидкости (таблица температур кипения).
2. внешними условиями (давлением).

Условие роста пузырьков: $\mathbf{p_{пара} > p_{атм} + rgh}$ – следовательно, с понижением атмосферного давления температура кипения понижается.

Условие подъема пузырька: $\mathbf{F_{Apx} = mg.}$

На границе раздела пар-жидкость фазовый переход при кипении осуществляется путем ***испарения***. Пузырьки растут вследствие испарения в них жидкости, всплывают, и содержащийся в них насыщенный пар переходит в паровую фазу над жидкостью.

Кипение – одно из фундаментальных физических явлений, используемое во многих процессах химической технологии. Особенность последних состоит в широком применении растворов и смесей различных веществ в качестве рабочих тел.

С понижением давления уменьшается плотность пара, возрастает минимальный радиус образования зародышей, поверхность нагрева обедняется центрами генерации паровых пузырей. Это приводит к нестабильному кипение, при котором происходит конвективное движение перегретой жидкости, сменяемое бурным вскипанием, инициированным одной или несколькими микровпадинами подходящего радиуса. С понижением температуры при вскипании жидкости эти микровпадины "выключаются", и снова повторяется цикл перегрева движущейся конвективно жидкости.

Вопросы для закрепления:

1. Что такое фазовый переход?
2. Что, как принято считать, лежит в основе фазовых переходов?
3. Каковы особенности агрегатных и фазовых переходов с точки зрения взаимодействия частиц (атомов, молекул) вещества между собой?
4. Объясните процессы парообразования и конденсации
5. В чем различие между испарением и кипением?

Раздел 3. Электрические явления

19. Электризация тел и ее виды. Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона.

Электрический заряд и элементарные частицы. Заряженные тела. Электризация тел.

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


Рис. 14.1

Все 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 в огромное число раз превосходит силу тяготения. Так, в атоме водорода, изображенном схематически на рисунке 14.1, электрон притягивается к ядру (протону) с силой, в 10^{39} 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.

Взаимодействия между заряженными частицами носят название **электромагнитных**.

Наличие электрического заряда у электрона и других частиц означает лишь существование определенных силовых взаимодействий между ними. Но 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 нисколько бы не изменился.

Элементарный заряд. Кроме электронов и протонов, есть еще 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.

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. Это можно сделать с помощью трения. Если провести расческой по сухим волосам, то небольшая часть самых подвижных заряженных частиц – электронов перейдет с волос на расческу и зарядит ее отрицательно, а волосы зарядятся положительно.

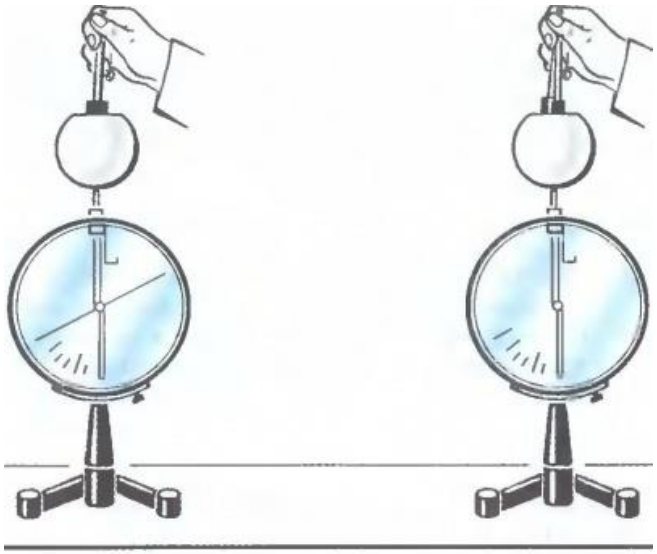


Рис. 14.2

Равенство зарядов при электризации.

С помощью опыта можно доказать, что при электризации трением оба тела приобретают заряды, противоположные по знаку, но одинаковые по модулю.

Возьмем электрометр, на стержне которого укреплена металлическая сфера с отверстием, и две пластины на длинных рукоятках: одна из эбонита, а другая из плексигласа. При трении друг о друга пластины электризуются. Внесем одну из пластин внутрь сферы, не касаясь ее стенок. Если пластина заряжена положительно, то часть электронов со стрелки и стержня электрометра притянется к пластине и соберется на внутренней поверхности сферы. Стрелка при этом зарядится положительно и оттолкнется от стержня (*рис.14.2, а*).

Если внести внутрь сферы другую пластину, вынув предварительно первую, то электроны сферы и стержня будут отталкиваться от пластины и соберутся в избытке на стрелке. Это вызовет отклонение стрелки от стержня, причем на тот же угол, что и в первом опыте. Опустив обе пластины внутрь сферы, мы вообще не обнаружим отклонения стрелки (*рис.14.2, б*). Это доказывает, что заряды пластин равны по модулю и противоположны по знаку. Именно заряд, а не число заряженных частиц.

Опыт с электризацией пластин доказывает, что при электризации трением происходит перераспределение имеющихся зарядов между телами, нейтральными в первый момент. Небольшая часть электронов переходит с одного тела на другое. При этом новые частицы не возникают, а существовавшие ранее не исчезают.

Закон сохранения заряда.

При электризации тел выполняется ***закон сохранения электрического заряда***. Этот закон справедлив для системы, в которую не входят извне и из которой не выходят наружу заряженные частицы, т. е. для *изолированной системы*. ***В изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех частиц сохраняется***. Если заряды частиц обозначить через q_1, q_2 и т. д., то

$$q_1 + q_2 + q_3 + \ldots + q_n = \text{const.} \qquad (14.1)$$

Закон сохранения заряда имеет глубокий смысл. Если число заряженных элементарных частиц не меняется, то выполнение закона сохранения заряда очевидно. Но элементарные частицы могут превращаться друг в друга, рождаться и исчезать, давая жизнь новым частицам. Однако во всех случаях заряженные частицы рождаются только парами с одинаковыми по модулю и противоположными по знаку зарядами; исчезают заряженные

частицы тоже только парами, превращаясь в нейтральные. И во всех этих случаях алгебраическая сумма зарядов остается одной и той же.

Единица электрического заряда

Введена новая физическая величина – электрический заряд. Создать макроскопический эталон единицы электрического заряда, подобный эталону массы – килограмму, невозможно из-за утечки заряда. Естественно было бы за единицу принять заряд электрона, что и сделано в атомной физике, но этот заряд слишком мал, и поэтому пользоваться им в качестве единицы заряда не всегда удобно.

Единица заряда – кулон. В Международной системе единиц (СИ) единица заряда является не основной, а производной и эталон для нее не вводится. Наряду с метром, секундой и килограммом в СИ введена основная единица для электрических величин – единица силы тока – *ампер*. Эталонное значение ампера устанавливается с помощью магнитных взаимодействий токов.

Единицу заряда в СИ – кулон устанавливают с помощью единицы силы тока. *Один кулон* (1 Кл) – *это заряд, проходящий за* 1 с *через поперечное сечение проводника при силе тока* 1 А.

Коэффициент k в законе Кулона при записи его в единицах СИ выражается в Н•м^2/Кл^2, так как согласно формуле (14.2) имеем

$$k = \frac{Fr^2}{|q_1||q_2|}, \qquad (14.3)$$

где сила взаимодействия зарядов выражается в ньютонах, расстояние – в метрах, заряд – в кулонах. Числовое значение этого коэффициента можно определить экспериментально. Для этого надо измерить силу взаимодействия F между двумя известными зарядами $|q_1|$ и $|q_2|$, находящимися на заданном расстоянии r, и эти значения подставить в формулу (14.3). Полученное значение к будет равно:

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2. \qquad (14.4)$$

Заряд в 1 Кл очень велик. Сила взаимодействия двух точечных зарядов, по 1 Кл каждый, расположенных на расстоянии 1 км друг от друга, чуть меньше силы, с которой земной шар притягивает груз массой 1 т. Поэтому сообщить небольшому телу (размером порядка нескольких метров) заряд в 1 Кл невозможно.

Минимальный заряд, существующий в природе, - это заряд элементарных частиц. В единицах СИ модуль этого заряда равен:

$$\boxed{e = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}} \qquad (14.5)$$

Заряд, который можно сообщить телу, всегда кратен минимальному заряду:

$$q = \pm N \mid e \mid,$$

где N – целое число. Когда заряд тела существенно больше по модулю минимального заряда, то проверять кратность не имеет смысла, однако когда речь идет о заряде частиц ядер атомов, то заряд их должен быть всегда равен целому числу модулей заряда электрона.

В СИ единица заряда – кулон устанавливается с помощью единицы силы тока – ампер. Элементарный электрический заряд e = 1,6•10^{19} Кл.

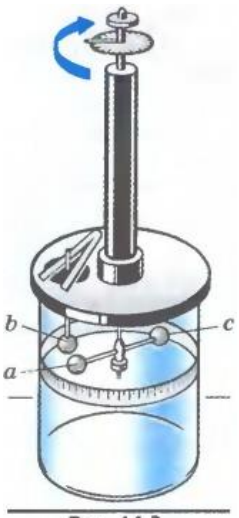


Рис. 14.3

Основной закон электростатики – закон 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. В таком случае заряженные тела считают **точечными зарядами**. Вспомните, что и закон всемирного тяготения

тоже сформулирован для тел, которые можно считать материальными точками.

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 закреплен маленький металлический шарик *a*, а на другом – противовес *c*. Еще один металлический шарик *b* закреплен неподвижно на стержне, который, в свою очередь, крепится на крышке весов.

При сообщении шарикам одноименных зарядов они начинают отталкиваться друг от друга. Чтобы удержать их на фиксированном расстоянии, упругую проволочку нужно закрутить на некоторый угол. 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 нашел 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. ***Сила взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними***. Эту силу называют **кулоновской**.

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

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

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

Открытие закона Кулона – первый конкретный шаг в изучении свойств электрического заряда. Наличие электрического заряда у небольших тел или элементарных частиц означает, что они взаимодействуют друг с другом по закону

Вопросы для закрепления:

1. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда.
2. Приведите примеры явлений, в которых наблюдается сохранение заряда.
3. В чем сходство и различие закона всемирного тяготения и закона Кулона?
4. При каком условии заряженное тело можно считать точечным зарядом?
5. Основные положения теории близкодействия и действия на расстоянии.

20. Электрическое поле и его свойства. Напряженность электрического поля.

Идеи Фарадея. По теории действия на расстоянии (предложено Майклом Фарадеем, Джеймсом Максвеллом) один заряд непосредственно чувствует присутствие другого.

Согласно идее Фарадея электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый из них создает в окружающем пространстве **электрическое поле**. Поле одного заряда действует на другой заряд, и наоборот. По мере удаления от заряда поле ослабевает.



Рис. 14.6

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 *A* (см. рис.14.6), то сила, действующая на заряд *B*, изменится, но не в то же мгновение, а лишь спустя некоторое время:

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

где *AB* – расстояние между зарядами, а *c* – скорость распространения электромагнитных взаимодействий.

Максвелл показал, что скорость с равна скорости света в вакууме, т. е. примерно 300 000 км/с. При перемещении заряда *A* электрическое поле вокруг заряда *B* изменится спустя время *t*. Значит, между зарядами в вакууме происходит какой-то процесс, в результате которого взаимодействие между ними распространяется с конечной скоростью.

Что такое электрическое поле? Электрическое поле существует реально: его свойства можно исследовать опытным путем. 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. Поэтому о природе электрического поля мы можем сказать лишь следующее:

во-первых, **поле материально; оно существует независимо от нас, от наших знаний о нем**;

во-вторых, **поле обладает определенными свойствами, которые не позволяют спутать его с чем-либо другим в окружающем мире**.

Установление этих свойств и формирует наши представления о том, что такое электрическое поле.

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.

Основные свойства электрического поля.

Главное свойство электрического поля ***-действие его на электрические заряды с некоторой силой.*** По действию на заряд устанавливают существование поля, распределение его в пространстве, изучают все его характеристики.

Электрическое поле неподвижных зарядов называют **электростатическим**. Оно не меняется со временем. Электростатическое поле создается только электрическими зарядами. Оно существует в пространстве, окружающем эти заряды, и неразрывно с ними связано.

По мере изучения электродинамики мы будем знакомиться с новыми свойствами электрического поля. Познакомимся и с переменным во времени электрическим полем, которое уже не связано с зарядами неразрывно.

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.

Согласно теории близкодействия взаимодействие между заряженными частицами осуществляется посредством электрического поля. Электрическое поле – это особая форма материи, существующая независимо от наших представлений о нем. Доказательства реальности электрического поля - конечная скорость распространения электромагнитных взаимодействий и действие поля на заряженные тела.

Напряженность электрического поля.

Недостаточно утверждать, что электрическое поле существует. Надо ввести количественную характеристику поля. После этого электрические поля можно будет сравнивать друг с другом и продолжать изучать их свойства.

Напряженность электрического поля.

Электрическое поле обнаруживается по силам, действующим на заряд. Поэтому надо ввести такую характеристику поля, знание которой позволит определить эту силу.

Если поочередно 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 создается точечным зарядом q_1. Согласно закону Кулона (14.2) на заряд q_2 действует сила, пропорциональная заряду q_2. 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. Эту характеристику называют напряженностью электрического поля. Подобно силе, напряженность поля – *векторная величина*; ее обозначают буквой $\vec{E}$. Если помещенный в поле заряд обозначить через q вместо q_2, то напряженность будет равна:

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

Напряженность поля в данной точке равна отношению силы, с которой поле действует на точечный заряд, помещенный в эту точку, к этому заряду.

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

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

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

Напряженность поля точечного заряда.

Найдем напряженность электрического поля, создаваемого точечным зарядом q_0. По закону Кулона этот заряд будет действовать на положительный заряд q с силой, равной

$$F = k\frac{|q_0|q}{r^2}.$$

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

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

Вектор напряженности в любой точке электрического поля направлен вдоль прямой, соединяющей эту точку и заряд (*рис.14.7*) и совпадает с силой, действующей на точечный положительный заряд, помещенный в данную точку.

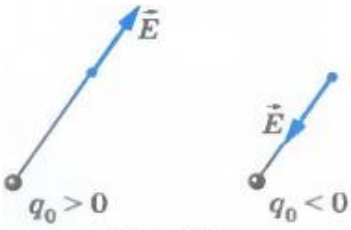


Рис. 14.7

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. Это означает, что напряженности полей складываются геометрически.

Если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают электрические поля, напряженности которых $\vec{E}_1$, $\vec{E}$, $\vec{E}_3$ ***и т. д., то результирующая напряженность поля в этой точке равна сумме напряженностей этих полей:***

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots , \quad (14.10)$$

,

причем напряженность поля, создаваемая отдельным зарядом, определяется так, как будто других зарядов, создающих поле, не существует.

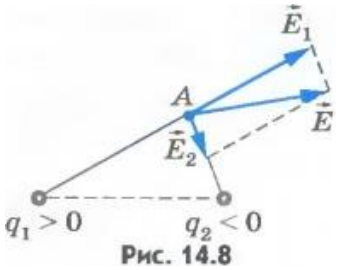


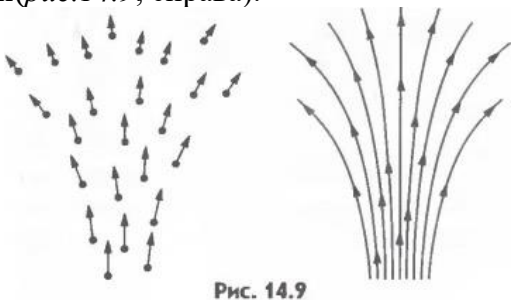
Рис. 14.8

Благодаря принципу суперпозиции для нахождения напряженности поля системы заряженных частиц в любой точке достаточно знать выражение (14.9) для напряженности поля точечного заряда. На рисунке 14.8 показано, как определяется напряженность поля $\vec{E}$ в точке *A*, созданная двумя точечными зарядами q_1 и q_2, $q_1 > q_2$

Силовые линии электрического поля. Напряженность поля заряженного шара

Электрическое поле не действует на органы чувств. Его мы не видим.

Однако мы можем получить некоторое представление о распределении поля, если нарисуем векторы напряженности поля в нескольких точках пространства (*рис.14.9*, слева). Картина будет более наглядной, если нарисовать непрерывные линии, касательные к которым в каждой точке, через которую они проходят, совпадают по направлению с векторами напряженности. Эти линии называют **силовыми линиями электрического поля или линиями напряженности**(*рис.14.9*, справа).


Рис. 14.9

Направление силовых линий позволяет определить направление вектора напряженности в различных точках поля, а густота (число линий на единицу площади) силовых линий показывает, где напряженность поля больше.

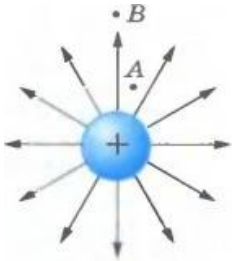


Рис. 14.10

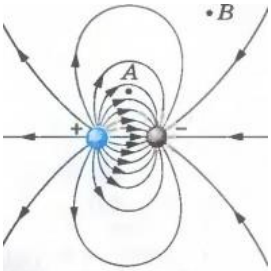


Рис. 14.11

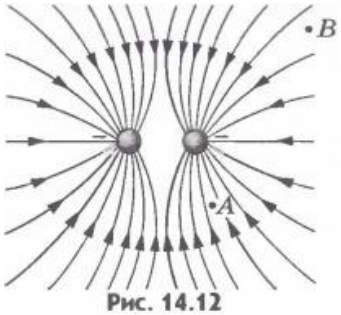


Рис. 14.12

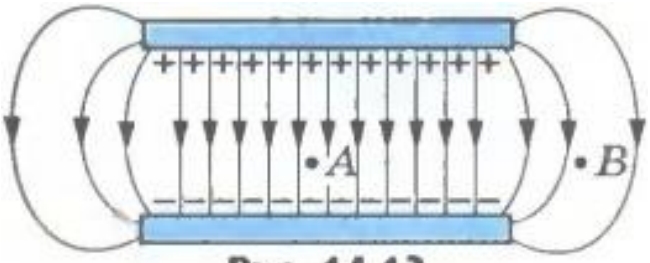


Рис. 14.13

Электрическое поле, напряженность которого одинакова во всех точках пространства, называется **однородным**. В ограниченной области пространства электрическое поле можно считать приближенно однородным, если напряженность 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 определенного направления напряженности электрического поля в данной точке.

Поле заряженного шара. Рассмотрим теперь вопрос о электрическом поле заряженного проводящего шара радиусом R. Заряд q равномерно распределен по поверхности шара. Силовые линии электрического поля, как вытекает из соображений симметрии, направлены вдоль продолжений радиусов шара (*рис.14.14, а*).

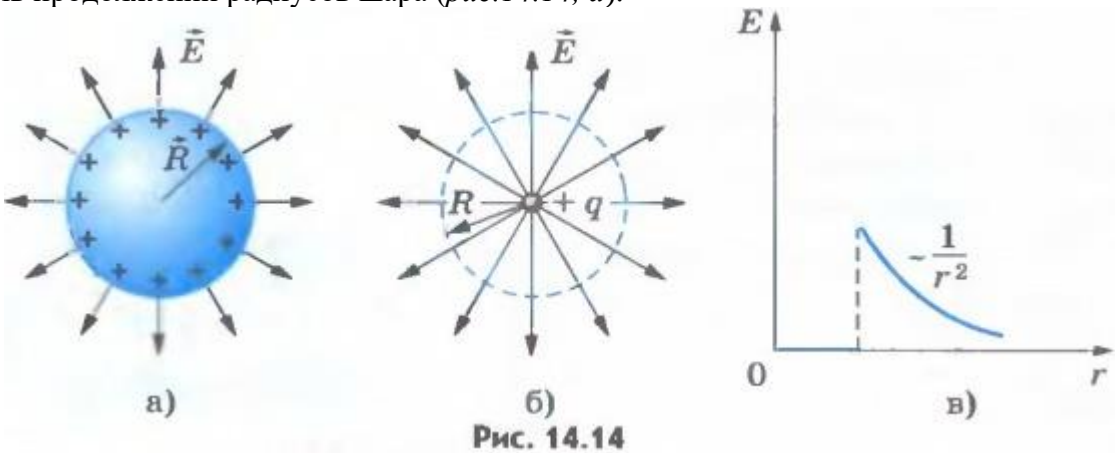


Рис. 14.14

Обратите внимание! **Силовые** линии вне шара распределены в пространстве точно так же, как и силовые линии точечного заряда (*рис.14.14, б*). Если совпадают картины силовых линий, то можно ожидать, что совпадают и напряженности полей. Поэтому на расстоянии $r>R$ от центра шара напряженность поля определяется той же формулой (14.9), что и напряженность поля точечного заряда, помещенного в центре сферы:

$$E = k\frac{|q|}{r^2}. \qquad (14.11)$$

*Внутри проводящего шара (*r<R*) напряженность поля равна нулю*. В этом мы скоро убедимся. На рисунке 14.14, в показана зависимость напряженности электрического поля заряженного проводящего шара от расстояния до его центра.

Картина силовых линий наглядно показывает, как направлена напряженность электрического поля в различных точках пространства. По изменению густоты линий можно судить об изменении модуля напряженности поля при переходе от точки к точке.

Вопросы для закрепления:

1. Что называется напряженностью электрического поля?
2. Чему равна напряженность поля точечного заряда?
3. Как направлена напряженность поля зарядаq$_0$, если $q_0>0$? если $q_0<0$?\
4. Как формулируется принцип суперпозиции полей?
5. В чем состоит отличие теории близкодействия от теории действия на расстоянии?
6. Каковы основные свойства электростатического поля?
7. Что называют силовыми линиями электрического поля?
8. Во всех ли случаях траектория заряженной частицы совпадает с силовой линией?
9. Могут ли силовые линии пересекаться?
10. Чему равна напряженность поля заряженного проводящего шара?

21. Потенциал электрического поля. Работа электрического поля. Проводники и диэлектрики в электрическом поле.

Электростатическое поле, осуществляющее взаимодействие между зарядами, характеризуют двумя величинами. ***Напряженность поля* – это *силовая характеристика*. *Энергетическая характеристика – потенциал.***

Потенциал поля. Работа любого электростатического поля при перемещении в нем 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*. Поля, обладающие таким свойством, называют **потенциальными**. Потенциальный характер, в частности, имеет электростатическое поле точечного заряда.

Работу потенциального поля можно выразить через изменение потенциальной энергии. Формула $A = -(W_{n2} - W_{n1})$ справедлива для любого электростатического поля

Потенциал. Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле пропорциональна заряду. Это справедливо как для однородного поля, так и для неоднородного. Следовательно, *отношение потенциальной энергии к заряду не зависит от помещенного в поле заряда.*

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

Согласно данному определению потенциал равен:

$$\varphi = \frac{W_n}{q}. \qquad (14.15)$$

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

Разность потенциалов.

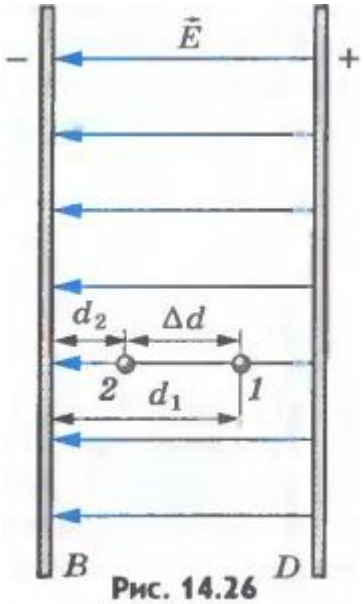


Рис. 14.26

Если в примере с двумя заряженными пластинами в качестве точки с нулевым потенциалом выбрать точку на отрицательно заряженной пластине (см. *рис.14.26*), то согласно формулам потенциал однородного поля равен:

$$\varphi = \frac{W_п}{q} = Ed. \qquad (14.16)$$

Подобно потенциальной энергии, значение потенциала в данной точке зависит от выбора нулевого уровня для отсчета потенциала, т. е. от выбора точки, потенциал которой принимается равным нулю. *Изменение потенциала* не зависит от выбора нулевого уровня отсчета потенциала.

Так как потенциальная энергия $W_п = q\varphi$, то работа сил поля равна:

$$A = -(W_{п2} - W_{п1}) = -q\,(\varphi_2 - \varphi_1) = q\,(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \quad (14.17)$$

Здесь

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 \qquad (14.18)$$

– ***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:

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

Разность потенциалов (напряжение) между двумя точками равна отношению работы поля при перемещении положительного заряда из начальной точки в конечную к величине этого заряда.

Если за нулевой уровень отсчета потенциала принять потенциал бесконечно удаленной 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. *Поэтому 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 *вольтом* (В); 1 В = 1 Дж/1 Кл.

Энергетическую характеристику электростатического поля называют потенциалом. Потенциал данной точки поля равен отношению потенциальной энергии заряда, помещенного в эту точку в поле, к заряду. Разность потенциалов между двумя точками численно равна работе сил поля по перемещению единичного заряда между этими точками.

Каждой точке электрического поля соответствуют определенные значения потенциала и напряженности. Найдем связь напряженности электрического поля с потенциалом.

Работа электрического поля.

Пусть заряд q перемещается в направлении вектора напряженности однородного электрического поля $\vec{E}$ из точки *1* в точку *2*, находящуюся на расстоянии Δd от точки *1*(*рис.14.28*). Электрическое поле совершает работу:

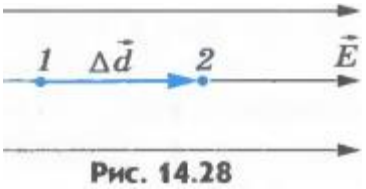


Рис. 14.28

$$A = qE\Delta d.$$

Эту работу согласно формуле (14.19) можно выразить через разность потенциалов в точках *1* и *2*:

$$A = q\,(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \qquad (14.20)$$

Приравнивая выражения для работы, найдем модуль вектора напряженности поля:

$$E = \frac{U}{\Delta d}. \qquad (14.21)$$

В этой формуле U – разность потенциалов между точками *1* и *2*, которые связаны вектором перемещения Δd, совпадающим по направлению с вектором напряженности $\vec{E}$ (см. *рис.14.28*).

Формула (14.21) показывает: чем меньше меняется потенциал на расстоянии Δd, тем меньше напряженность электростатического поля. Если потенциал не меняется совсем, то напряженность поля равна нулю.

Так как при перемещении положительного заряда в направлении вектора напряженности $\vec{E}$ электростатическое поле совершает положительную работу $A = q\,(\varphi_1 - \varphi_2)$, то потенциал φ_1 больше потенциала φ_2.

Следовательно, *напряженность электрического поля направлена в сторону убывания потенциала.*

Любое электростатическое поле в достаточно малой области пространства можно считать однородным. Поэтому формула (14.21) справедлива для произвольного электростатического поля, если только расстояние Δd настолько мало, что изменением напряженности поля на этом расстоянии можно пренебречь.

Свободные заряды.

В проводниках, к которым в первую очередь относятся металлы, имеются заряженные частицы, способные перемещаться внутри проводника под влиянием электрического поля. По этой причине заряды этих частиц называют **свободными зарядами**.

В металлах носителями свободных зарядов являются электроны. При образовании металла его нейтральные атомы начинают взаимодействовать друг с другом. Благодаря этому взаимодействию электроны внешних оболочек атомов полностью утрачивают связи со своими атомами и становятся «собственностью» всего проводника в целом. Эти свободные электроны участвуют в тепловом движении и могут перемещаться по металлу в любом направлении.

Электростатическое поле внутри проводника.

Наличие в проводнике свободных зарядов приводит к тому, что внутри проводника напряженность поля равна нулю. На примере незаряженной проводящей пластины (проводника), внесенной в однородное поле, можно выяснить, в результате какого процесса напряженность электростатического поля внутри проводника оказывается равной нулю (*рис.14.15*). Силовые линии поля изображены сплошными линиями.

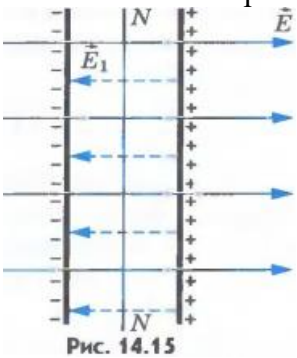


Рис. 14.15

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. 14.15). В этом состоит явление *электростатической индукции*.

Появившиеся заряды создают свое поле, которое накладывается на внешнее поле и компенсирует его. За ничтожно малое время заряды перераспределяются так, что напряженность результирующего поля внутри пластины становится равной нулю и движение зарядов прекращается.

Итак, *электростатического поля внутри проводника нет*. На этом факте основана электростатическая защита. Чтобы защитить чувствительные к электрическому полю приборы, их помещают в металлические ящики.

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.14.16*). Это означает, что

касательная составляющая вектора напряженности 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.



Рис. 14.16

Электрический заряд проводников.

Внутри проводника при равновесии зарядов не только напряженность 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.

При равновесии зарядов электрическое поле и электрический заряд внутри проводника равны нулю. Весь заряд сосредоточен на поверхности проводника, а линии напряженности электрического поля в любой точке поверхности проводника перпендикулярны этой поверхности.

Диэлектрики в электростатическом поле. Два вида диэлектриков

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 объему 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.

Электрические свойства нейтральных атомов и молекул. Чтобы понять, как незаряженный диэлектрик создает 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 14.17 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 дает основание считать, что в среднем по времени центр распределения отрицательного заряда приходится на середину атома, т. е. совпадает с положительно заряженным ядром.

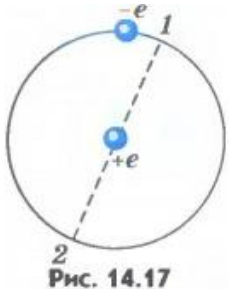


Рис. 14.17

Однако так обстоит дело не всегда. Рассмотрим молекулу поваренной соли 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.14.18*). Положительный и отрицательный заряды не распределены теперь симметрично по объему молекулы: центр

распределения положительного заряда приходится на ион натрия, а отрицательного – на ион хлора.

Электрический диполь. На большом расстоянии такую молекулу можно приближенно рассматривать как совокупность двух точечных зарядов, равных по модулю и противоположных по знаку, находящихся на некотором расстоянии l друг от друга (*рис.14.19*). Такую в целом нейтральную систему двух зарядов называют электрическим диполем.



Рис. 14.18



Рис. 14.19

Существующие диэлектрики можно разбить на два вида:

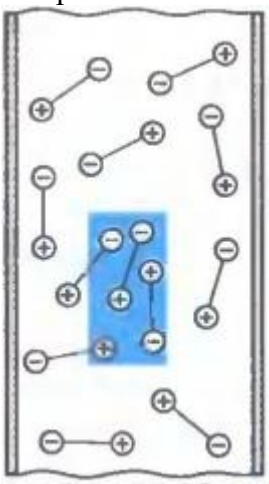
- *полярные*, состоящие из таких молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают;
- *неполярные*, состоящие из атомов или молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают.

Следовательно, молекулы у этих диэлектриков разные.

К полярным диэлектрикам относятся спирты, вода и другие вещества; к неполярным – инертные газы, кислород, водород, бензол, полиэтилен и др.

Поляризация диэлектриков

Поляризация полярных диэлектриков. Полярный **диэлектрик** состоит из молекул, которые можно рассматривать как электрические диполи. Тепловое движение приводит к беспорядочной ориентации диполей (*рис.14.20*), поэтому на поверхности диэлектрика, а также и в любом его объеме, содержащем большое число молекул (выделенный прямоугольник на рисунке 14.20), электрический заряд в среднем равен нулю. Напряженность электрического поля в диэлектрике в среднем также равна нулю.


Рис. 14.20

Поместим диэлектрик между двумя параллельными металлическими пластинами, несущими заряды противоположного знака. Если размеры пластин много больше расстояния между ними, то поле между пластинами однородно. Со стороны этого поля на каждый электрический диполь будут действовать две силы, одинаковые по модулю, но противоположные по направлению (*рис.14.21*). Они создадут момент сил, стремящийся повернуть диполь так, чтобы его ось была направлена по силовым линиям поля (*рис.14.22*). При этом положительные заряды смещаются в направлении электрического поля, а отрицательные – в противоположную сторону.

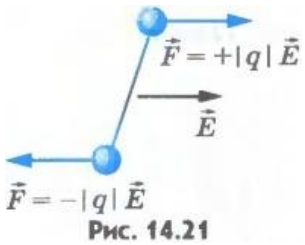


Рис. 14.21

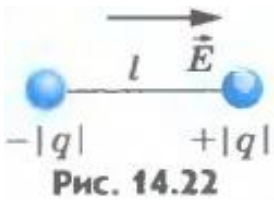
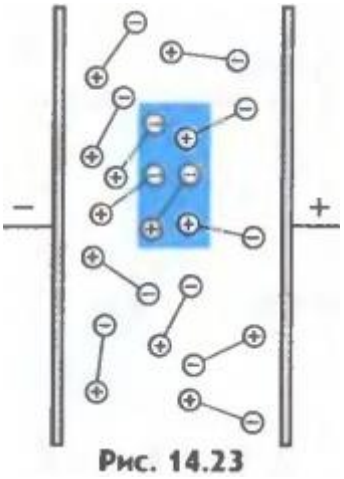


Рис. 14.22

Смещение положительных и отрицательных связанных зарядов диэлектрика в противоположные стороны называют **поляризацией**.


Рис. 14.23

Однако тепловое движение препятствует созданию упорядоченной ориентации всех диполей. Только при температуре, стремящейся к абсолютному нулю, все диполи выстраивались бы вдоль силовых линий. Таким образом, под влиянием поля происходит лишь частичная ориентация электрических диполей. Это означает, что в среднем число диполей, ориентированных вдоль поля, больше, чем число диполей, ориентированных против поля. На рисунке 14.23 видно, что у положительно заряженной пластины на поверхности диэлектрика появляются преимущественно отрицательные заряды диполей, а у отрицательно заряженной – положительные. В результате на поверхности диэлектрика возникает связанный заряд. Внутри диэлектрика положительные и отрицательные заряды диполей компенсируют друг друга и средний поляризованный связанный электрический заряд по-прежнему равен нулю.

Поляризация неполярных диэлектриков.

Неполярный диэлектрик в электрическом поле также поляризуется. Под действием поля положительные и отрицательные заряды его молекулы смещаются в противоположные стороны и центры распределения положительного и отрицательного зарядов перестают совпадать, как и у полярной молекулы. Молекулы растягиваются (*рис.14.24*). Такие деформированные молекулы можно рассматривать как электрические диполи, оси которых направлены вдоль поля. На поверхностях диэлектрика, примыкающих к заряженным пластинам, появляются связанные заряды, как и при поляризации полярного диэлектрика.

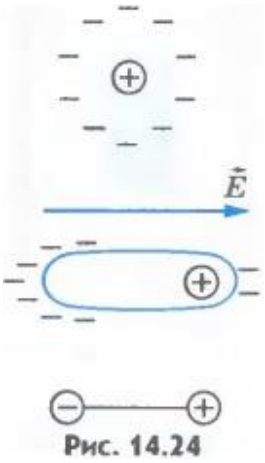


Рис. 14.24

В результате поляризации возникает поле, создаваемое связанными поляризованными зарядами и направленное против внешнего поля (*рис.14.25*). Если напряженность внешнего поля E_0, а напряженность поля, создаваемого поляризованными зарядами, E_1, то напряженность поля внутри диэлектрика равна:

$$E = E_0 - E_1.$$

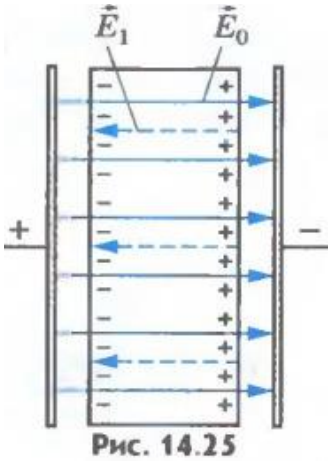


Рис. 14.25

Как видим, поле внутри диэлектрика ослабляется. Степень ослабления поля зависит от свойств диэлектрика. В электрическом поле связанные заряды диэлектрика смещаются в противоположные стороны, происходит поляризация диэлектрика. Поляризованный диэлектрик сам создает электрическое поле. Независимо от вида диэлектрика напряженность поля в нем всегда меньше напряженности внешнего поля, вызвавшего его поляризацию.

Потенциальная энергия заряженного тела в однородном электростатическом поле

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**.

Понятие потенциальной энергии самое сложное в электростатике. Вспомните, как нелегко было представить себе, что такое потенциальная энергия в механике. Силу мы ощущаем непосредственно, а потенциальную энергию нет. На пятом этаже дома

потенциальная энергия нашего тела больше, чем на первом. Но мы это никак не воспринимаем. Различие становится понятным, если вспомнить, что при подъеме вверх пришлось совершить работу, а также если представить себе, что произойдет при падении с пятого этажа.

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.

Вопросы для закрепления:

1. Какие поля называют потенциальными?
2. Как разность потенциалов между двумя точками поля зависит от работы электрического поля?
3. Что нужно выбрать прежде, чем говорить о значении потенциала в данной точке поля?
4. Чему равна разность потенциалов между двумя точками заряженного проводника?
5. Как связана разность потенциалов с напряженностью электрического поля?
6. Чем отличаются диэлектрики от проводников?
7. Какие диэлектрики называют полярными, а какие – неполярными?
8. Как связано изменение потенциальной энергии заряженной частицы с работой электрического поля?
9. Чему равна потенциальная энергия заряженной частицы в однородном электрическом поле?

22. Электроемкость. Конденсаторы. Емкость плоского конденсатора.

Выясним важный для практики вопрос: при каком условии можно накопить на проводниках большой электрический заряд?

При любом способе электризации тел - с помощью трения, электростатической машины, гальванического элемента и т. д. - первоначально нейтральные тела заряжаются вследствие того, что некоторая часть заряженных частиц переходит от одного тела к другому. Обычно этими частицами являются электроны.

При электризации двух проводников, например от электростатической машины, один из них приобретает заряд $+q$, а другой $-q$. Между проводниками появляется электрическое поле и возникает разность потенциалов (напряжение). С увеличением заряда проводников электрическое поле между ними усиливается.

В сильном электрическом поле (при большом напряжении и соответственно при большой напряженности) диэлектрик (например, воздух) становится проводящим. Возможен так называемый *пробой* диэлектрика: между проводниками проскакивает искра, и они разряжаются. Чем меньше увеличивается напряжение между проводниками с увеличением их зарядов, тем больший заряд можно на них накопить.

Электроемкость.

Физическую величину, характеризующую способность двух проводников накапливать электрический заряд называют **электроемкостью**.

Напряжение U между двумя проводниками пропорционально.

Это позволяет ввести понятие электроемкости двух проводников.

Электроемкостью двух проводников называют отношение заряда одного из проводников к разности потенциалов между ними:

$$C = \frac{q}{U}. \qquad (14.22)$$

Чем меньше напряжение U между проводниками при сообщении им зарядов $+|q|$ и $-|q|$, тем больше электроемкость проводников. Электроемкость не зависит ни от сообщенных проводникам зарядов, ни от возникающего между ними напряжения.

Единицы электроемкости. Формула (14.22) позволяет ввести единицу электроемкости.

Электроемкость двух проводников численно равна единице, если при сообщении им зарядов +1 Кл *и* -1 Кл *между ними возникает разность потенциалов* 1 В. Эту единицу называют *фарад* (Ф); 1 Ф=1 Кл/В.

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

Важная характеристика проводников – электроемкость. Электроемкость проводников тем больше, чем меньше разность потенциалов между ними при сообщении им зарядов противоположных знаков.

Конденсаторы

Систему проводников очень большой электроемкости вы можете обнаружить в любом радиоприемнике или купить в магазине. Называется она конденсатором. Сейчас вы узнаете, как устроены подобные системы и от чего зависит их электроемкость.

Конденсатор. Большой электроемкостью обладают системы из двух проводников, называемые **конденсаторами.** Конденсатор представляет собой два проводника, разделенные слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников. Проводники в этом случае называются **обкладками** конденсатора.

Простейший плоский конденсатор состоит из двух одинаковых параллельных пластин, находящихся на малом расстоянии друг от друга (*рис.14.33*).

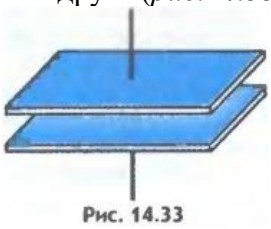


Рис. 14.33

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 (*рис.14.28*). Поэтому почти все электрическое поле *сосредоточено внутри конденсатора и однородно*.

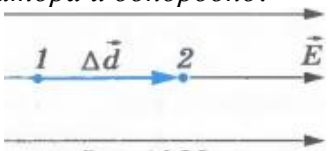


Рис. 14.28

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 заземлен, а вторую обкладку конденсатора заземлить. Тогда на заземленной обкладке останется заряд, противоположный по знаку и равный по модулю заряду незаземленной обкладки.

Такой же по модулю заряд уйдет в землю.

Под *зарядом конденсатора* понимают абсолютное значение заряда одной из обкладок.

Электроемкость конденсатора определяется формулой (14.22).

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

Электроемкость плоского конденсатора. Геометрия плоского конденсатора полностью определяется площадью S его пластин и расстоянием d между ними. От этих величин и должна зависеть емкость плоского конденсатора.

Чем больше площадь пластин, тем больший заряд можно на них накопить: $q \sim S$. С другой стороны, напряжение между пластинами согласно формуле (14.21) пропорционально расстоянию d между ними. Поэтому емкость

$$C = \frac{q}{U} \sim \frac{S}{d}. \qquad (14.23)$$

Кроме того, емкость конденсатора зависит от свойств диэлектрика между пластинами. Так как диэлектрик ослабляет поле, то электроемкость при наличии диэлектрика увеличивается.

Проверим на опыте зависимости, полученные нами из рассуждений. Для этого возьмем конденсатор, у которого расстояние между пластинами можно изменять, и электрометр с заземленным корпусом (*рис.14.34*). Соединим корпус и стержень электрометра с пластинами конденсатора проводниками и зарядим конденсатор. Для этого нужно коснуться наэлектризованной палочкой пластины конденсатора, соединенной со стержнем. Электрометр покажет разность потенциалов между пластинами.



Рис. 14.34

Раздвигая пластины, мы обнаружим *увеличение разности потенциалов*. Согласно определению электроемкости (см. формулу (14.22)) это указывает на ее уменьшение. В соответствии с зависимостью (14.23) электроемкость действительно должна уменьшаться с увеличением расстояния между пластинами.

Вставив между обкладками конденсатора пластину из диэлектрика, например из органического стекла, мы обнаружим *уменьшение разности потенциалов*. Следовательно, *электроемкость плоского конденсатора в этом случае увеличивается*. Расстояние между пластинами d может быть очень малым, а площадь S – большой. Поэтому при небольших размерах конденсатор может иметь большую электроемкость.

Для сравнения: в отсутствие диэлектрика между обкладками плоского конденсатора при электроемкости в 1 Ф и расстоянии между пластинами d=1 мм он должен был бы иметь площадь пластин S=100 км^2.

Различные типы конденсаторов. В зависимости от назначения конденсаторы имеют различное устройство. Обычный технический бумажный конденсатор состоит из двух полосок алюминиевой фольги, изолированных друг от друга и от металлического корпуса бумажными лентами, пропитанными парафином. Полоски и ленты туго свернуты в пакет небольшого размера.

В радиотехнике широко применяют конденсаторы переменной электроемкости (*рис.14.35*). Такой конденсатор состоит из двух систем металлических пластин, которые при вращении рукоятки могут входить одна в другую. При этом меняются площади перекрывающихся частей пластин и, следовательно, их

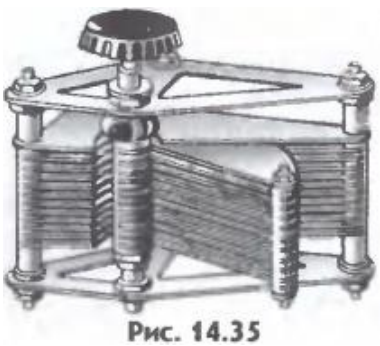


Рис. 14.35

электроемкость. Диэлектриком в таких конденсаторах служит воздух.

Значительного увеличения электроемкости за счет уменьшения расстояния между обкладками достигают в так называемых электролитических конденсаторах (*рис.14.36*). Диэлектриком в них служит очень тонкая пленка оксидов, покрывающих одну из обкладок (полосу фольги). Другой обкладкой служит бумага, пропитанная раствором специального вещества (электролита).

Конденсаторы позволяют накапливать электрический заряд. Электроемкость плоского конденсатора пропорциональна площади пластин и обратно пропорциональна расстоянию между пластинами. Кроме того, она зависит от свойств диэлектрика между обкладками.



Рис. 14.36

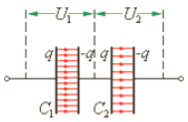
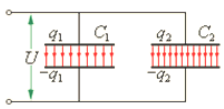
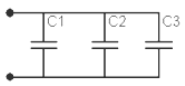
Вопросы для закрепления:

1. Что называют электроемкостью двух проводников?
2. Почему понятие электроемкости неприменимо к диэлектрикам?
3. В каких единицах выражается электроемкость?
4. От чего зависит электроемкость?
5. Как изменяется емкость конденсатора при наличии диэлектрика между его обкладками?
6. Какие существуют типы конденсаторов?

23. Соединение конденсаторов. Энергия и плотность энергии электрического поля.

Несколько конденсаторов, соединенных вместе, образуют батарею конденсаторов.

Различают **последовательное**, **параллельное** и **смешанное** соединение конденсаторов

Последовательное соединение	Параллельное соединение
	
	
$U = U_1 + U_2 + \ldots + U_i$	$U = U_1 = U_2 = \ldots = U_i$
$q = q_1 = q_2 = \ldots = q_i$	$q = q_1 + q_2 + \ldots + q_i$
$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_i}$	$C = C_1 + C_2 + \ldots + C_i$

Энергия заряженного конденсатора.

Для того чтобы зарядить конденсатор, нужно совершить работу по разделению положительных и отрицательных зарядов. Согласно закону сохранения энергии эта работа равна энергии конденсатора. В том, что заряженный конденсатор обладает энергией, можно

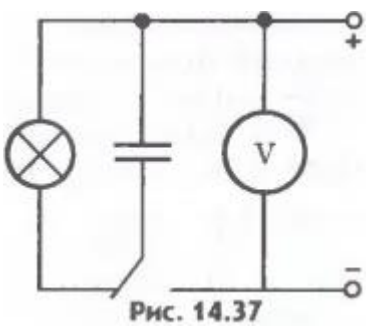


Рис. 14.37

убедиться, если разрядить его через цепь, содержащую лампу накаливания, рассчитанную на напряжение в несколько вольт (*рис.14.37*). При разрядке конденсатора лампа вспыхивает. Энергия конденсатора превращается в тепло и энергию света.

Выведем формулу для энергии плоского конденсатора.

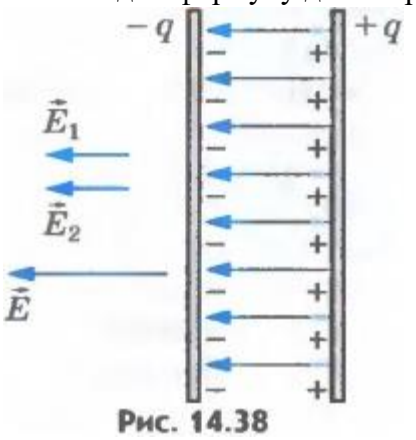


Рис. 14.38

Напряженность поля, созданного зарядом одной из пластин, равна *E/2*, где *E* – напряженность поля в конденсаторе. В однородном поле одной пластины находится заряд *q*, распределенный по поверхности другой пластины (*рис.14.38*). Согласно формуле (14.14) для потенциальной энергии заряда в однородном поле энергия конденсатора равна:

$$W_п = q\frac{E}{2}d, \qquad (14.24)$$

где q – заряд конденсатора, а d – расстояние между пластинами.

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

$$W_п = \frac{qU}{2}. \qquad (14.25)$$

Эта энергия равна работе, которую совершит электрическое поле при сближении пластин вплотную.

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

$$W_п = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}. \qquad (14.26)$$

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 -напряженность.

Так как напряженность электрического поля прямо пропорциональна разности потенциалов ($U=Ed$, то согласно формуле $W_п = \frac{CU^2}{2}$ энергия конденсатора прямопропорциональна квадрату напряженности электрического поля внутри него: $W_п \sim E^2$.

Вопросы для закрепления:

1. Чему равна энергия заряженного конденсатора?
2. Как определяется эквивалентная емкость цепи при параллельном соединении конденсаторов?
3. Как определяется эквивалентная емкость цепи при последовательном соединении конденсаторов?
4. Запишите формулу для определения энергии поля, приходящейся на единицу объема
5. Перечислите основные случаи применения конденсаторов

24. Электрический ток. Сила тока. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление проводника.

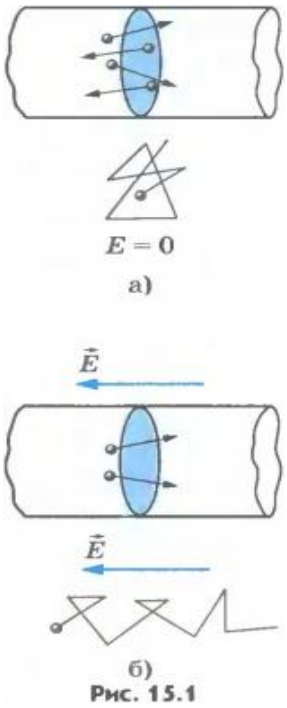


Рис. 15.1

При движении заряженных частиц в проводнике происходит перенос электрического заряда с одного места в другое. 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 перемещается 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 в проводнике устанавливается ***электрический ток*.**

Электрическим током называют упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.

За направление тока принимают направление движения положительно заряженных частиц. Направление тока совпадает с направлением вектора напряженности электрического поля.

Действие тока. О наличии электрического тока приходится судить по тем действиям или явлениям, которые его сопровождают.

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

Во-вторых, электрический ток может изменять химический состав проводника, например выделять его химические составные части.

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 проявляется у всех без исключения проводников.

Сила тока. Если в цепи устанавливается электрический ток, то это означает, что через поперечное сечение проводника все время переносится электрический заряд. Заряд, перенесенный в единицу времени, служит основной количественной характеристикой тока, называемой **силой тока**. Если через поперечное сечение проводника за время Δt переносится заряд Δq, то среднее значение силы тока равно:

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

Таким образом, **средняя сила тока равна отношению заряда Δq, прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени Δt, к этому промежутку времени.** Если сила тока со временем не меняется, то ток называют **постоянным**.

Сила тока в данный момент времени определяется также по формуле (15.1), но промежуток времени Δt в таком случае должен быть очень мал.

Если ток переменный, то сила тока, подобно заряду, – величина переменная. Она может быть как *положительной*, так и *отрицательной*. Знак силы тока зависит от того, какое из направлений вдоль проводника принять за положительное. Сила тока $I>0$, если направление тока совпадает с условно выбранным положительным направлением вдоль проводника. В противном случае $I<0$. (Термин *сила тока* нельзя считать удачным, так как понятие *сила*, применяемое к току, не имеет никакого отношения к понятию *сила* в механике. Но термин *сила тока* был введен давно и утвердился в науке.)

Связь силы тока со скоростью направленного движения частиц.

Пусть цилиндрический проводник (*рис.15.2*) имеет поперечное сечение площадью *S*. За положительное направление в проводнике примем направление слева направо. Заряд каждой частицы будем считать равным q_0.

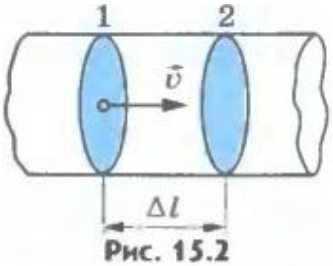


Рис. 15.2

В объеме проводника, ограниченном поперечными сечениями *1* и *2* с расстоянием Δl между ними, содержится общий заряд $q = q_0 n S \Delta l$. Если частицы движутся слева направо со средней скоростью $\vec{v}$, то за время $\Delta t = \frac{\Delta l}{v}$ все частицы, заключенные в рассматриваемом объеме, пройдут через поперечное сечение *2*. Поэтому сила тока равна:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{q_0 n S \Delta l v}{\Delta l} = q_0 n v S. \qquad (15.2)$$

В СИ единицей силы тока является *ампер* (А). Эту единицу устанавливают на основе магнитного взаимодействия токов.

Измеряют силу тока *амперметрами.* Принцип устройства этих приборов основан на магнитном действии тока.

Скорость упорядоченного движения электронов в проводнике. Найдем скорость упорядоченного перемещения электронов в металлическом проводнике. Согласно формуле

$$v = \frac{I}{enS}, \qquad (15.2)$$

где *e* – модуль заряда электрона. Скорость заряженных частиц (электронов) в проводнике очень мала - около 0,1 мм/с.

Условия, необходимые для существования электрического тока

Для возникновения и существования постоянного электрического тока в веществе необходимо, во-первых, **наличие свободных заряженных частиц**. Если положительные и отрицательные заряды связаны друг с другом в атомах или молекулах, то их перемещение не приведет к появлению электрического тока. Но наличия свободных зарядов еще недостаточно для возникновения тока.

Для создания и поддержания упорядоченного движения заряженных частиц необходима, во-вторых, **сила**, действующая на них в определенном направлении. Если эта сила перестанет действовать, то упорядоченное движение заряженных частиц прекратится из-за электрического сопротивления, оказываемого их движению ионами кристаллической решетки металлов или нейтральными молекулами электролитов.

На заряженные частицы, как мы знаем, действует электрическое поле с силой $\vec{F} = q\vec{E}$.

Если внутри проводника имеется электрическое поле, то между концами проводника, в соответствии с формулой (14.21), существует разность потенциалов. Когда разность потенциалов не меняется во времени, в проводнике устанавливается ***постоянный электрический ток.*** Вдоль проводника потенциал уменьшается от максимального значения на одном конце проводника до минимального на другом, так как положительный заряд под действием сил поля перемещается в сторону убывания потенциала.

Электрический ток, как известно, может быть получен только в таком веществе, в котором имеются свободные заряженные частицы. Чтобы эти частицы пришли в упорядоченное движение, нужно создать в проводнике **электрическое поле.**

Закон Ома для участка цепи. Вольт-амперная характеристика.

Сила тока в проводнике определяется этой разностью потенциалов. Чем больше разность потенциалов, тем больше напряженность 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 – твердого, жидкого и газообразного – существует определенная зависимость силы тока от приложенной разности потенциалов на концах проводника. Эту зависимость выражает так называемая **вольт-амперная характеристика** проводника. Ее находят, измеряя силу тока в проводнике при различных значениях напряжения.

Закон Ома. Наиболее простой вид имеет вольт-амперная характеристика металлических проводников и растворов электролитов. Впервые (для металлов) ее установил немецкий ученый Георг Ом, поэтому зависимость силы тока от напряжения носит название *закона Ома*.

На участке цепи, изображенной на рисунке 15.3, ток направлен от точки *1* к точке *2*. Разность потенциалов (напряжение) на концах проводника равна $U = \varphi_1 - \varphi_2$. Так как ток направлен слева направо, то напряженность электрического поля направлена в ту же сторону и $\varphi_1 > \varphi_2$.

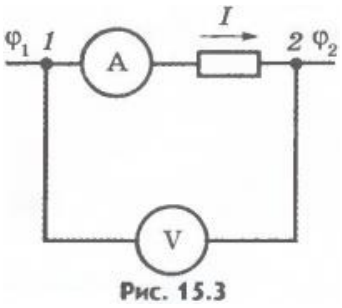


Рис. 15.3

Закон Ома для участка цепи:

Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению U и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка R:

$$I = \frac{U}{R}. \qquad (15.3)$$

Закон Ома имеет очень простую форму, но доказать экспериментально его справедливость довольно трудно. Дело в том, что разность потенциалов на участке металлического проводника даже при большой силе тока мала, так как мало сопротивление проводника.

Значение закона Ома. Закон Ома для участка цепи определяет силу тока на участке электрической цепи при заданном напряжении между его концами и известном сопротивлении. Он позволяет рассчитать тепловые, химические и магнитные действия тока, так как они зависят от силы тока. Из закона Ома вытекает, что замыкать обычную осветительную сеть проводником малого сопротивления опасно. Сила тока может оказаться настолько большой, что это может иметь тяжелые последствия.

Вопросы для закрепления:

1. Что называют электрическим током?
2. Что такое сила тока?
3. Какое направление тока принимают за положительное
4. Согласно закону Ома сопротивление участка цепи $R = \frac{U}{I}$. Означает ли это, что сопротивление зависит от силы тока или напряжения?
5. Что такое удельное сопротивление проводника?
6. В каких единицах выражается удельное сопротивление проводника?
7. Почему электрическое поле заряженных частиц (кулоновское поле) не способно поддерживать постоянный электрический ток в цепи?

25. Электрические цепи с последовательным и параллельным соединением проводников.

Электрические цепи.

От источника тока энергия может быть передана по проводам к устройствам, потребляющим энергию: электрической лампе, радиоприемнику и др. Для этого составляют ***электрические цепи*** различной сложности.

Электрическая цепь обычно состоит из ***источника тока, устройств, потребляющих электрическую энергию, соединительных проводов и выключателей для замыкания цепи.*** Часто в электрическую цепь включают приборы, контролирующие силу тока и напряжение на различных участках цепи, - амперметры и вольтметры.

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 поочередно друг за другом. На рисунке 15.4 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. $I_1 = I_2 = I, \qquad (15.5)$

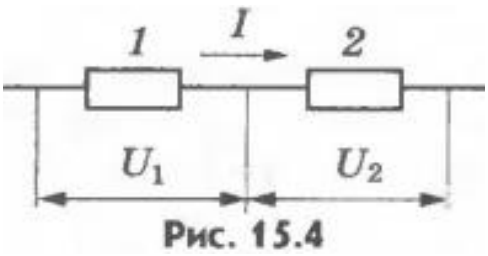


Рис. 15.4

так как в проводниках электрический заряд в случае постоянного тока не накапливается и через любое поперечное сечение проводника за определенное 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:*** $R = R_1 + R_2. \qquad (15.6)$

Это правило можно применить для любого числа последовательно соединенных проводников. Напряжения на проводниках и их сопротивления при последовательном соединении связаны соотношением

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}. \qquad (15.7)$$

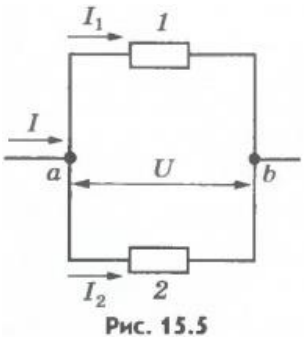


Рис. 15.5

Параллельное соединение проводников.

На рисунке 15.5 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 *a* – разветвление 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,

$$I = I_1 + I_2. \qquad (15.8)$$

Напряжение U на концах проводников, соединенных 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 распространенный 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 Ома для всего участка в целом и для участков сопротивлениями проводников R_1 и R_2, можно доказать, что ***величина, обратная полному сопротивлению участка ab, равна сумме величин, обратных сопротивлениям отдельных проводников***:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \qquad (15.9)$$

Отсюда следует, что

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \qquad (15.10)$$

Напряжения на параллельно соединенных проводниках равны: $I_1 R_1 = I_2 R_2$. Следовательно,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}. \qquad (15.11)$$

Рассмотрим цепочку сопротивлений *R-2R*, называемую матрицей (*рис.15.6*).

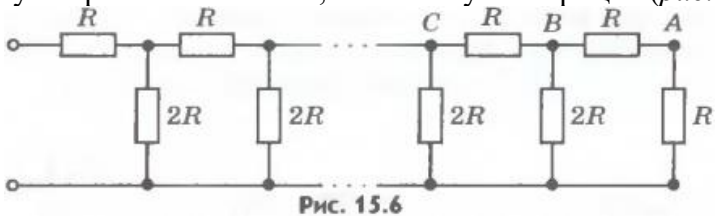


Рис. 15.6

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.

Различные проводники в цепи соединяются друг с другом последовательно или параллельно. В первом случае сила тока одинакова во всех проводниках, а во втором случае одинаковы напряжения на проводниках. Чаще всего к осветительной сети различные потребители тока подключаются параллельно.

Вопросы для закрепления:

1. Почему лампы в квартире соединяют параллельно, а лампочки в елочных гирляндах – последовательно?
2. Сопротивление каждого проводника равно 1 Ом. Чему равно сопротивление двух таких проводников, соединенных:
   1) последовательно;
   2) параллельно?
3. Каково соотношение между токами для цепей с последовательным и параллельным соединением?
4. Каким соотношением связаны между собой напряжение и сопротивление проводников при последовательном соединении?
5. Каким соотношением связаны между собой сила тока и сопротивление проводников при параллельном соединении?

26. Э.Д.С. Закон Ома для полной цепи. КПД источника тока. Законы Кирхгофа.

Электродвижущая сила.

Любой источник тока характеризуется электродвижущей силой, или, сокращенно, ЭДС. Так, на круглой батарейке для карманного фонарика написано: 1,5 В. Что это значит?

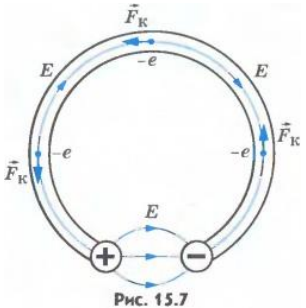


Рис. 15.7

Соедините проводником два металлических шарика, несущих заряды противоположных знаков. Под влиянием электрического поля этих зарядов в проводнике возникает электрический ток (*рис.*

15.7). Но этот ток будет очень кратковременным. Заряды быстро нейтрализуют друг друга, потенциалы шариков станут одинаковыми, и электрическое поле исчезнет.

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.15.8*). Одно лишь электрическое поле заряженных частиц (*кулоновское поле*) не способно поддерживать постоянный ток в цепи.

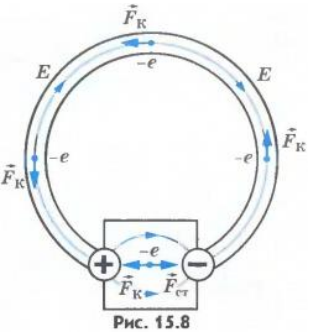


Рис. 15.8

Любые силы, действующие на электрически заряженные частицы, за исключением сил электростатического происхождения (т. е. кулоновских), называют **сторонними силами.**

В цепи должен быть какой-то источник энергии, поставляющий ее в цепь. В нем, помимо кулоновских сил, обязательно должны действовать сторонние, непотенциальные силы. Работа этих сил вдоль замкнутого контура должна быть отлична от нуля. Именно в процессе совершения работы этими силами заряженные частицы приобретают внутри источника тока энергию и отдают ее затем проводникам электрической цепи.

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 создается 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.15.8*).

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 элементе Вольта, действуют химические силы. Элемент Вольта состоит из цинкового и медного электродов, помещенных в раствор серной кислоты. Химические силы вызывают растворение цинка в кислоте. В раствор переходят положительно заряженные ионы цинка, а сам цинковый электрод при этом заряжается отрицательно. (Медь очень мало растворяется в серной кислоте.) Между цинковым и медным электродами появляется разность потенциалов, которая и обусловливает ток в замкнутой электрической цепи.

Электродвижущая сила. Действие сторонних сил характеризуется важной физической величиной, называемой ***электродвижущей силой*** (сокращенно ЭДС).

Электродвижущая сила источника тока равна отношению работы сторонних сил при перемещении заряда по замкнутому контуру к величине этого заряда:

Электродвижущую силу, как и напряжение, выражают в вольтах.

Можно говорить также об электродвижущей силе и на любом участке цепи. Это удельная работа сторонних сил (работа по перемещению единичного заряда) не во всем 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. Так, например, работа сторонних сил при перемещении заряда между клеммами источника тока вне самого источника равна нулю.

$$\mathscr{E} = \frac{A_{ст}}{q}. \qquad (15.16)$$

Закон Ома для полной цепи

Рассмотрим простейшую полную (т. е. замкнутую) цепь, состоящую из источника тока (гальванического элемента, аккумулятора или генератора) и резистора сопротивлением *R*(*рис.15.9*). Источник тока имеет ЭДС ε и сопротивление *r*. Сопротивление источника часто называют ***внутренним сопротивлением*** – в отличие от внешнего сопротивления *R* цепи. В генераторе *r* – это сопротивление обмоток, а в гальваническом элементе – сопротивление раствора электролита и электродов.

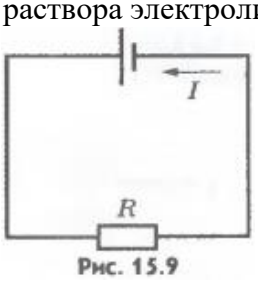


Рис. 15.9

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 Δt через поперечное сечение проводника проходит электрический заряд Δq. Тогда работу сторонних сил при перемещении заряда Δq можно записать так: $A_{ст} = \mathscr{E}\Delta q$. Согласно определению силы тока $\Delta q = I\Delta t$. Поэтому $A_{ст} = \mathscr{E}I\Delta t.$ (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:

$$Q = I^2R\Delta t + I^2r\Delta t. \qquad (15.18)$$

По закону сохранения энергии $A_{ст} = Q$, откуда получаем

$$\mathscr{E} = IR + Ir. \qquad (15.19)$$

Произведение силы тока и сопротивления участка цепи часто 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 записывают в виде:

$$\boxed{I = \frac{\mathscr{E}}{R + r}.} \qquad (15.20)$$

Сила тока в замкнутой цепи равна отношению ЭДС источника тока к полному сопротивлению цепи.

Сила тока в цепи зависит от трех величин: ЭДС ε, 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*>>*r*). При этом напряжение на зажимах источника примерно равно ЭДС: $U = IR = \mathscr{E} - Ir \approx \mathscr{E}.$

При коротком замыкании, когда *R*, сила тока в цепи определяется именно внутренним сопротивлением источника и при электродвижущей силе в несколько вольт может оказаться очень большой, если *r* мало (например, у аккумулятора *r*≈ 0,1-0,001 Ом). Провода могут расплавиться, а сам источник выйти из строя.

Если цепь содержит несколько последовательно соединенных элементов с ЭД ε_1, ε_2, ε_3 и т. д., то *полная ЭДС цепи равна алгебраической сумме ЭДС отдельных элементов*. Для определения знака ЭДС любого источника нужно вначале условиться относительно выбора положительного направления обхода контура. На рисунке 15.10 положительным (произвольно) считают направление обхода против часовой стрелки.



Рис. 15.10

Если при обходе цепи данный источник стремится вызвать ток в направлении обхода, то его ЭДС берется положительной, $\varepsilon > 0$. 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, $\varepsilon < 0$. Сторонние силы внутри источника

совершают отрицательную работу. Так, для цепи, изображенной на рисунке 15.10, при обходе контура против часовой стрелки получаем следующее уравнение:

$$\mathscr{E} = \mathscr{E}_1 + \mathscr{E}_2 + \mathscr{E}_3 = \\ = |\mathscr{E}_1| - |\mathscr{E}_2| + |\mathscr{E}_3|.$$

Если $\varepsilon > 0$, то согласно формуле (15.20) сила тока $I > 0$, т. е. направление тока совпадает с направлением обхода контура. При $\varepsilon < 0$, наоборот, направление тока противоположно направлению обхода контура. Полное сопротивление цепи R_n равно сумме всех $R_n = R + r_1 + r_2 + r_3.$ сопротивлений (рис. 15.10):

Сила тока в замкнутой цепи равна ЭДС в этой цепи, деленной на ее полное сопротивление.

Коэффициент полезного действия (КПД).

Нагрузкой в электротехнике называется потребитель (приемник) электрической энергии, в данном случае – лампа накаливания. Тогда для характеристики эффективности системы (устройства, машины, электрической цепи) в отношении преобразования или передачи энергии вводится **коэффициент полезного действия** (КПД). Он определяется отношением полезно использованной энергии к суммарному количеству энергии, полученному системой, обозначается обычно η («эта»). КПД является безразмерной величиной и часто измеряется в процентах. Математически определение КПД может быть записано в виде:

$$\eta = \frac{A}{Q} \cdot 100\% = \frac{[\text{Дж}]}{[\text{Дж}]} \cdot 100\% = [\%],$$

где А – работа, выполненная потребителем, Q – энергия, отданная источником.

КПД характеризует степень полезности системы и определяет:

- количество потерь мощности в ней.
- Потери мощности в проводнике образуются преобразованием электрического тока в тепловую энергию, зависят от сопротивления проводника и не входят в величину полезной работы.

На большинстве приборов указана потребляемая ими мощность.

Прохождение по проводнику электрического тока сопровождается выделением в нем энергии. Эта энергия определяется работой тока - произведением перенесенного заряда и напряжения на концах проводника.

Разветвленные цепи.

Электрическая цепь, содержащая в себе ***узлы***, называется ***разветвленной***. Расчет разветвленных цепей с помощью закона Ома довольно сложен. Эта задача решается более просто с помощью двух правил немецкого физика Г. Кирхгофа (1824 – 1887).

При описании сложных разветвленных электрических цепей будем использовать понятия: ***узел , ветвь, контур***.

Узлом разветвлённой цепи называется точка, в которой сходятся три или более проводника. Ток текущий к узлу считается имеющим знак (+*I*), из узла – знак (–*I*).

Ветвью электрической цепи – называется участок цепи вдоль которого проходит один и тот же ток.

Контур – замкнутый контур из нескольких последовательных участков.

Первое правило Кирхгофа относится к узлам разветвлённых цепей.

Первое правило Кирхгофа утверждает:**Алгебраическая сумма сил токов для каждого узла в разветвленной цепи равна нулю:** $I_1+I_2+I_3+...+I_n=0$.

$$\sum_{k=1}^{n} I_k = 0.$$

Первое правило Кирхгофа является следствием закона сохранения электрического заряда.

В случае установившегося постоянного тока в цепи ни в одной точке проводника, ни на одном из его участков не должны накапливаться электрические заряды (*узел* – любой участок цепи, где сходятся более двух проводников (рис. 7.8)).

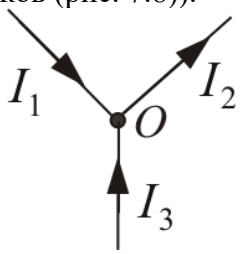


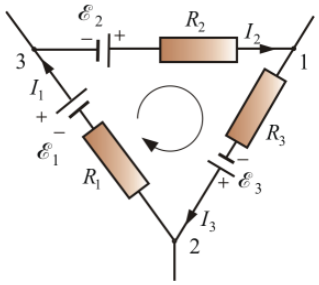
Рис. 7.8

Токи, сходящиеся к узлу, считаются положительными: $I_1 - I_2 + I_3 = 0.$

Второе правило Кирхгофа является обобщением закона Ома для разветвленной цепи.

Для произвольного замкнутого контура с произвольным числом разветвлений (рис. 7.9) можно записать для каждого элемента контура:

$$\phi_2 - \phi_3 + \mathcal{E}_1 = I_1 R_1;$$
$$\phi_3 - \phi_1 + \mathcal{E}_2 = I_2 R_2;$$
$$\phi_1 - \phi_2 + \mathcal{E}_3 = I_3 R_3.$$



Складывая эти уравнения получим **второе правило Кирхгофа**:

$$\sum_k I_k R_k = \sum_k \mathcal{E}_k.$$

В любом замкнутом контуре электрической цепи ***алгебраическая сумма произведения тока на сопротивление равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом же контуре***.

Обход контуров осуществляется по часовой стрелке, если направление обхода совпадает с направлением тока, то ток берется со знаком «плюс».

Второе правило Кирхгофа является следствием обобщенного закона Ома.

Подобные уравнения могут быть составлены для всех замкнутых контуров, существующих в данной разветвленной цепи, однако их число должно быть ограничено уравнениями для независимых контуров, в которых встречается хотя бы один ток, не входящий в остальные.

При составлении уравнений согласно второму правилу Кирхгофа токам и ЭДС нужно приписывать знаки в соответствии с выбранным направлением обхода.

На практике, при решении задач, при составлении уравнений направления токов выбирают произвольно и в соответствии с этим применяют правило знаков.

Действительное направление токов определится решением задачи: если какой-либо ток окажется положительным, то его направление выбрано правильно, если отрицательным, то в действительности он течет противоположно выбранному направлению.

Число независимых уравнений, составленных в соответствии с первым и вторым правилами Кирхгофа, *равно числу различных токов*, текущих в разветвленной цепи. Поэтому, если заданы ЭДС и сопротивления, то могут быть вычислены все токи.

Таким образом, правила Кирхгофа сводят расчет разветвленной электрической цепи к решению системы линейных алгебраических уравнений. Если в результате решения сила тока на каком-то участке оказывается отрицательной, то это означает, что ток на этом участке идет в направлении, противоположном выбранному положительному направлению.

Алгоритм решения задач на правила Кирхгофа.

При решении задач рекомендуется следующий порядок:

1. Произвольно выбрать и обозначить на чертеже направление токов во всех участках цепи.
2. Записать уравнение для всех n-1 узлов.
3. Выделить произвольный контур в цепи и выбрать направление обхода.
4. Записать второе правило Кирхгофа.

Вопросы для закрепления:

1. Какие силы принято называть сторонними?
2. Что называют электродвижущей силой?
3. От чего зависит знак ЭДС в законе Ома для замкнутой цепи?
4. Чему равно внешнее сопротивление в случаях:
   а) короткого замыкания?
   б) разомкнутой цепи?
5. На чем основаны правила Кирхгофа
6. Сколько независимых уравнений необходимо составить при использовании первого правила Кирхгофа
7. Сколько независимых уравнений, составленных по второму правилу Кирхгофа, необходимо, для вычисления токов в цепи
8. Для чего введена величина КПД?
9. Что характеризует КПД?

27. Электрический ток в металлах. Основные положения электронной теории проводимости. Сверхпроводимость.

Экспериментальное доказательство существования свободных электронов в металлах.

Носителями свободных зарядов в металлах являются электроны. Их концентрация велика – порядка 10^{28} 1/м^3. Эти электроны участвуют в беспорядочном тепловом движении. Под действием электрического поля они начинают перемещаться упорядоченно со средней скоростью порядка 10^{-4} м/с. Экспериментальное доказательство того, что проводимость металлов обусловлена движением свободных электронов, было дано в опытах Л.И.Мандельштама и Н. Д. Папалекси (1913), Б. Стюарта и Р. Толмена (1916). Схема этих опытов такова. На катушку наматывают проволоку, концы которой припаивают к двум металлическим дискам, изолированным друг от друга (*рис.16.1*). К концам дисков при помощи скользящих контактов подключают гальванометр. Катушку приводят в быстрое вращение, а затем резко останавливают. После резкой остановки

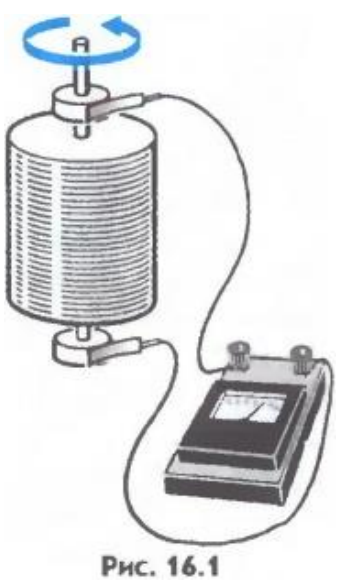


Рис. 16.1

катушки свободные заряженные частицы некоторое время движутся относительно проводника по инерции и, следовательно, в катушке возникает электрический ток. Ток существует незначительное время, так как из-за сопротивления проводника заряженные частицы тормозятся и упорядоченное движение частиц, образующее ток, прекращается. Направление тока в этом опыте говорит о том, что он создается движением отрицательно заряженных частиц. Переносимый при этом заряд пропорционален отношению заряда частиц, создающих ток, к их массе, т. е. $|q|/m$.

Движение электронов в металле. Электроны под влиянием силы, действующей на них со стороны электрического поля, приобретают определенную скорость упорядоченного движения.

Сила тока в проводнике пропорциональна скорости упорядоченного движения частиц, следовательно, сила тока пропорциональна разности потенциалов на концах проводника: $I \sim U$. В этом состоит *качественное объяснение закона Ома* на основе электронной теории проводимости металлов.

Построить удовлетворительную количественную теорию движения электронов в металле на основе законов классической механики невозможно. Дело в том, что условия движения электронов в металле таковы, что классическая механика Ньютона неприменима для описания этого движения. Наиболее наглядно это видно из следующего примера. Если экспериментально определить среднюю кинетическую энергию теплового движения электронов в металле при комнатной температуре и найти соответствующую этой энергии температуру, то получим температуру порядка 10^5-10^6 К. Такая температура существует внутри звезд. Движение электронов в металле подчиняется законам квантовой механики. Экспериментально доказано, что носителями свободных зарядов в металлах являются электроны. Под действием электрического поля электроны движутся с постоянной средней скоростью, испытывая тормозящее влияние со стороны кристаллической решетки. Скорость упорядоченного движения электронов прямо пропорциональна напряженности поля в проводнике. Различные вещества имеют разные удельные сопротивления. Зависит ли сопротивление от состояния проводника? От его температуры?

Если пропустить ток от аккумулятора через стальную спираль, а затем начать нагревать ее в пламени горелки, то амперметр покажет уменьшение силы тока. Это означает, что с изменением температуры сопротивление проводника меняется.

Если при температуре, равной 0°С, сопротивление проводника равно R_0, а при температуре t оно равно R, то относительное изменение сопротивления, как показывает опыт, прямо пропорционально изменению температуры t:

$$\frac{R - R_0}{R} = \alpha t. \qquad (16.1)$$

Коэффициент пропорциональности α называют **температурным коэффициентом сопротивления**. Он характеризует зависимость сопротивления вещества от температуры. **Температурный коэффициент сопротивления численно равен относительному изменению сопротивления проводника при нагревании на 1 К.** Для всех металлических проводников коэффициент $\alpha > 0$ и незначительно меняется с изменением температуры. Если интервал изменения температуры невелик, то температурный коэффициент можно считать постоянным и равным его среднему значению на этом интервале температур. У чистых металлов $\alpha \approx 1/273$ К$^{-1}$.

Сверхпроводимость.

Сопротивление проводников зависит от температуры. Сопротивление металлов уменьшается с уменьшением температуры. Что произойдет при стремлении температуры к абсолютному нулю?

В 1911 г. голландский физик Х. Камерлинг-Оннес открыл замечательное явление – *сверхпроводимость*. Он обнаружил, что при охлаждении ртути в жидком гелии ее сопротивление сначала меняется постепенно, а затем при температуре 4,1 К очень резко

падает до нуля (*рис.16.3*). Температура, при которой вещество переходит в сверхпроводящее состояние, называется критической температурой. Это явление было названо сверхпроводимостью. Позже было открыто много других сверхпроводников.

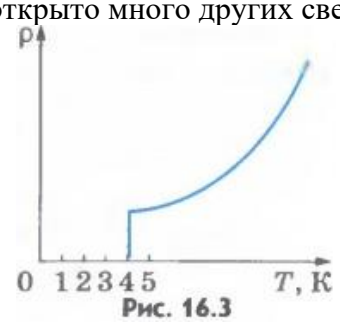


Рис. 16.3

Сверхпроводимость многих металлов и сплавов наблюдается при очень низких температурах – начиная примерно с 25 К. В справочных таблицах приводятся температуры перехода в сверхпроводящее состояние некоторых веществ.

Если в кольцевом проводнике, находящемся в сверхпроводящем состоянии, создать ток, а затем устранить источник тока, то сила этого тока не меняется сколь угодно долго. В обычном же (несверхпроводящем) проводнике электрический ток в этом случае прекращается.

Сверхпроводники находят широкое применение. Так, сооружают мощные электромагниты со сверхпроводящей обмоткой, которые создают магнитное поле на протяжении длительных интервалов времени без затрат энергии. Ведь *выделения тепла в сверхпроводящей обмотке не происходит.*

Однако получить сколь угодно сильное магнитное поле с помощью сверхпроводящего магнита нельзя. Очень сильное магнитное поле разрушает сверхпроводящее состояние. Такое поле может быть создано и током в самом сверхпроводнике. Поэтому для каждого проводника в сверхпроводящем состоянии существует критическое значение силы тока, превзойти которое, не нарушая сверхпроводящего состояния, нельзя.

Сверхпроводящие магниты используются в ускорителях элементарных частиц, магнитогидродинамических генераторах, преобразующих механическую энергию струи раскаленного ионизованного газа, движущегося в магнитном поле, в электрическую энергию.

Если бы удалось создать сверхпроводящие материалы при температурах, близких к комнатным, то была бы решена важнейшая техническая проблема – *передача энергии по проводам без потерь*. В настоящее время физики работают над ее решением.

Объяснение сверхпроводимости возможно только на основе квантовой теории. Оно было дано лишь в 1957 г. американскими учеными Дж. Бардиным, Л.Купером, Дж. Шриффером и советским ученым, академиком Н. Н. Боголюбовым.

Физический механизм сверхпроводимости довольно сложен. Очень упрощенно его можно объяснить так: электроны объединяются в правильную шеренгу и движутся не сталкиваясь с кристаллической решеткой, состоящей из ионов. Это движение существенно отличается от обычного теплового движения, при котором свободный электрон движется хаотично.

В 1986 г. была открыта высокотемпературная сверхпроводимость. Получены сложные оксидные соединения лантана, бария и других элементов (керамики) с температурой перехода в сверхпроводящее состояние около 100 К. Это выше температуры кипения жидкого азота при атмосферном давлении (77 К).

Высокотемпературная сверхпроводимость в недалеком будущем приведет наверняка к новой технической революции во всей электротехнике, радиотехнике, конструировании ЭВМ. Сейчас прогресс в этой области тормозится необходимостью охлаждения проводников до температур кипения дорогого газа – гелия.

Надо надеяться, что удастся создать сверхпроводники и при комнатной температуре. Генераторы и электродвигатели станут исключительно компактными (уменьшатся в несколько раз) и экономичными. Электроэнергию можно будет передавать на любые расстояния без потерь и аккумулировать в простых устройствах.

Многие металлы и сплавы при температурах ниже 25 К полностью теряют сопротивление – становятся сверхпроводниками.

Вопросы для закрепления:

1. Перечислите проводники электрического тока
2. Катушка (см. рис. 16.1) вращалась по часовой стрелке, а затем была резко заторможена. Каково направление электрического тока в катушке в момент торможения?
3. Как скорость упорядоченного движения электронов в металлическом проводнике зависит от напряжения на концах проводника?
4. Каковы главные технические трудности использования сверхпроводников на практике?
5. Экспериментальное доказательство существования свободных электронов в металлах. Опыты Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси (1913 г.)

28. Электрический ток в полупроводниках. Полупроводниковый диод, транзистор. Электрический ток в газах. Виды газовых разрядов. Электрический ток в вакууме. Плазма – четвертое состояние вещества.

Отличие проводников от полупроводников особенно проявляется при анализе зависимости их электропроводимости от температуры. Исследования показывают, что у ряда элементов (кремний, германий, селен и др.) и соединений (PbS, CdS, GaAs и др.) удельное сопротивление с увеличением температуры не растет, как у металлов , а, наоборот, чрезвычайно резко уменьшается. Такие вещества и называют **полупроводниками**.

При температурах, близких к абсолютному нулю, удельное сопротивление полупроводников очень велико. Это означает, что при низких температурах полупроводник ведет себя как диэлектрик. По мере повышения температуры его удельное сопротивление быстро уменьшается.

Строение полупроводников. Для того чтобы включить транзисторный приемник, знать ничего не надо. Но чтобы его создать, надо было знать очень много и обладать незаурядным талантом. Понять же в общих чертах, как работает транзистор, не так уж и трудно. Сначала необходимо познакомиться с механизмом проводимости в полупроводниках. А для этого придется вникнуть в *природу связей*, удерживающих атомы полупроводникового кристалла друг возле друга. Для примера рассмотрим кристалл кремния. Кремний – четырехвалентный элемент. Это означает, что во внешней оболочке его атома имеется четыре электрона, сравнительно слабо связанных с ядром. Число ближайших соседей каждого атома кремния также равно четырем. Схема структуры кристалла кремния изображена на рисунке. Взаимодействие пары соседних атомов осуществляется с помощью парноэлектронной связи, называемой **ковалентной связью**. В образовании этой связи от каждого атома участвует по одному валентному электрону.

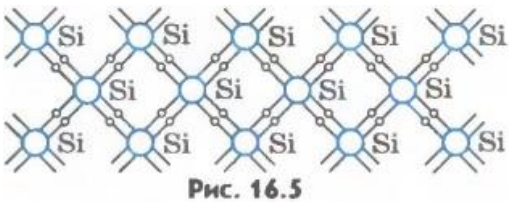


Рис. 16.5

Их отрицательный заряд удерживает положительные ионы кремния друг возле друга.

Не надо думать, что коллективированная пара электронов принадлежит лишь двум атомам. Каждый атом образует четыре связи с соседними, и любой валентный электрон может двигаться по одной из них. Дойдя до соседнего атома, он может перейти к следующему, а затем дальше вдоль всего кристалла. Валентные электроны принадлежат всему кристаллу.

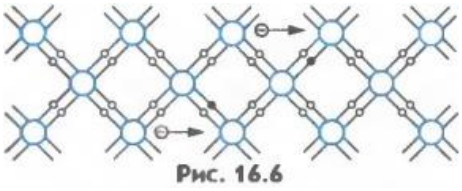
Парноэлектронные связи в кристалле кремния достаточно прочны и при низких температурах не разрываются. Поэтому кремний при низкой температуре не проводит электрический ток. Участвующие в связи атомов валентные электроны являются как бы «цементирующим раствором», удерживающим кристаллическую решетку, и внешнее электрическое поле не оказывает заметного влияния на их движение. Аналогичное строение имеет кристалл германия.

Электронная проводимость. При нагревании кремния кинетическая энергия частиц повышается, и наступает разрыв отдельных связей. Некоторые электроны покидают свои «проторенные пути» и становятся свободными, подобно электронам в металле. В электрическом поле они перемещаются между узлами решетки, создавая электрический ток (*рис.16.6*).

Проводимость полупроводников, обусловленную наличием у них свободных электронов, называют **электронной проводимостью**. При повышении температуры число разорванных связей, а значит, и свободных электронов увеличивается. При нагревании от 300 до 700 К число свободных носителей заряда увеличивается от 10^{17} до 10^{24} 1/м^3. Это приводит к уменьшению сопротивления.

При разрыве связи между атомами полупроводника образуется вакантное место с недостающим электроном. Его называют **дыркой**. В дырке имеется избыточный положительный заряд по сравнению с остальными, не разорванными связями (см. рис. 16.6).

Положение дырки в кристалле не является неизменным. Непрерывно происходит следующий процесс. Один из электронов, обеспечивающих связь атомов, перескакивает на место образовавшейся дырки и восстанавливает здесь парноэлектронную связь, а там, откуда перескочил этот электрон, образуется новая дырка. Таким образом, дырка может перемещаться по всему кристаллу.


Рис. 16.6

Если напряженность электрического поля в образце равна нулю, то перемещение дырок, равноценное перемещению положительных зарядов, происходит беспорядочно и поэтому не создает электрического тока. При наличии электрического поля возникает упорядоченное перемещение дырок, и, таким образом, к электрическому току свободных электронов добавляется электрический ток, связанный с перемещением дырок. Направление движения дырок противоположно направлению движения электронов (*рис.16.7*).

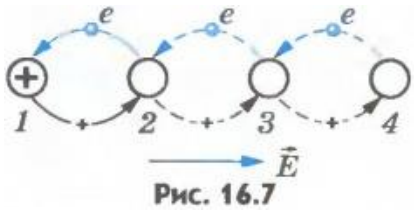


Рис. 16.7

В отсутствие внешнего поля на один свободный электрон (-) приходится одна дырка (+). При наложении поля свободный электрон смещается против напряженности поля. В этом направлении перемещается также один из связанных электронов. Это выглядит как перемещение дырки в направлении поля.

Итак, в полупроводниках имеются носители заряда двух типов: электроны и дырки. Поэтому полупроводники обладают не только электронной, но и **дырочной проводимостью**.

Мы рассмотрели механизм проводимости чистых полупроводников. Проводимость при этих условиях называют **собственной проводимостью** полупроводников.

Проводимость чистых полупроводников (собственная проводимость) осуществляется перемещением свободных электронов (электронная проводимость) и перемещением

связанных электронов на вакантные места парноэлектронных связей (дырочная проводимость).

Электрическая проводимость полупроводников при наличии примесей.

Проводимость полупроводников чрезвычайно сильно зависит от примесей. Именно эта зависимость сделала полупроводники тем, чем они стали в современной технике.

Собственная проводимость полупроводников обычно невелика, так как мало число свободных электронов; например, в германии при комнатной температуре $n_e=3\cdot10^{13}$ см^3. В то же время число атомов германия в 1 см^{3}порядка 10^{23}.

Таким образом, число свободных электронов составляет примерно одну десятимиллиардную часть от общего числа атомов. Существенная особенность полупроводников состоит в том, что в них при наличии примесей наряду с собственной проводимостью возникает дополнительная –**примесная проводимость**. Изменяя концентрацию примеси, можно значительно изменять число носителей заряда того или иного знака. Благодаря этому можно создавать полупроводники с преимущественной концентрацией одного из носителей тока электронов или дырок. Эта особенность полупроводников открывает широкие возможности для их практического применения.

Донорные примеси. Оказывается, что при наличии примесей, например атомов мышьяка, даже при очень малой их концентрации, число свободных электронов возрастает во много раз. Происходит это по следующей причине. Атомы мышьяка имеют пять валентных электронов. Четыре из них участвуют в создании ковалентной связи данного атома с окружающими, например с атомами кремния. Пятый валентный электрон оказывается слабо связанным с атомом. Он легко покидает атом мышьяка и становится свободным (*рис.16.8*).

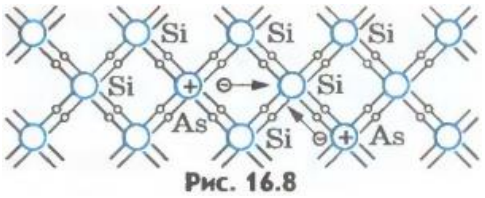


Рис. 16.8

При добавлении одной десятимиллионной доли атомов мышьяка концентрация свободных электронов становится равной 10^{16} см$^{-3}$. Это в тысячу раз больше концентрации свободных электронов в чистом полупроводнике.

Примеси, легко отдающие электроны и, следовательно, увеличивающие число свободных электронов, называют **донорными** (отдающими) **примесями**.

Поскольку полупроводники, имеющие донорные примеси, обладают большим числом электронов (по сравнению с числом дырок), их называют полупроводниками *n*-типа (от английского слова negative – отрицательный). В полупроводнике *n*-типа электроны являются *основными* носителями заряда, а дырки – *неосновными*.

Акцепторные примеси. Если в качестве примеси использовать индий, атомы которого трехвалентны, то характер проводимости полупроводника меняется. Теперь для образования нормальных парноэлектронных связей с соседями атому индия недостает одного электрона. В результате образуется дырка. Число дырок в кристалле равно числу атомов примеси (*рис.16.9*). Такого рода примеси называют **акцепторными**(принимающими).

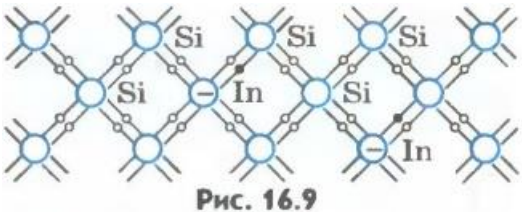


Рис. 16.9

При наличии электрического поля дырки перемещаются по полю и возникает дырочная проводимость. Полупроводники с преобладанием дырочной проводимости над электронной называют полупроводниками *p*-типа (от английского слова positive – положительный). Основными носителями заряда в полупроводнике *p*-типа являются дырки, а неосновными – электроны.

Донорные примеси отдают лишние валентные электроны: образуется полупроводник *n*-типа. Акцепторные примеси создают дырки: образуется полупроводник *p*-типа.

Полупроводниковые приборы.

Транзисторы.

Транзистор – хитроумный прибор. Понять принципы работы транзистора нелегко, но ведь его сумели изобрести! Надеемся, что вы сможете понять, как он работает, даже по краткому описанию.

Рассмотрим один из видов транзисторов из германия или кремния с введенными в них донорными и акцепторными примесями. Распределение примесей таково, что создается очень тонкая (толщиной порядка нескольких микрометров) прослойка полупроводника *n*-типа между двумя слоями полупроводника *p*-типа (*рис.16.17*). Эту тонкую прослойку называют **основанием**, или **базой**.

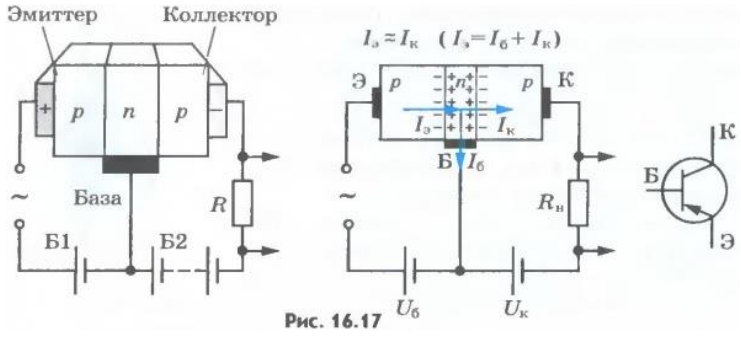


Рис. 16.17

В кристалле образуются два *p*-*n*-перехода, прямые направления которых противоположны. Три вывода от областей с различными типами проводимости позволяют включать транзистор в схему, изображенную на рисунке 16.17. В данной схеме левый *p*-*n*-переход является *прямым* и отделяет базу от области с проводимостью *p*-типа, называемую **эмиттером**. Если бы не было правого *p*-*n*-перехода, в цепи эмиттер-база существовал бы ток, зависящий от напряжения источников (батареи Б1 и источника переменного напряжения) и сопротивления цепи, включая малое сопротивление прямого перехода эмиттер-база.

Батарея Б2 включена так, что правый *p*-*n*-переход в схеме (см. рис. 16.17) является *обратным*. Он отделяет базу от правой области с проводимостью *p*-типа, называемой коллектором. Если бы не было левого p-n-перехода, сила тока в цепи коллектора была бы близка к нулю, так как сопротивление обратного перехода очень велико. При существовании же тока в левом *p*-*n*-переходе появляется ток и в цепи коллектора, причем сила тока в коллекторе лишь немного меньше силы тока в эмиттере. Это объясняется следующим. При создании напряжения между эмиттером и базой основные носители полупроводника *p*-типа (дырки) проникают в базу, где они являются уже *неосновными носителями*. Поскольку толщина базы очень мала и число основных носителей (электронов) в ней невелико, попавшие в нее дырки почти не объединяются (не рекомбинируют) с электронами базы и проникают в коллектор за счет диффузии. Правый p-n-переход закрыт для основных носителей заряда базы – электронов, но не для дырок. В коллекторе дырки увлекаются электрическим полем и замыкают цепь. Сила тока, ответвляющегося в цепь эмиттера из базы, очень мала, так как площадь сечения базы в горизонтальной (см. рис. 16.17) плоскости много меньше сечения в вертикальной плоскости.

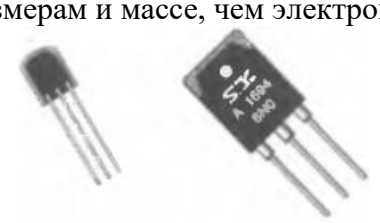
Сила тока в коллекторе, почти равная силе тока в эмиттере, изменяется вместе с током через эмиттер. Сопротивление резистора *R* мало влияет на ток в коллекторе, и это сопротивление можно сделать достаточно большим. Управляя током эмиттера с помощью источника переменного напряжения, включенного в его цепь, мы получим синхронное изменение напряжения на резисторе *R*.

При большом сопротивлении резистора изменение напряжения на нем может в десятки тысяч раз превышать изменение напряжения сигнала в цепи эмиттера. Это означает усиление напряжения. Поэтому на нагрузке *R* можно получить электрические сигналы, мощность которых во много раз превосходит мощность, поступающую в цепь эмиттера.

Применение транзисторов. Современная электроника базируется на микросхемах и микропроцессорах, включающих в себя колоссальное число транзисторов. Компьютеры, составленные из микросхем и микропроцессоров, фактически изменили окружающий человека мир. В настоящее время не существует ни одной области человеческой деятельности, где компьютеры не служили бы активными помощниками человека.

Например, в космических исследованиях или высокотехнологичных производствах работают микропроцессоры, уровень организации которых соответствует искусственному интеллекту.

Транзисторы (рис.16.18, 16.19) получили чрезвычайно широкое распространение в современной технике. Они заменяют электронные лампы в электрических цепях научной, промышленной и бытовой аппаратуры. Портативные радиоприемники, использующие такие приборы, в обиходе называются транзисторами. Преимуществом транзисторов (так же как и полупроводниковых диодов) по сравнению с электронными лампами является прежде всего отсутствие накаленного катода, потребляющего значительную мощность и требующего времени для его разогрева. Кроме того, эти приборы в десятки и сотни раз меньше по размерам и массе, чем электронные лампы. Работают они при более низких напряжениях.



$I \approx 0{,}1$ A $I = 10$ A

Рис. 16.18



$I = 50$ A $I \approx 400$ A

Рис. 16.19

Свойства *p*-*n*-перехода в полупроводниках используются для усиления и генерации электрических колебаний.

Электрический разряд в газе.

Процесс прохождения электрического тока через газ называют **газовым разрядом.**

Ионизация газов.

При комнатной температуре воздух очень плохой проводник. При нагревании проводимость воздуха возрастает. Увеличение проводимости воздуха можно вызвать и иными способами – действием излучений: ультрафиолетового, рентгеновского, радиоактивного и др.

При обычных условиях газы почти полностью состоят из нейтральных атомов или молекул и, следовательно, являются *диэлектриками*.

Вследствие нагревания или воздействия излучением часть атомов *ионизуется* – распадается на положительно заряженные ионы и электроны . В газе могут образовываться и отрицательные ионы, которые появляются благодаря присоединению электронов к нейтральным атомам.

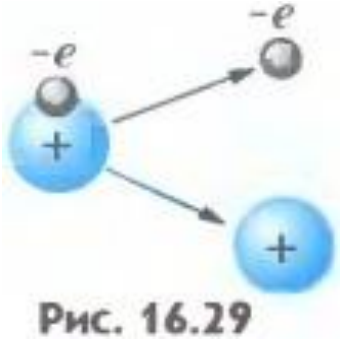


Рис. 16.29

Ионизация газов при нагревании объясняется тем, что по мере нагревания молекулы движутся все быстрее и быстрее. При этом некоторые молекулы начинают двигаться так быстро, что часть из них при столкновениях распадается, превращаясь в ионы. Чем выше температура, тем больше образуется ионов.

Проводимость газов. Механизм проводимости газов похож на механизм проводимости растворов и расплавов электролитов. Различие состоит в том, что отрицательный заряд переносится в основном не отрицательными ионами, как в водных растворах или расплавах электролитов, а электронами.

Таким образом, в газах сочетается электронная проводимость, подобная проводимости металлов, с ионной проводимостью, подобной проводимости водных растворов или расплавов электролитов. Существенно еще одно различие. В растворах электролитов образование ионов происходит вследствие ослабления внутримолекулярных связей под действием молекул растворителя (молекул воды). В газах образование ионов происходит либо при нагревании, либо за счет действия внешних ионизаторов, например излучений.

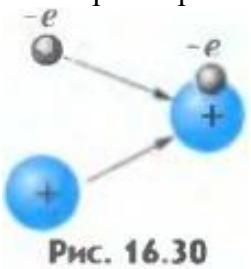


Рис. 16.30

Рекомбинация. Если ионизатор перестанет действовать, то можно заметить, что заряженный электрометр снова будет сохранять заряд. Это

показывает, что после прекращения действия ионизатора газ перестает быть проводником. Ток прекращается после того, как все ионы и электроны достигнут электродов. Кроме того, при сближении электрона и положительно заряженного иона они могут вновь образовать нейтральный атом. Схематически это изображено на рисунке 16.30. Такой процесс называют **рекомбинацией** заряженных частиц.

В отсутствие внешнего поля заряженные частицы исчезают только вследствие рекомбинации, и газ становится диэлектриком. Если действие ионизатора не прерывается, то устанавливается динамическое равновесие, при котором среднее число вновь образующихся пар заряженных частиц равно среднему числу пар, исчезающих вследствие рекомбинации.

При комнатных температурах газы являются диэлектриками. Нагревание газа или облучение ультрафиолетом, рентгеновскими и другими лучами вызывает ионизацию атомов или молекул газа. Газ становится проводником.

Несамостоятельный и самостоятельный разряды

Разряд в газе может происходить и без внешнего ионизатора. Разряд способен поддерживать сам себя. Почему это возможно?

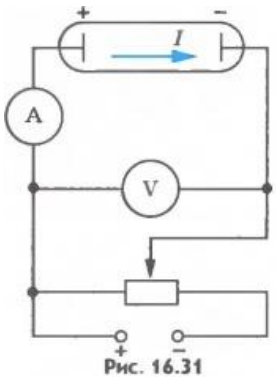


Рис. 16.31

Несамостоятельный разряд. Для исследования разряда в газе при различных давлениях удобно использовать стеклянную трубку с двумя электродами (*рис.16.31*).

Пусть с помощью какого-либо ионизатора в газе образуется в секунду определенное число пар заряженных частиц: положительных ионов и электронов.

При небольшой разности потенциалов между электродами трубки положительно заряженные ионы перемещаются к отрицательному электроду, а электроны и отрицательно заряженные ионы – к положительному электроду. В результате в трубке возникает электрический ток, т. е. *происходит газовый разряд*.

Не все образующиеся ионы достигают электродов; часть их воссоединяется с электронами, образуя нейтральные молекулы газа. По мере увеличения разности потенциалов между электродами трубки доля заряженных частиц, достигающих электродов, увеличивается. Возрастает и сила тока в цепи. Наконец, наступает момент, при котором все заряженные частицы, образующиеся в газе за секунду, достигают за это время электродов. При этом дальнейшего роста силы тока не происходит (*рис.16.32*). Ток, как говорят, достигает *насыщения*. Если действие ионизатора прекратить, то прекратится и разряд, так как других источников ионов нет. По этой причине такой разряд называют **несамостоятельным разрядом.**

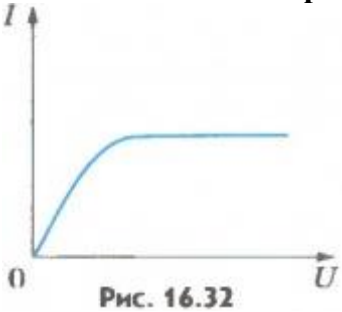


Рис. 16.32

Самостоятельный разряд. Что будет происходить с разрядом в газе, если продолжать увеличивать разность потенциалов на электродах?

Казалось бы, сила тока и при дальнейшем увеличении разности потенциалов должна оставаться неизменной. Однако опыт показывает, что в газах при увеличении разности потенциалов между электродами, начиная с некоторого ее значения, сила тока снова возрастает (*рис.16.33*). Это означает, что в газе появляются дополнительные ионы сверх тех, которые образуются за счет действия ионизатора. Сила тока может возрасти в сотни и тысячи раз, а число ионов, возникающих в процессе разряда, может стать таким большим, что внешний ионизатор будет уже не нужен для поддержания разряда. Если убрать внешний ионизатор, то разряд не прекратится. Так как разряд в этом случае не нуждается для своего поддержания во внешнем ионизаторе, его называют **самостоятельным разрядом**.

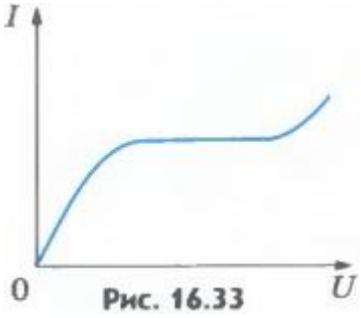


Рис. 16.33

Ионизация электронным ударом. Каковы же причины резкого увеличения силы тока в газе при больших напряжениях?

Рассмотрим какую-либо пару заряженных частиц (положительный ион и электрон), образовавшуюся благодаря действию внешнего ионизатора. Появившийся таким образом свободный электрон начинает двигаться к положительному электроду – аноду, а положительный ион – к катоду. На своем пути электрон встречает ионы и нейтральные атомы. В промежутках между двумя последовательными столкновениями кинетическая энергия электрона увеличивается за счет работы сил электрического поля. Чем больше разность потенциалов между электродами, тем больше напряженность электрического поля.

Кинетическая энергия электрона перед очередным столкновением пропорциональна напряженности поля и длине l свободного пробега электрона (пути между двумя последовательными столкновениями):

$$\frac{mv^2}{2} = eEl. \qquad (16.10)$$

Если кинетическая энергия электрона превосходит работу A_i, которую нужно совершить, чтобы ионизовать нейтральный атом, т. е.

$$\frac{mv^2}{2} \geqslant A_i,$$

то при столкновении электрона с атомом происходит ионизация (*рис.16.34*). В результате вместо одного свободного электрона образуются два (налетающий на атом и вырванный из атома). Эти электроны, в свою очередь, получают энергию в поле и ионизуют встречные атомы и т. д. Число заряженных частиц резко возрастает, возникает электронная лавина. Описанный процесс называют **ионизацией электронным ударом**. Но одна ионизация электронным ударом не может обеспечить длительный самостоятельный разряд. Действительно, ведь все возникающие таким образом электроны движутся по направлению к аноду и по достижении анода «выбывают из игры». Для существования разряда необходима эмиссия электронов с катода (*эмиссия* означает «испускание»). Эмиссия электронов может быть обусловлена несколькими причинами. Положительные ионы, образовавшиеся при столкновении свободных электронов с нейтральными атомами, при своем движении к катоду приобретают под действием поля большую кинетическую энергию. При ударах таких быстрых ионов о катод с поверхности последнего выбиваются электроны.

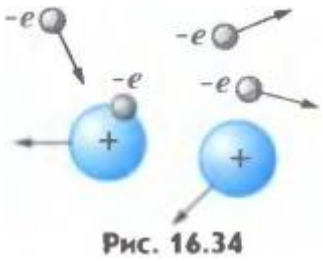


Рис. 16.34

Кроме того, катод может испускать электроны при нагревании его до высокой температуры. При самостоятельном разряде нагрев катода может происходить за счет бомбардировки его положительными ионами, что происходит, например, при дуговом разряде.

В газах при больших напряженностях электрических полей электроны достигают таких больших энергий, что начинается ионизация электронным ударом. Разряд становится самостоятельным и продолжается без внешнего ионизатора.

В разреженном газе самостоятельный разряд возникает при сравнительно небольших напряжениях. Благодаря малому давлению длина пробега электрона между двумя ударами велика, и он может приобрести энергию, достаточную для ионизации атомов. При таком разряде газ светится, цвет свечения зависит от рода газа. Свечение, возникающее при тлеющем разряде, широко используется для рекламы, для освещения помещения лампами дневного света.

В газах могут происходить самостоятельный и несамостоятельный разряды. Вид разряда зависит как от давления газа, так и от подаваемого напряжения.

До открытия уникальных свойств полупроводников в радиотехнике использовались исключительно электронные лампы. Откачивая газ из сосуда (трубки), можно дойти до такой его концентрации, при которой молекулы газа успевают пролететь от одной стенки сосуда к другой, ни разу не испытав соударений друг с другом. Такое состояние газа в трубке называют **вакуумом**.

Термоэлектронная эмиссия. Чаще всего действие такого источника заряженных частиц основано на свойстве тел, нагретых до высокой температуры, испускать электроны. Этот процесс называется **термоэлектронной эмиссией**. Его можно рассматривать как испарение электронов с поверхности металла.

Односторонняя проводимость. Явление термоэлектронной эмиссии приводит к тому, что нагретый металлический электрод, в отличие от холодного, непрерывно испускает электроны. Электроны образуют вокруг электрода *электронное облако*. Электрод заряжается положительно, и под влиянием электрического поля заряженного облака электроны из облака частично возвращаются на электрод. Различие между температурами горячих и холодных электродов, впаянных в сосуд, из которого откачан воздух, приводит к односторонней проводимости электрического тока между ними. При подключении электродов к источнику тока между ними возникает электрическое поле. Если положительный полюс источника тока соединен с холодным электродом (анодом), а отрицательный – с нагретым (катодом), то вектор напряженности электрического поля направлен к нагретому электроду. Под действием этого поля электроны частично покидают электронное облако и движутся к холодному электроду. Электрическая цепь замыкается, и в ней устанавливается электрический ток. При противоположной полярности включения источника напряженность поля направлена от нагретого электрода к холодному.

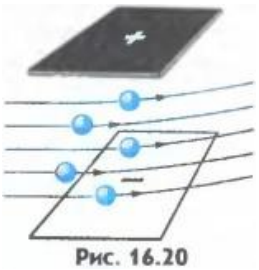
Электрическое поле отталкивает электроны облака назад к нагретому электроду. Цепь оказывается разомкнутой.

Диод. Односторонняя проводимость широко использовалась раньше в электронных приборах с двумя электродами – *вакуумных диодах*, которые служили, как и полупроводниковые диоды, для выпрямления электрического тока. Однако в настоящее время вакуумные диоды практически не применяются.

Для создания тока в вакууме необходим специальный источник заряженных частиц. Действие такого источника обычно основано на термоэлектронной эмиссии.

Электронные пучки. Электронно-лучевая трубка

Если в аноде электронной лампы сделать отверстие, то часть электронов, ускоренных электрическим полем, пролетит в это отверстие, образуя за анодом электронный пучок. Количеством электронов в пучке можно управлять, поместив между катодом и анодом дополнительный электрод и изменяя его потенциал.


Рис. 16.20

Свойства электронных пучков и их применение. Электронный пучок, попадая на тела, вызывает их нагревание. В современной технике это свойство используют для электронной плавки в вакууме сверхчистых металлов.

При торможении быстрых электронов, попадающих на вещество, возникает *рентгеновское излучение*. Это явление используют в рентгеновских трубках.

Некоторые вещества (стекло, сульфиды цинка и кадмия), бомбардируемые электронами, светятся. В настоящее время среди материалов этого типа (люминофоров) применяются такие, у которых в световую энергию превращается до 25% энергии электронного пучка.



Рис. 16.21

Электронные пучки отклоняются электрическим полем. Например, проходя между пластинами конденсатора, электроны отклоняются от отрицательно заряженной пластины к положительно заряженной (*рис.16.20*).

Электронный пучок отклоняет ся также в магнитном поле. Пролетая над северным полюсом магнита, электроны отклоняются влево, а пролетая над южным, отклоняются вправо (*рис.16.21*). Отклонение электронных потоков, идущих от Солнца, в магнитном поле Земли приводит к тому, что свечение газов верхних слоев атмосферы (полярное сияние) наблюдается только у полюсов.

Возможность управления электронным пучком с помощью электрического или магнитного поля и свечение покрытого люминофором экрана под действием пучка применяют в электронно-лучевой трубке.



Рис. 16.22

Электронно-лучевая трубка. Электронно-лучевая трубка – основной элемент одного из типов телевизоров и осциллографа – прибора для исследования быстропеременных процессов в электрических цепях (*рис.16.22*).

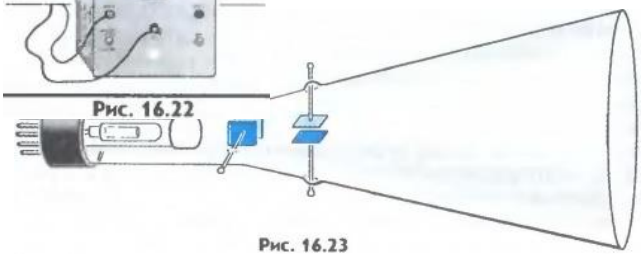


Рис. 16.23

Устройство электронно-лучевой трубки показано на рисунке 16.23. Эта трубка представляет собой вакуумный баллон, одна из стенок которого служит экраном. В узком конце трубки помещен источник быстрых электронов – *электронная пушка* (*рис.16.24*). Она состоит из катода, управляющего электрода и анода (чаще несколько анодов располагаются друг за другом). Электроны испускаются нагретым оксидным слоем с торца цилиндрического катода *C*, окруженного теплозащитным экраном *H*. Далее они проходят через отверстие в цилиндрическом управляющем электроде *B* (он регулирует число электронов в пучке). Каждый анод (A_1 и A_2) состоит из дисков с небольшими отверстиями. Эти диски вставлены в металлические цилиндры. Между первым анодом и катодом создается разность потенциалов в сотни и даже тысячи вольт. Сильное электрическое поле ускоряет электроны, и они приобретают большую скорость. Форма, расположение и потенциалы анодов выбирают так, чтобы наряду с ускорением электронов осуществлялась и фокусировка электронного пучка, т. е. уменьшение площади поперечного сечения пучка на экране почти до точечных размеров.

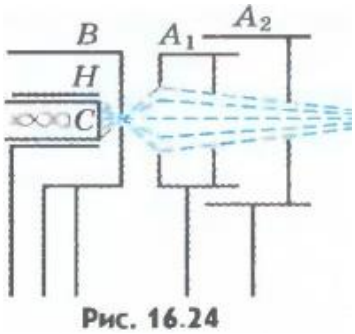


Рис. 16.24

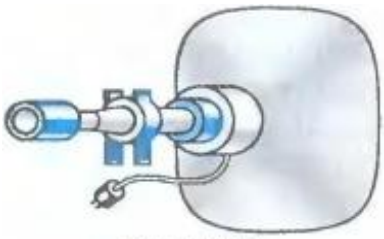
На пути к экрану пучок последовательно проходит между двумя парами управляющих пластин, подобных пластинам плоского конденсатора (см. рис. 16.23). Если электрического поля между пластинами нет, то пучок не отклоняется и светящаяся точка располагается в центре экрана. При сообщении разности потенциалов вертикально расположенным пластинам пучок смещается в горизонтальном направлении, а при сообщении разности потенциалов горизонтальным пластинам он смещается в вертикальном направлении.

Одновременное использование двух пар пластин позволяет перемещать светящуюся точку по экрану в любом направлении. Так как масса электронов очень мала, то они почти мгновенно, т. е. за очень короткое время, реагируют на изменение разности потенциалов управляющих пластин.

В электронно-лучевой трубке, применяемой в телевизоре (так называемом кинескопе), управление пучком, созданным электронной пушкой, осуществляется с помощью магнитного поля. Это поле создают катушки, надетые на горловину трубки (*рис.16.25*).

Цветной кинескоп содержит три разнесенные электронные пушки и экран мозаичной структуры, составленный из люминофоров трех типов (красного, синего и зеленого свечения). Каждый электронный пучок возбуждает люминофоры одного типа, свечение которых в совокупности создает на экране цветное изображение.

Широкое применение электронно-лучевые трубки находили в *дисплеях* – устройствах, присоединяемых к электронно-вычислительным машинам (ЭВМ). На экран дисплея, подобный экрану телевизора, поступает информация, записанная и переработанная ЭВМ. Можно непосредственно видеть текст на любом языке, графики различных процессов, изображения реальных объектов, а также воображаемые объекты, подчиняющиеся законам, записанным в программе вычислительной машины.


Рис. 16.25

В электронно-лучевых трубках формируются узкие электронные пучки, управляемые электрическими и магнитными полями. Эти пучки используются в осциллографах, кинескопах телевизоров, дисплеях ЭВМ.

Плазма

Подавляющая часть вещества Вселенной находится именно в состоянии плазмы. При очень низких температурах все вещества находятся в твердом состоянии. Их нагревание вызывает переход веществ из твердого состояния в жидкое. Дальнейшее повышение температуры приводит к превращению жидкостей в газ.

При достаточно больших температурах начинается ионизация газа за счет столкновений быстродвижущихся атомов или молекул. Вещество переходит в новое состояние, называемое *плазмой*.

Плазма – это частично или полностью ионизованный газ, в котором локальные плотности положительных и отрицательных зарядов практически совпадают. Таким образом, плазма в целом является электрически нейтральной системой. В зависимости от условий степень ионизации плазмы (отношение числа ионизованных атомов к их полному числу) может быть различной. В полностью ионизованной плазме нейтральных атомов нет.

Наряду с нагреванием, ионизация газа и образование плазмы могут быть вызваны различными излучениями или бомбардировкой атомов газа быстрыми заряженными частицами. При этом получается так называемая *низкотемпературная плазма*.

Свойства плазмы. Плазма обладает рядом специфических свойств, что позволяет рассматривать ее как особое, четвертое состояние вещества.

Из-за большой подвижности заряженные частицы плазмы легко перемещаются под действием электрических и магнитных полей. Поэтому любое нарушение электрической нейтральности отдельных областей плазмы, вызванное скоплением частиц одного знака заряда, быстро ликвидируется. Возникающие электрические поля перемещают заряженные частицы до тех пор, пока электрическая нейтральность не восстановится и электрическое поле не станет равным нулю.

В отличие от нейтрального газа, между молекулами которого существуют короткодействующие силы, между заряженными частицами плазмы действуют кулоновские силы, сравнительно медленно убывающие с расстоянием. Каждая частица взаимодействует сразу с большим количеством окружающих частиц. Благодаря этому, наряду с беспорядочным (тепловым) движением, частицы плазмы могут участвовать в разнообразных упорядоченных (коллективных) движениях. В плазме легко возбуждаются разного рода колебания и волны.

Проводимость плазмы увеличивается по мере роста степени ее ионизации. При высоких температурах полностью ионизованная плазма по своей проводимости приближается к сверхпроводникам.

Плазма в космическом пространстве. В состоянии плазмы находится подавляющая (около 99%) часть вещества Вселенной. Вследствие высокой температуры Солнце и другие звезды состоят в основном из полностью ионизованной плазмы.

Из плазмы состоит и межзвездная среда, заполняющая пространство между звездами и галактиками. Плотность межзвездной среды очень мала – в среднем менее одного атома на 1 $см^3$. Ионизация атомов межзвездной среды вызывается излучением звезд и космическими

лучами – потоками быстрых частиц, пронизывающими пространство Вселенной по всем направлениям. В отличие от горячей плазмы звезд температура межзвездной плазмы очень мала.

Плазмой окружена и наша планета. Верхний слой атмосферы на высоте 100-300 км представляет собой ионизованный газ – *ионосферу*. Ионизация воздуха в верхнем слое атмосферы вызывается преимущественно излучением Солнца и потоком заряженных частиц, испускаемых Солнцем. Выше ионосферы простираются радиационные пояса Земли, открытые с помощью спутников. Радиационные пояса также состоят из плазмы.

Многими свойствами плазмы обладают свободные электроны в металлах. В отличие от обычной плазмы в плазме твердого тела положительные ионы не могут перемещаться по всему телу.

Частично или полностью ионизованный газ называют плазмой. Звезды состоят из плазмы. Расширяется техническое применение плазмы.

Вопросы для закрепления:

1. Какую связь называют ковалентной?
2. В чем состоит различие зависимости сопротивления полупроводников и металлов от температуры?
3. Какие подвижные носители зарядов имеются в чистом полупроводнике?
4. Что происходит при встрече электрона с дыркой?
5. Почему сопротивление полупроводников сильно зависит от наличия примесей?
6. Какие носители заряда являются основными в полупроводнике с акцепторной примесью?
7. Какую примесь надо ввести в полупроводник, чтобы получить полупроводник *n*-типа?
8. Почему база транзистора должна быть узкой?
9. Как надо включать в цепь транзистор, у которого база является полупроводником *p*-типа, а эмиттер и коллектор – полупроводниками *n*-типа?
10. Почему сила тока в коллекторе почти равна силе тока в эмиттере?
11. При каких условиях несамостоятельный разряд в газах превращается в самостоятельный?
12. Почему ионизация электронным ударом не может обеспечить существование разряда в газах?

29. Магнитное поле и его свойства. Закон Ампера. Закон Био-Савара-Лапласа. Магнитное поле прямого тока, кругового тока, соленоида.

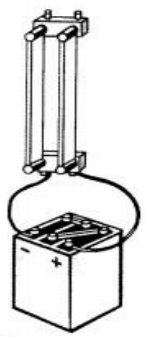
Магнитные взаимодействия. Между неподвижными электрическими зарядами действуют силы, определяемые законом Кулона. Согласно теории близкодействия это взаимодействие осуществляется так: каждый из зарядов создает электрическое поле, которое действует на другой заряд.

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.

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, называются магнитными силами.


Рис. 1.1

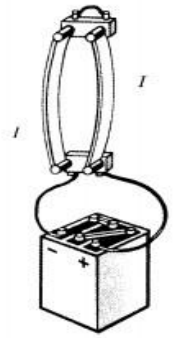


Рис. 1.2



Рис. 1.3

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 (направленон 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.

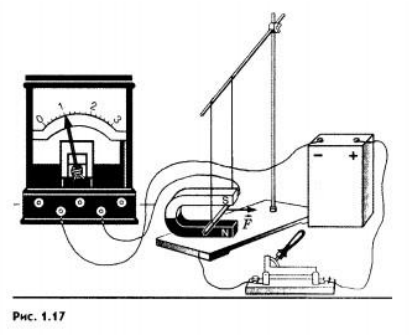
Экспериментальным доказательством реальности магнитного поля, как и реальности электрического поля, может служить факт существования электромагнитных волн.

Ампер установил закон для силы взаимодействия между двумя небольшими участками (элементами) проводников с током. Он был сторонником теории дальнодействия 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.

Ампер Андре Мари (1775—1836) — великий французский физик и математик, один из основоположников электродинамики. Ввел в физику понятие «электрический ток» и разработал первую теорию магнетизма, основанную на гипотезе молекулярных токов, открыл механическое взаимодействие электрических токов и установил количественные соотношения для силы этого взаимодействия. Назван Максвеллом «Ньютон электричества». Работал также в области механики, теории вероятностей и математического анализа.

Поле магнита сосредоточено в основном между его полюсами, поэтому магнитная сила действует практически только на часть проводника длиной Δl, расположенную непосредственно между полюсами. Сила $\vec{F}$ измеряется с помощью специальных весов,

связанных с проводником двумя стерженьками. Она направлена горизонтально, перпендикулярно проводнику и линиям магнитной индукции.


Рис. 1.17

Увеличивая силу тока в 2 раза, можно заметить, что и действующая на проводник сила также увеличивается в 2 раза. Добавив еще один такой же магнит, мы в 2 раза увеличим размеры области, где существует магнитное поле, и тем самым в 2 раза увеличим длину части проводника, на которую действует магнитное поле. Сила при этом также увеличится в 2 раза. И наконец, сила Ампера зависит от угла, образованного вектором $\vec{B}$ с проводником.

В этом можно убедиться, меняя наклон подставки, на которой находятся магниты, так, чтобы изменялся угол между проводником и линиями магнитной индукции. Сила достигает максимального значения $\vec{F}_m$, когда вектор магнитной индукции перпендикулярен проводнику.

Итак, максимальная сила, действующая на отрезок проводника длиной Δl, по которому идет ток, прямо пропорциональна произведению силы тока I на длину участка Δl: $F_m \sim I \cdot \Delta l$.

Этот опытный факт можно использовать для определения модуля вектора магнитной индукции. В самом деле, F_m $I\Delta l$, то отношение $\frac{F_m}{I\Delta l}$ не будет зависеть ни от силы тока и проводнике, ни от длины участка проводника. Именно поэтому это отношение можно принять за характеристику магнитного поля в том месте, где расположен участок проводника длиной Δl.

Модуль вектора магнитной индукции определяется отношением максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на отрезок проводника с током, к произведению силы тока на длину этого отрезка:

$$B = \frac{F_m}{I\Delta l}. \qquad (1.1)$$

Магиичное поле полностью характеризуется вектором магнитной индукции $\vec{B}$. В каждой точке магнитного поля можно определить направление вектора магнитной индукции и его модуль, если измерить силу, действующую на отрезок проводника с током.

Модуль силы Ампера. Пусть вектор магнитной индукции $\vec{B}$ составляет угол α (рис. 1.18) с направлением отрезка проводника с током (элементом тока). (За направление элемента тока принимают направление, в котором по проводнику идет ток.) Опыт показывает, что магнитное поле, вектор индукции которого направлен вдоль проводника с током, не оказывает никакого действия на ток. Модуль силы зависит лишь от модуля составляющей вектора $\vec{B}$, перпендикулярной проводнику, т. е. от $B_\perp = B \sin\alpha$, и не зависит от составляющей $\vec{B}_1$, направленной вдоль проводника.

Максимальная сила Ампера согласно формуле (1.1) равна: $F_m = I\,\Delta l\,B,$ ей соответствует угол $\alpha = \frac{\pi}{2}$. При произвольном значении угла а сила пропорциональна не В, а составляющей $B_\perp = B\sin\alpha$.

Поэтому выражение для силы F, действующей на малый отрезок проводника Δl, при силе тока в нем l, со стороны магнитного поля с индукцией $\vec{B}$, составляющей с элементом тока угол α, имеет вид

$$F = I\,|\vec{B}|\,\Delta l \sin\alpha. \qquad (1.2)$$

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 $\vec{B}$.

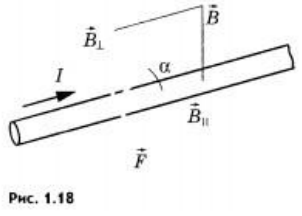


Рис. 1.18

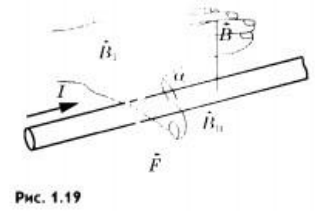


Рис. 1.19

Магнитная стрелка. Мы видели, что в магнитном поле рамка с током на гибком подвесе, со стороны которого не действуют силы упругости, препятствующие ориентации рамки, поворачивается до тех пор, пока она не установится определенным образом. Вам известно, что так же ведет себя и магнитная стрелка – маленький продолговатый магнит с двумя полюсами на концах – южным S и северным N.

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.

Это направление совпадает с направлением положительной нормали к замкнутому контуру с током. Положительная нормаль направлена в ту сторону, куда перемещается буравчик (с правой нарезкой), если вращать его по направлению тока в рамке.

Используя рамку с током или магнитную стрелку, можно определить направление вектора магнитной индукции в любой точке поля.

В магнитном поле прямолинейного проводника с током магнитная стрелка в каждой точке устанавливается по касательной к окружности. Плоскость такой окружности перпендикулярна проводу, а центр ее лежит на оси провода.

Направление вектора магнитной индукции устанавливают с помощью правила буравчика: если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление враш,ения ручки буравчика указывает направление вектора магнитной индукции.

Опыт по определению направления вектора индукции магнитного поля Земли проводит каждый, кто ориентируется на местности по компасу.

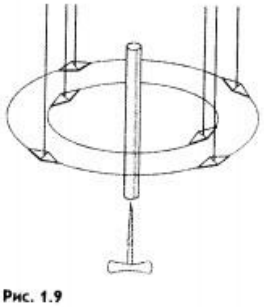
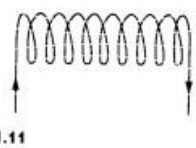

Рис. 1.9



Рис. 1.10


Рис. 1.11

Линии магнитной индукции. Наглядную картину магнитного поля можно получить, если построить так называемые ***линии магнитной индукции***. Линиями магнитной индукции называют линии, касательные к которым в любой их точке совпадают с вектором $\vec{B}$ в данной точке поля (рис. 1.10). Линии вектора магнитной индукции аналогичны линиям вектора напряженности электростатического поля.

Для магнитного поля прямолинейного проводника с током из приведенных ранее опытов следует, что линии магнитной индукции – концентрические окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной этому проводнику с током (см. рис. 1.9). Центр окружностей находится на оси проводника. Стрелки на линиях указывают, в какую сторону направлен вектор магнитной индукции, касательный к данной линии.

На рисунке 1.11 показана картина магнитного поля катушки с током (соленоида). Если длина соленоида много больше его диаметра, то магнитное поле внутри соленоида можно считать однородным. Линии магнитной индукции такого поля параллельны и находятся на равных расстояниях друг от друга.



Рис. 1.12

На рисунке 1.12 показано магнитное поле Земли. Линии магнитной индукции поля Земли подобны линиям магнитной индукции поля соленоида.

Магнитный северный полюс N близок к Южному географическому полюсу, а магнитный южный полюс S – к Северному географическому полюсу. Ось такого большого магнита составляет с осью вращения Земли угол 11,5°. Периодически магнитные полюсы меняют свою полярность. Последняя такая замена произошла около 30 000 лет назад.

Вопросы для закрепления:

1. Какие взаимодействия называют магнитными?
2. Перечислите основные свойства магнитного поля
3. Как перемещается замкнутый контур с током и магнитная стрелка в однородном магнитном поле?
4. Укажите способы определения направления вектора магнитной индукции?
5. Что называют линиями магнитной индукции?
6. Какие поля называют вихревыми?

30. Сила Лоренца. Действие магнитного поля, движущиеся электрические заряды. Магнитные свойства вещества.

Единица магнитной индукции. Мы ввели новую величину – вектор магнитной индукции. ***За единицу модуля век тора магнитной индукции можно принять магнитную индукцию однородного поля, в котором на отрезок провод пика длиной 1 м при силе тока в нем 1 А действует со стороны поля максимальная сила F_m= 1 Н***. Согласно формуле (1.1) единица магнитной индукции равна $1\frac{\text{Н}}{\text{А}\cdot\text{м}}$.

Единица магнитной индукции получила название тесла (Тл) в честь югославского ученого-электротехника II. Тее л а (1856—1943).

Измеряя силу, действующую со стороны магнитного поля на участок проводника с током, можно определить модуль вектора магнитной индукции. Сформулирован закон Ампера для силы, действующей на участок проводника с током в магнитном поле.

Электрический ток – это упорядоченно движущиеся наряженные 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.

Модуль силы Лоренца.

Модуль силы Лоренца равен отношению модуля силы F, действующей на участок проводника длиной Δl, к числу N заряженных частиц, упорядоченно движущихся в этом участке проводника:

$$F_{Л} = \frac{F}{N}. \qquad (1.3)$$

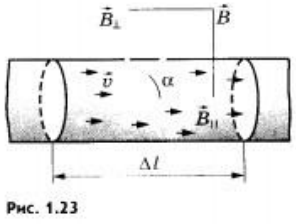


Рис. 1.23

Пусть длина отрезка Δl 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:

$$I = qnvS. \qquad (1.4)$$

Модуль силы, действующей со стороны магнитного поля на выбранный элемент тока, равен:

$$F = |I| B\Delta l \sin\alpha.$$

Подставляя в эту формулу выражение (1.4) для силы тока, получаем:

$$F = |q| nvS\Delta l B \sin\alpha = v|q|NB\sin\alpha,$$

где N=nS Δl – число заряженных частиц в рассматриваемом объеме. Следовательно, на каждый движущийся заряд со стороны **магнитного поля** действует сила Лоренца, равная:

$$F_{Л} = \frac{F}{N} = |q| vB\sin\alpha, \qquad (1.5)$$

где α – угол между вектором скорости и вектором магнитной индукции. Направление определяется с помощью правила левой руки: если левую руку расположить так, чтобы составляющая магнитной индукции $\vec{B}$, входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по движению положительного заряда (против движения отрицательного), то отогнутый на 90° большой палец укажет направление действующей на заряд силы Лоренца ***F**л*.

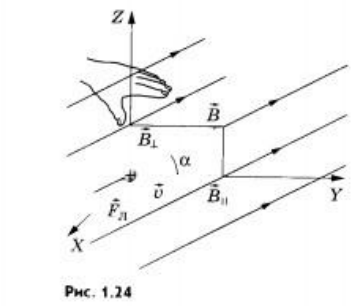


Рис. 1.24

Электрическое поле действует на заряд q с силой $\vec{F}_{эл} = q\vec{E}$***. Следовательно, если есть и электрическое поле, и магнитное поле, то суммарная сила*** $\vec{F}$***, действующая на заряд, равна:*** $\vec{F} = \vec{F}_{эл} + \vec{F}_{л}$.

Так как сила Лоренца перпендикулярна скорости частицы, то она не совершает работы. Согласно теореме о кинетической энергии означает, что сила Лоренца не меняет кинетическую энергию частицы и, следовательно, модуль ее скорости. Под действием силы Лоренца меняется лишь направление скорости частицы.

Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле. *Рассмотрим движение частицы с зарядом q в однородном магнитном поле* $\vec{B}$*, направленном перпендикулярно к начальной скорости частицы* $\vec{v}$*(рис. 1.25).*

Сила Лоренца зависит от модулей векторов скорости частицы и индукции магнитного поля.

Так как магнитное поле не меняет модуль скорости движущейся частицы, то остается неизменным и модуль силы Лоренца. Эта сила перпендикулярна скорости и, следовательно, определяет центростремительное ускорение частицы. Неизменность по модулю

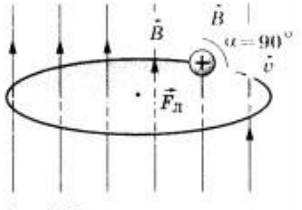


Рис. 1.25

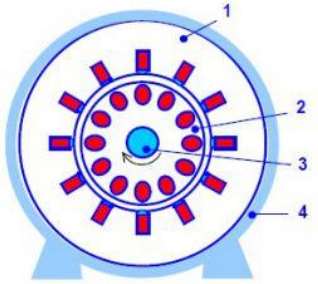
центростремительного ускорения частицы, движущейся с постоянной по модулю скоростью, означает, что частица равномерно движется по окружности радиусом r. Определим этот радиус.

Использование действия магнитного поля на движущийся заряд. Действие магнитного поля на движущийся заряд широко используют в современной технике (телевизионные трубки (кинескопы), в которых летящие к экрану электроны отклоняются с помощью магнитного поля, создаваемого особыми катушками).

На действии магнитного поля основано также и устройство приборов, позволяющих разделять заряженные частицы по их уденьиым зарядам, т. е. по отношению заряда частицы к ее массе, и по полученным результатам точно определять массы частиц. Такие приборы получили название масс-электрографов. Вакуумная камера прибора помещена в магинитое поле (вектор индукции $\vec{B}$перпендикулярен рисунку). Ускорение электрическим полем заряженные частицы (электроны или ионы), описав дугу, попадают на фотопластинку, где оставляют след, позволяющий с высокой точностью измерить радиус траектории r. По этому радиусу определяется удельный заряд иона. Зная заряд иона, легко вычислить его массу.

На движущуюся заряженную часчицу со стороны магнитного поля действует сила Лоренца. Эта сила перпендикулярна скорости и не совершает работы.

Электродвигатель. Устройство и принцип действия электродвигателя.



Принцип устройства короткозамкнутого асинхронного двигателя.
1- статор, 2 – ротор, 3 - вал, 4 – корпус.

Электродвигатель преобразует электроэнергию в энергию механического движения. Так же как и электрический генератор электродвигатель состоит обычно из статора и ротора, относясь к вращающимся электрическим машинам Выпускаются однако, двигатели у которых движущаяся часть совершает линейное (обычно прямолинейное движение (линейные двигатели).

Самым распространенным видом электродвигателей является **трехфазный короткозамкнутый асинхронный двигатель** принцип устройства которого представлен на рисунке, роторная обмотка этого двигателя представляет собой систему массивных медных или алюминиевых стержней, размещенных параллельно друг другу в пазах ротора концы которых соединены между собой короткозамкнутыми кольцами.

Магнитное поле создается не только электрическими токами, но и постоянными магнитами.

Намагничивание вещества. Постоянные магниты могут быть изготовлены лишь из сравнительно немногих веществ, но все вещества, помещенные в магнитное поле, намагничеваются т. е. сами становятся источниками магнитного поля. В результате этого вектор магнитной индукции при наличии вещества отличается от вектора магнитной индукции в вакууме.

Гипотеза Ампера. Причина, вследствие которой тела обладают магнитными свойствами, была установлена французским ученым Ампером. Сначала, под непосредственным впечатлением от наблюдения за поворачивающейся вблизи проводника с током магнитной стрелкой в опытах Эрстеда Лмиер предположил, что магнетизм Земли вызван токами, проходящими внутри земного шара. Главный шаг был сделан: магнитные

свойства тела можно объяснить циркулирующими внутри него токами. Далее Ампер пришел к общему заключению: магнитные свойства любого тела определяются замкнутыми электрическими токами внутри него. Этот решающий шаг от возможности объяснения магнитных свойств тела токами к категорическому утверждению, что магнитные взаимодействия – это взаимодействия токов, – свидетельство большой научной смелости Ампера.

Согласно гипотезе Ампера внутри молекул и атомов циркулируют элементарные электрические токи. (Теперь мы хорошо знаем, что эти токи образуются вследствие движения электронов в атомах.) Если плоскости, в которых циркулируют эти токи, расположены беспорядочно по отношению друг к другу из-за теплового движения молекул (рис. 1.28, а), то их действия взаимно компенсируются, и никаких магнитных свойств тело не обнаруживает. В намагниченном состоянии элементарные токи в теле ориентированы так, что их действия складываются (рис. 1.28, б).

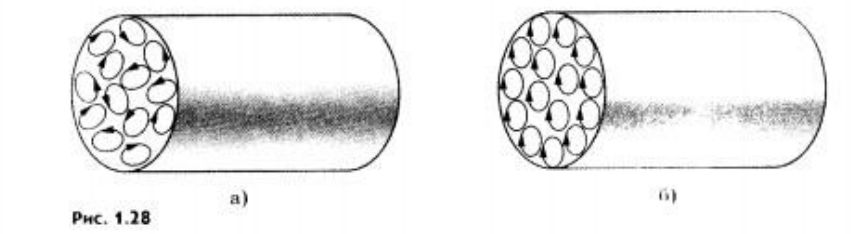


Рис. 1.28

Гипотеза Ампера объясняет, почему магнитная стрелка и рамка (контур) с током в магнитном поле ведут себя одинаково. Стрелку можно рассматривать как совокупность маленьких контуров с током, ориентированных одинаково.

Наиболее сильные магнитные поля создают вещества, называемые ферромагнетиками. Магнитные поля создаются ферромагнетиками не только вследствие обращения электронов вокруг ядер, но и вследствие их собственного вращения.

Собственный вращательный момент (момент импульса) электрона называется спином. Электроны всегда как бы вращаются вокруг своей оси и, обладая зарядом, создают магнитное поле наряду с полем, появляющимся за счет их орбитального движения вокруг ядер. В ферромагнетиках существуют области с параллельными ориентациями спинов, называемые доменами; размеры доменов порядка 0,5 мкм. Параллельная ориентация спинов обеспечивает минимум потенциальной энергии. Если ферромагнетик не намагничен, то ориентация доменов хаотична, и суммарное магнитное поле, создаваемое доменами, равно нулю. При включении внешнего магнитного поля домены ориентируются вдоль линий магнитной индукции этого поля, и индукция магнитного поля в ферромагнетиках увеличивается, становясь в тысячи и даже миллионы раз больше индукции внешнего поля.

Температура Кюри. При температурах, больших некоторой определенной для данного ферромагнетика, его ферромагнитные свойства исчезают. Эту температуру называют температурой Кюри по имени открывшего данное явление французского ученого. Если достаточно сильно нагреть намагниченный гвоздь, то он потеряет способность притягивать к себе железные предметы. Температура Кюри для железа 753 °С, для никеля 365 °С, а для кобальта 1000 °С. Существуют ферромагнитные сплавы, у которых температура Кюри меньше 100 °С.

Первые детальные исследования магнитных свойств ферромагнетиков были выполнены выдающимся русским физиком А. Г. Столетовым (1839—1896).

Магнитная проницаемость.

Многочисленные опыты свидетельствуют о том, что все вещества, помещенные в магнитное поле, намагничиваются и создают собственное магнитное поле, действие которого складывается с действием внешнего магнитного поля. При этом вещество может либо усиливать, либо ослаблять магнитное поле. Влияние вещества на внешнее магнитное поле характеризуется величиной $\boldsymbol{\mu}$, которая называется **магнитной проницаемостью вещества**

$$\mu = BB0$$

Магнитная проницаемость – это физическая скалярная величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в данном веществе отличается от индукции магнитного поля в вакууме.

Все вещества состоят из молекул, молекулы – из атомов. Электронные оболочки атомов можно условно рассматривать состоящими из круговых электрических токов, образованных движущимися электронами. Круговые электрические токи в атомах должны создавать собственные магнитные поля. На электрические токи должно оказывать действие внешнее магнитное поле, в результате чего можно ожидать либо усиления магнитного поля при сонаправленности атомных магнитных полей с внешним магнитным полем, либо их ослабления при их противоположной направленности.

Гипотеза о **существовании магнитных полей в атомах** и возможности изменения магнитного поля в веществе полностью соответствует действительности. Все **вещества по действию на них внешнего магнитного поля** можно разделить на три основные группы: **диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.**

Ферромагнетики и их применение. Хотя ферромагнитных тел в природе не так уж много, именно их магнитные свойства получили наибольшее практическое применение. Железный или стальной сердечник в катушке во много раз усиливает создаваемое ею магнитное поле, не увеличивая силу тока в катушке. Это экономит электроэнергию. Сердечники трансформаторов, генераторов, электродвигателей и т. д. изготовляют из ферромагнетиков.

При выключении внешнего магнитного поля ферромагнетик остается намагниченным, т. е. создает магнитное поле в окружающем пространстве. Это объясняется тем, что домены не возвращаются в прежнее положение и их ориентация частично сохраняется. Благодаря этому существуют постоянные магниты.

Постоянные магниты находят широкое применение в электроизмерительных приборах, громкоговорителях и телефонах, звукозаписывающих аппаратах, магнитных компасах и т. д.

Большое применение получили ферриты ферромагнитные материалы, не проводящие электрического тока. Они представляют собой химические соединения оксидов железа с оксидами других веществ. Один из известных ферромагнитных материалов – магнитный железняк – является ферритом.

Магнитная запись информации. Из ферромагнегикои изготовляют магнитные ленты и тонкие магнитные пленки. Магнитные ленты широко используют для звукозаписи в магнитофонах и для видеозаписи в видеомагнитофонах.

Магнитная лента представляет собой гибкую основу из полихлорвинила или других веществ. На нее наносится рабочий слой в виде магнитного лака, состоящего из очень мелких игольчатых частиц железа или другого ферромагнетика и связующих веществ.

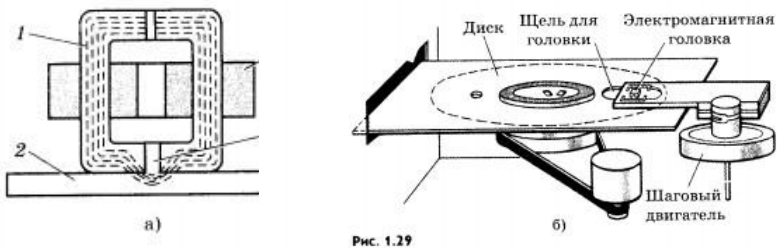


Рис. 1.29

Запись звука производят на ленту с помощью электромагнита, магнитное поле которого изменяется в такт со звуковыми колебаниями. При движении ленты вблизи магнитной головки различные участки пленки намагничиваются. Схема магнитной индукционной головки показана на рисунке 1.29, а, где 1 – сердечник электромагнита; 2 – магнитная лента; 3 – рабочий зазор; 4 – обмотка электромагнита.

При воспроизведении звука наблюдается обратный процесс: намагниченная лента возбуждает в магнитной головке электрические сигналы, которые после усиления поступают на динамик магнитофона.

Тонкие магнитные пленки состоят из слоя ферромагнитного материала толщиной от 0,03 до 10 мкм.

Их применяют в запоминающих устройствах электронно-вычислительных машин (ЭВМ). Магнитные пленки предназначены для записи, хранения и воспроизведения информации. Их наносят на тонкий алюминиевый диск или барабан. Информацию записывают и воспроизводят примерно так же, как и в обычном магнитофоне. Запись информации в ЭВМ можно производить и на магнитные ленты.

Развитие технологии магнитной записи привело к появлению магнитных микроголовок, которые используются в ЭВМ, позволяющих создавать немыслимую ранее плотность магнитной записи. На ферромагнитном жестком диске диаметром меньше 8 см хранится до нескольких терабайт (10^{12} байт) информации. Считывание и запись информации на таком диске осуществляется с помощью микроголовки, расположенной на поворотном рычаге (рис. 1.29, б). Сам диск вращается с огромной скоростью, и головка плавает над ним в потоке воздуха, что предотвращает возможность механического повреждения диска.

Все вещества, помещенные в магнитное поле, создают собственное поле. Наиболее сильные поля создают ферромагнетики. Из них делают постоянные магниты, так как поле ферромагнетика не исчезает после выключения намагничивающего поля. Ферромагнетики широко применяются на практике.

Вещества, в которых внешнее магнитное поле усиливается в результате сложения с магнитными полями электронных оболочек атомов вещества из-за ориентации атомных магнитных полей в направлении внешнего магнитного поля, называются **парамагнетиками** ($\mu>1$).

Парамагнетики очень слабо усиливают внешнее магнитное поле. Магнитная проницаемость парамагнетиков отличается от единицы лишь на доли процента. Например, магнитная проницаемость платины равна 1,00036. Из-за очень малых значений магнитной проницаемости парамагнетиков и диамагнетиков их влияние на внешнее поле или воздействие внешнего поля на парамагнитные или диамагнитные тела очень трудно обнаружить. Поэтому в обычной повседневной практике, в технике парамагнитные и диамагнитные вещества рассматриваются как немагнитные, то есть вещества, не изменяющие магнитное поле и не испытывающие действия со стороны магнитного поля. Примерами парамагнетиков являются натрий, кислород, алюминий ($\mu=1{,}00023$).

В *парамагнетиках* молекулы обладают собственным магнитным полем. В отсутствии внешнего магнитного поля из-за теплового движения вектора индукций магнитных полей атомов и молекул ориентированы хаотически, поэтому их средняя намагниченность равна нулю (рис. 4, а). При наложении внешнего магнитного поля на атомы и молекулы начинает действовать момент сил, стремящийся повернуть их так, чтобы их поля были ориентированы параллельно внешнему полю. Ориентация молекул парамагнетика приводит к тому, что вещество намагничивается (рис. 4, б).

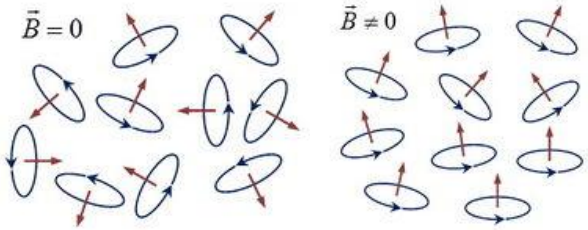


Рис. 4

Полной ориентации молекул в магнитном поле препятствует их тепловое движение, поэтому магнитная проницаемость парамагнетиков зависит от температуры. Очевидно, что с ростом температуры магнитная проницаемость парамагнетиков уменьшается.

Вопросы для закркпления:

1. В каких единицах измеряется магнитная индукция?
2. Чему равен модуль силы Лоренца?
3. Как движется заряженная частица в однородном магнитном поле, если начальная скорость частицы перпендикулярна линиям магнитной индукции?
4. Как определить направление силы Лоренца?
5. Как определяется магнитная проницаемость среды?
6. Что называют точкой Кюри?
7. Какие вещества называют ферромагнетиками?
8. Охарактеризовать пара-, диа-, ферромагнитные вещества?

31. Закон электромагнитной индукции. Определение направления индукционного тока. Правило Ленца.

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 электростанции мира, превращающих механическую энергию в энергию электрического тока. (Источники, работающие на других принципах: гальванические элементы, аккумуляторы и пр., – дают ничтожную долю вырабатываемой электрической энергии.)

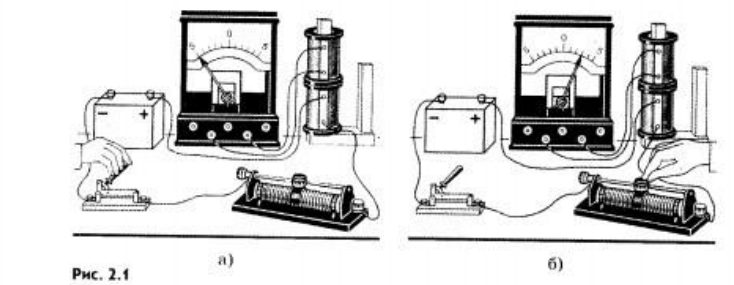


Рис. 2.1

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 и 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).

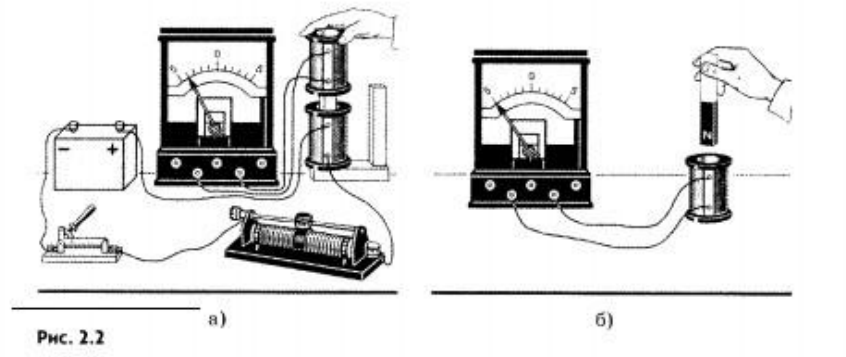


Рис. 2.2

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. 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).

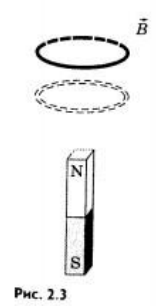


Рис. 2.3

В проводящем замкнутом контуре возникает электрический ток, если контур находится в переменном магнитном поле или движется в постоянном во времени магнитном поле так, что чисто линий магнитной индукции, пронизывающих контур, меняется.

Закон электромагнитной индукции.

Сформулируем закон электромагнитной индукции количественно. Опыты Фарадея показали, что сила индукционного тока l_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 Δt 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 прооирциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:***

$$I_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (2.3)$$

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 $\mathcal{E}_i$.

Согласно закону Ома для замкнутой цепи $I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$. 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. Закон электромагнитной индукции формулируется именно для ЭДС, а не для силы индукционнного тока, т. к. сила тока зависит и от свойств проводника, для 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:***

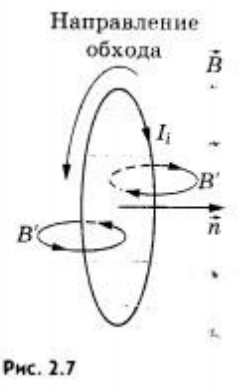


Рис. 2.7

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 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 Ф>0 и $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Согласно правилу Ленца индукционный ток создает магнитный поток Ф'<0. Линии индукции B' магнитного поля индукционного тока изображены па 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 $\mathcal{E}_i$ и $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ имеют разные знаки:

$$\mathcal{E}_i = \left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right|. \qquad \boxed{\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.} \qquad (2.4)$$

ЭДС индукции определяется скоростью изменения магнитного потока.

Вопросы для закрепления:

1. В чем главное отличие переменных электрических и магнитных полей от постоянных?
2. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
3. Как должен двигаться замкнутый проводящий контур в однородном магнитном попе, не зависящем от времени: поступательно или вращательно, чтобы в нем возник индукционный ток?
4. Что называется магнитным потоком (потоком магнитной индукции)?
5. Почему закон электромагнитной индукции формулируется для ЭДС, а не для силы тока?
6. Как формулируется закон электромагнитной индукции?
7. Почему в формуле для закона электромагнитной индукции стоит знак «-»?

32. ЭДС индукции в движущихся проводниках. Явление самоиндукции.

Если проводник движется в постоянном магнитном поле, то ЭДС индукции в проводнике обусловлена не вихревым электрическим полем, которое в этом случае не может возникнуть, а другой причиной.

При движении проводника его свободные заряды движутся вместе с ним. Поэтому на них со стороны магнитного поля действует сила Лоренца. Она-то и вызывает перемещение зарядов внутри проводника. ЭДС индукции, следовательно, имеет магнитное происхождение.

Вычислим ЭДС индукции, возникающую в проводнике, движущемся в однородном магнитном поле.

Пусть сторона контура MN длиной l скользит с постоянной скоростью υ вдоль сторон NC и MD, оставаясь все время параллельной стороне CD. Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ однородного поля перпендикулярен проводнику и составляет угол α с направлением его скорости.

Сила, с которой магнитное поле действует на движущуюся заряженную частицу, равна по модулю $F = q\upsilon B\sin\alpha$.

Направлена она вдоль проводника MN.

Работа данной силы на пути l положительна и равна $A = Fl = q\upsilon Bl\sin\alpha$.

ЭДС индукции в проводнике MN равна по определению отношению работы по перемещению заряда q к этому заряду.

$$\mathcal{E}_i = \frac{A}{q} = \upsilon Bl\sin\alpha$$

С другой стороны, ЭДС индукции можно вычислить с помощью закона эл/м индукции.

Магнитный поток через контур MNCD равен $\Phi = BS\cos(90-\alpha) = BS\sin\alpha$,

где угол 90° – α есть угол между вектором $\vec{B}$ и нормалью $\vec{n}$ к плоскости контура,

а S – площадь контура MNCD.

При перемещении проводника площадь S изменяется со временем следующим образом

$$S = l(NC - \upsilon t)$$

За время Δt площадь контура меняется на $\Delta S = -l\upsilon\Delta t$. Знак минус указывает на то, что она уменьшается.

Изменение магнитного потока за это время равно $\Delta\Phi = -Bl\upsilon\Delta t\sin\alpha$.

Следовательно, $\mathcal{E}_i = \dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t} = Bl\upsilon\sin\alpha$.

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 $\mathcal{E}_{is}$. 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.

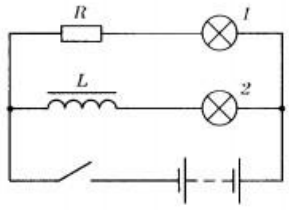


Рис. 2.13

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.

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).

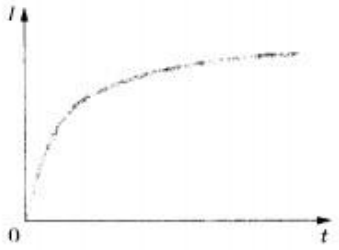


Рис. 2.14

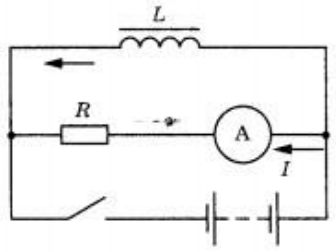


Рис. 2.15

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 $\mathcal{E}_{is}$ больше ЭДС $\mathcal{E}$ батареи элементов.

Вопросы для закрепления:

1. Что называют самоиндукцией?
2. Чему равна ЭДС самоиндукции?
3. Почему для создания тока источник должен затратить энергию?
4. Чем определяется ЭДС индукции?
5. Что означает знак «-» в выражении для определения ЭДС индукции?

Раздел 4. Колебания и волны

33. Механические колебания и волны. Звук и ультразвук. Колебательное движение. Механические колебания математического и пружинного маятников.

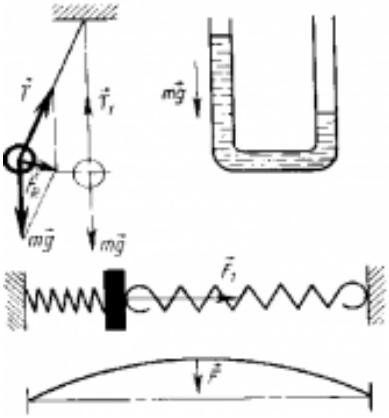
Колебания – процессы (изменения состояния), обладающие той или иной повторяемостью во времени.

Механические колебания – движения, которые точно или приблизительно повторяются во времени. Колебания называются периодическими, если значения физических величин, изменяющихся в процессе колебаний, повторяются через равные промежутки времени. (В противном случае колебания называются апериодическими).

Условия возникновения механических колебаний

Хотя бы одна сила должна зависеть от координат.

При выведении тела из положения устойчивого равновесия возникает равнодействующая, направленная к положению равновесия. С энергетической точки зрения это значит, что возникают условия для постоянного перехода кинетической энергии в потенциальную и обратно. Силы трения в системе малы.



Для возникновения колебания тело необходимо вывести из положения равновесия, сообщив либо кинетическую энергию (удар, толчок), либо – потенциальную (отклонение тела).

Примеры колебательных систем: нить, груз; пружина, груз; жидкость в U-образной трубке; струна.

***Свободные колебания* –** это колебания, которые возникают в системе под действием внутренних сил, после того как система была выведена из положения устойчивого равновесия. В реальной жизни все свободные колебания являются *затухающими* (т.е. их *амплитуда*, размах, уменьшается с течением времени).

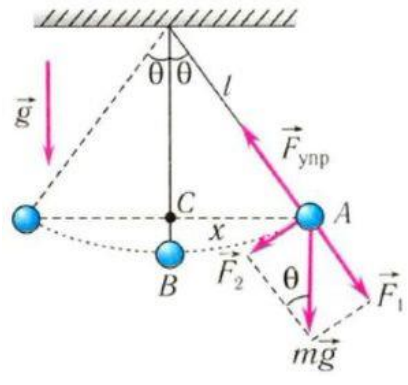
Математический маятник **– материальная точка, подвешенная на невесомой нерастяжимой нити (физическая модель).**

$\omega^2 = \frac{g}{l}$ **или** $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$ **– циклическая частота при колебаниях математического маятника.**

Период колебаний (формула Галилея) $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g}{l}}}$ **или** $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

Важнейший вывод: период колебаний математического маятника не зависит от массы тела и от амплитуды (при условии, что она достаточно мала).

Количественную зависимость между периодом маятника, его длиной и установили ускорением свободного падения.

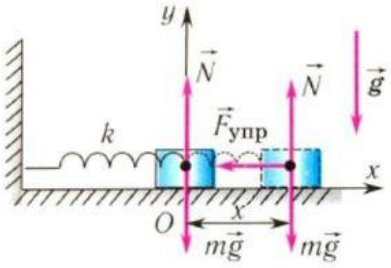


Период математического маятника пропорционален корню квадратному из отношения длины маятника к ускорению свободного падения.

Период математического маятника зависит только от ускорения свободного падения g и от длины маятника l. Из

полученной формулы следует, что период маятника не зависит от его массы

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



Циклическая частота пружинного маятника будет иметь вид:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Тогда период колебаний пружинного маятника будет равен:

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

Частота колебаний – **величина, обратная периоду колебаний, т. е. равная числу периодов колебаний (числу колебаний), совершаемых в единицу времени.**

Циклическая частота $\omega = \frac{2\pi}{T}$ $\nu = \frac{1}{T} = \frac{n}{t}$

Частота пружинного маятника $\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{m}{k}}$

Частота математического маятника $\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L}{g}}$

Вынужденными колебаниями называются незатухающие колебания системы, которые вызываются действием внешней периодической силы.

Характеристики колебательного процесса.

Смещение x – отклонение колеблющейся точки от положения равновесия в данный момент времени (**м**).

Амплитуда $\mathbf{x_м}$ – наибольшее смещение от положения равновесия (**м**). Если колебания незатухающие, то амплитуда постоянна.

Период **T** – время, за которое совершается одно полное колебание. Выражается в секундах (**с**).

За время, равное одному периоду (одно полное колебание) тело совершает перемещение, равное 0 и проходит путь, равный **2πr**.

Частота **ν** – число полных колебаний за единицу времени. В СИ измеряется в герцах (Гц).

Частота колебаний равна одному герцу, если за 1 секунду совершается 1 полное колебание.

1 Гц=1 $с^{-1}$.

$$\mathbf{T = \frac{t}{N}} \quad \mathbf{\nu = \frac{N}{t}} \quad \mathbf{T = \frac{1}{\nu}} \quad \mathbf{\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}} \quad \mathbf{T = \frac{2\pi}{\omega}}$$

Циклической (круговой) частотой ω **периодических колебаний наз. число полных колебаний, которые совершаются за** 2π **единиц времени (секунд). Единица измерения –** $с^{-1}$**.**

Фаза колебания – **φ** – физическая величина, определяющая смещение x в данный момент времени. Измеряется в радианах (рад).

Фаза колебания **в начальный момент времени (t=0) называется начальной фазой (φ_0).**

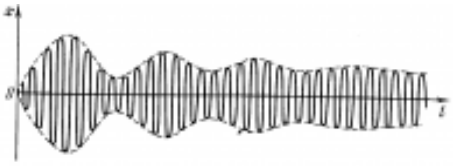
$$\varphi = \varphi_0 + \omega t$$

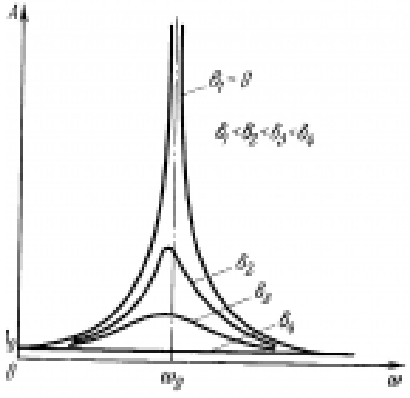
Если сила не будет периодической, то не возникнет и периодических колебаний. Например, если сила постоянна, то возникает ***статическое отклонение*** **системы.**

Примеры: колебания гребных винтов, лопаток турбины, качелей при раскачивании, мостов и балок при ходьбе и т.д.

Сила, вызывающая вынужденные колебания, называется ***вынуждающей (возмущающей) силой.***

Если внешняя вынуждающая сила изменяется по гармоническому закону $F = F_0 \cos \omega t$, то в системе устанавливаются гармонические колебания с частотой внешней вынуждающей силы (процесс установления колебаний изображен на рисунке: вынужденные колебания накладываются на свободные затухающие колебания; после того, как свободные колебания прекращаются, остаются только вынужденные).





Явление возрастания амплитуды колебаний при приближении частоты вынуждающей силы ω к собственной частоте колебательной системы ω_0, называется ***резонансом.***

Соответственно данная частота называется ***резонансной частотой.***

При наличии трения резонансная частота несколько меньше собственной частоты колебательной системы. С энергетической точки зрения при резонансе создаются наилучшие условия для передачи энергии от внешнего источника к колебательной системе.

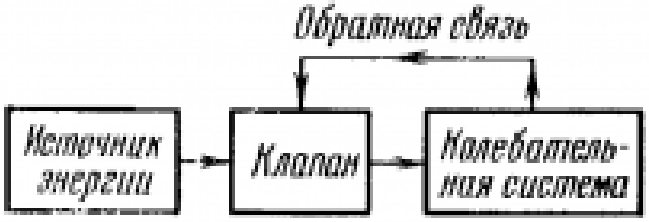
Резонанс применяется для измерения частоты (частотомеры) вибраций, в акустике. Резонанс необходимо учитывать при расчете балок, мостов, станков и т.д.

Колебательная система, совершающая незатухающие колебания за счет действия источника энергии, не обладающего колебательными свойствами (периодичностью), называется ***автоколебательной.***

Примеры: часы, орган, духовые инструменты, сердечно-сосудистая система, паровые машины и двигатели внутреннего сгорания и т.д.

Любая автоколебательная система состоит из 4 частей:

1. колебательная система;
2. источник энергии, компенсирующий потери энергии на преодоление сопротивления;
3. клапан – устройство, регулирующее поступление энергии в колебательную систему определенными порциями и в определенный промежуток времени;
4. обратная связь – устройство для обратного воздействия автоколебательной системы на клапан, управляющее работой клапана за счет процессов в самой колебательной системе.



Гармонические колебания.

Колебания, при которых изменения физических величин происходят по закону косинуса или синуса (гармоническому закону), называются ***гармоническими колебаниями***.

Например, в случае механических гармонических колебаний:

$$\boxed{x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0)} \quad \boxed{x = x_m \sin(\omega t + \varphi_0')}$$

В этих формулах ω **– частота колебания,** x_m **– амплитуда колебания,** φ_0 **и** φ_0' **– начальные фазы колебания. Приведенные формулы отличаются определением начальной фазы и при** $\varphi_0' = \varphi_0 + \pi/2$ **полностью совпадают.**

Это простейший вид периодических колебаний. Конкретный вид функции (синус или косинус) зависит от способа выведения системы из положения равновесия. Если выведение происходит толчком (сообщается кинетическая энергия), то при t=0 смещение x=0, следовательно, удобнее пользоваться функцией sin, положив $\varphi_0'=0$; при отклонении от положения равновесия (сообщается потенциальная энергия) при **t=0** смещение $\mathbf{x=x_m}$, следовательно, удобнее пользоваться функцией **cos** и $\boldsymbol{\varphi_0=0}$.

Выражение, стоящее под знаком **cos** или **sin**, называется *фазой колебания:* $\boxed{\varphi = \omega t + \varphi_0}$.

Фаза колебания измеряется в радианах и определяет значение смещения (колеблющейся величины) в данный момент времени.

Амплитуда колебания зависит только от ***начального отклонения*** (*начальной энергии, сообщенной колебательной системе).*

Скорость и ускорение при гармонических колебаниях.

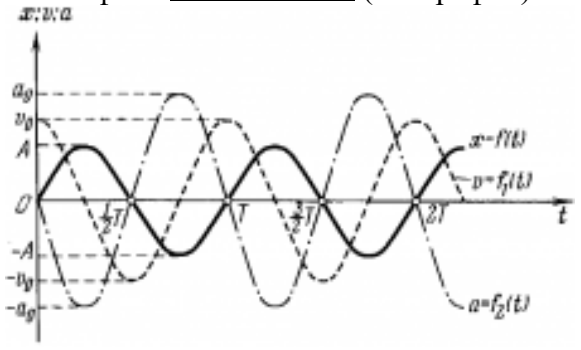
Согласно определению скорости, скорость – это производная от координаты по времени

$$\upsilon = x' = (x_m \sin(\omega t + \varphi_0))' = x_m \omega \cos(\omega t + \varphi_0) = x_m \omega \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi/2)$$

Таким образом, мы видим, что скорость при гармоническом колебательном движении также изменяется по гармоническому закону, но колебания скорости опережают колебания смещения по фазе на $\boldsymbol{\pi/2}$.

Величина $\upsilon_m = x_m \omega$ – максимальная скорость колебательного движения (амплитуда колебаний скорости).

Следовательно, для скорости при гармоническом колебании имеем: $\boxed{\upsilon = \upsilon_m \cos(\omega t + \varphi_0)}$, а для случая нулевой начальной фазы $\boxed{\upsilon = \upsilon_m \cos \omega t}$ (см. график).



Согласно определению ускорения, ускорение – это производная от скорости по времени: $\boxed{a = \upsilon' = (x')' = x''}$ – вторая производная от координаты по времени.

$$a = v' = (v_m \cos(\omega t + \varphi_0))' = (x_m \omega \cos(\omega t + \varphi_0))' =$$
$$= -x_m \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) = x_m \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi)$$

Ускорение при гармоническом колебательном движении также изменяется по гармоническому закону, но колебания ускорения опережают колебания скорости на π/2 и колебания смещения на π (говорят, что колебания происходят *в противофазе)*.

Величина $\boxed{x_m\omega^2 = a_m}$ – максимальное ускорение (амплитуда колебаний ускорения).

Следовательно, для ускорения имеем: $\boxed{a = -a_m \sin(\omega t + \varphi_0)}$, а для случая нулевой начальной фазы: $\boxed{a = -a_m \sin \omega t}$ (см. график).

Из анализа процесса колебательного движения, графиков и соответствующих математических выражений видно, что при прохождении колеблющимся телом положения равновесия (смещение равно нулю) ускорение равно нулю, а скорость тела максимальна (тело проходит положение равновесия по инерции), а при достижении амплитудного значения смещения – скорость равна нулю, а ускорение максимально по модулю (тело меняет направление своего движения).

Сравним выражения для смещения и ускорения при гармонических колебаниях:

$$x = x_m \sin \text{щ} t \quad \text{и} \quad a = -x_m \omega^2 \sin \omega t .$$

Можно записать: $\boxed{a = x'' = -\omega^2 x}$ – т.е. вторая производная смещения прямо пропорциональна (с противоположным знаком) смещению. Такое уравнение называют уравнением гармонического колебания. Эта зависимость выполняется для любого гармонического колебания, независимо от его природы. Поскольку мы нигде не использовали параметров конкретной колебательной системы, то от них может зависеть только циклическая частота.

$$\boxed{a = x'' = -\omega^2 x}$$

Часто бывает удобно записывать уравнения для колебаний в виде: $x = x_m \cos\frac{2\pi}{T} t$,

Где **T** – период колебания. Тогда, если время выражать в долях периода подсчеты будут упрощаться. Например, если надо найти смещение через 1/8 периода, получим:

$$t = \frac{T}{8} \Rightarrow x = x_m \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{8}\right) = x_m \cos\frac{\pi}{4} = x_m \frac{\sqrt{2}}{2} .$$

Аналогично для скорости и ускорения.

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

Колебания, возбужденные в какой-либо точке среды (твердой, жидкой или газообразной), распространяются в ней с конечной скоростью, зависящей от свойств среды, передаваясь от одной точки среды к другой. Чем дальше расположена частица среды от источника колебаний, тем позднее она начнет колебаться. Иначе говоря, фазы колебаний частиц среды и источника тем больше отличаются друг от друга, чем больше это расстояние. При изучении распространения колебаний не учитывается дискретное (молекулярное) строение среды и среда рассматривается как сплошная, т. е. непрерывно распределенная в пространстве и обладающая упругими свойствами.

Процесс распространения колебаний в сплошной среде называется волновым процессом (или волной).

При распространении волны частицы среды не движутся вместе с волной, а колеблются около своих положений равновесия. Вместе с волной от частицы к частице среды передаются лишь состояние колебательного движения и его энергия. Поэтому основным

свойством всех волн, независимо от их природы, является перенос энергии без переноса вещества.

Среди разнообразных волн, встречающихся в природе и технике, выделяются следующие их типы: волны на поверхности жидкости, упругие и электромагнитные волны. Упругими (или механическими) волнами называются механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде. Упругие волны бывают продольные и поперечные. В продольных волнах частицы среды колеблются в направлении распространения волны, в поперечных – в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны.

Продольные волны могут распространяться в средах, в которых возникают упругие силы при деформации сжатия и растяжения, т. е. твердых, жидких и газообразных телах. Поперечные волны могут распространяться в среде, в которой возникают упругие силы при деформации сдвига, т. е. фактически только в твердых телах; в жидкостях и газах возникают только продольные волны, а в твердых телах – как продольные, так и поперечные.

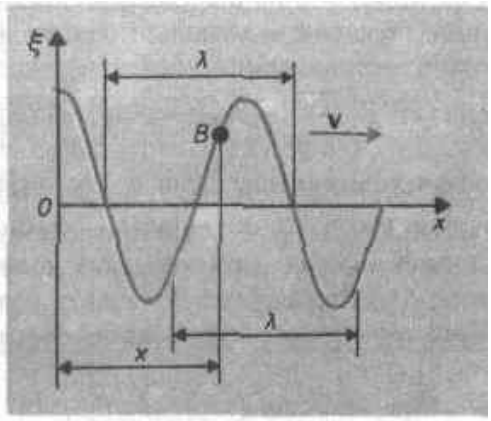


Рис. 220

Упругая волна называется гармонической, если соответствующие ей колебания частиц среды являются гармоническими. На рис. 220 представлена гармоническая поперечная волна, распространяющаяся со скоростью **v** вдоль оси **x**, т. е. приведена зависимость между смещением ζ частиц среды, участвующих в волновом процессе, и расстоянием **x** этих частиц (например, частицы B) от источника колебаний **O** для какого-то фиксированного момента времени **t**. Хотя приведенный график функции **I(x,t)** похож на график гармонического колебания, но они различны по существу. График волны дает зависимость смещения всех частиц среды от расстояния до источника колебаний в данный момент времени, а график колебаний – зависимость смещения данной частицы от времени.

Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется длиной волны λ, (рис.220). Длина волны равна тому расстоянию, на которое распространяется определенная фаза колебания за период, т. е.

$\lambda = vT$,

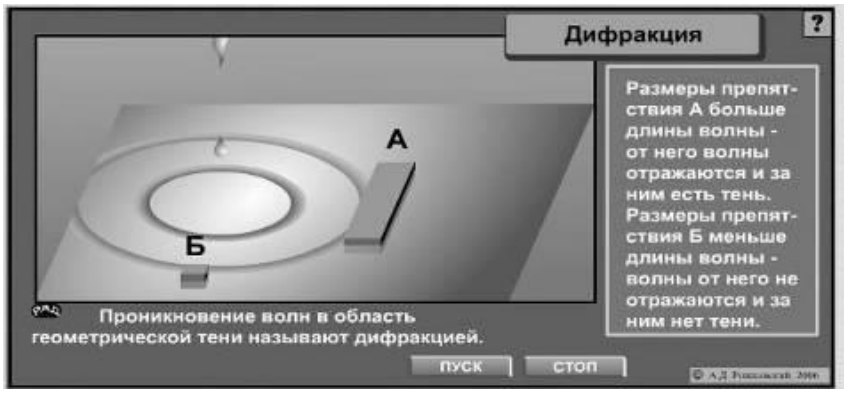
или, учитывая, что $T=1/v$, где v – частота колебаний,

$v=\lambda v$.

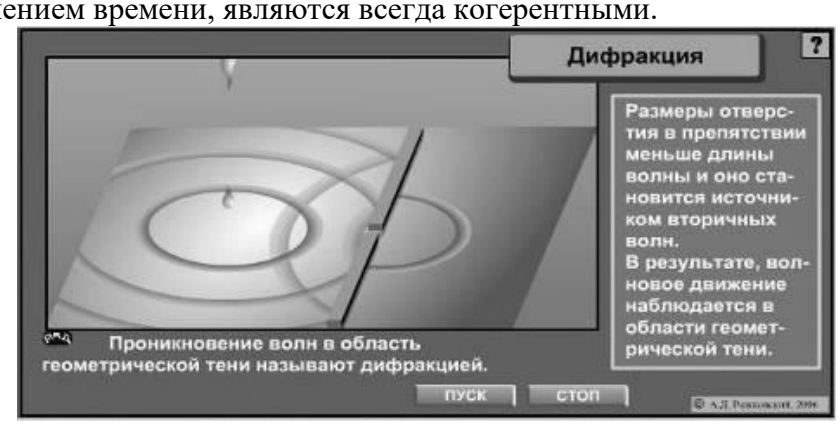
Если рассмотреть волновой процесс подробнее, то ясно, что колеблются не только частицы, расположенные вдоль оси **x**, а колеблется совокупность частиц, расположенных в некотором объеме, т. е. волна, распространяясь от источника колебаний, охватывает все новые и новые области пространства. Геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени **t**, называется волновым фронтом.

Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе, называется **волновой поверхностью**. Волновых поверхностей можно провести бесчисленное множество, а волновой фронт в каждый момент времени – один. Волновой фронт также является волновой поверхностью. В принципе волновые поверхности могут быть любой формы, а в простейшем случае они представляют собой совокупность плоскостей, параллельных друг другу, или совокупность концентрических сфер. Соответственно волна называется плоской или сферической.

Дифракция и интерференция волн. Типичными волновыми эффектами являются явления интерференции и дифракции. Первоначально дифракцией называлось отклонение распространения света от прямолинейного направления. Это открытие было сделано в 1665 году аббатом Франческо Гримальди и послужило основой для разработки волновой теории света.

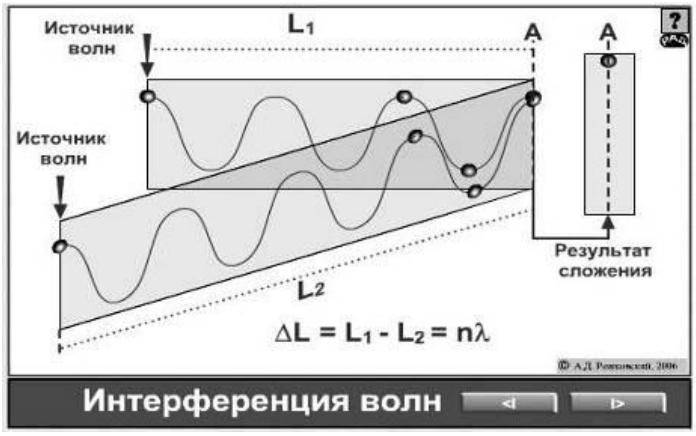


Дифракцией света представляла собой огибание светом контуров непрозрачных предметов и, как следствие этого, проникновение света в область геометрической тени. После создания волновой теории выяснилось, что дифракция света является следствием явления интерференции волн, испущенных когерентными источниками, находящимися в различных точках пространства. Волны называются когерентными, если разность их фаз остается постоянной с течением времени. Источниками когерентных волн являются когерентные колебания источников волн. Синусоидальные волны, частоты которых не изменяются с течением времени, являются всегда когерентными.



Когерентные волны, испущенные источниками, находящимися в различных точках, распространяются в пространстве без взаимодействия и образуют суммарное волновое поле. Строго говоря, сами волны не складываются. Но если в какой-либо точке пространства находится регистрирующий прибор, то его чувствительный элемент будет приведен в колебательное движение под действием волн. Каждая волна действует независимо от других, и движение чувствительного элемента представляет собой сумму колебаний.

Интерференция – это сложение колебаний. В результате интерференции в каких-то точках пространства происходит рост амплитуды колебаний, а в других – их уменьшение. Неизменная картина интерференции наблюдается только тогда, когда разность складываемых колебаний постоянна (они *когерентны*). Очевидно, что когерентными могут быть колебания одинаковой частоты. Поэтому чаще всего изучают интерференцию *монохроматически* колебаний.



Природа звука.

Звук – это упругие волны, распространяющиеся в газах, жидкостях и твердых телах и воспринимаемые ухом человека и животных. Слышимый диапазон делится условно на три тона: 20...300 Гц – низкий; 300...3000 Гц – средний; 3000...20000 Гц – высокий.

Звуковые волны могут служить примером колебательного процесса. Всякое колебание связано с нарушением равновесного состояния системы и выражается в отклонении её характеристик от равновесных значений с последующим возвращением к исходному значению. Для звуковых колебаний такой характеристикой является давление в точке среды, а её отклонение – **звуковым давлением.**

Если произвести резкое смещение частиц упругой среды в одном месте, например, с помощью поршня, то в этом месте увеличится давление. Благодаря упругим связям частиц давление передаётся на соседние частицы, которые, в свою очередь, воздействуют на следующие, и область повышенного давления как бы перемещается в упругой среде. За областью повышенного давления следует область пониженного давления, и, таким образом, образуется ряд чередующихся областей сжатия и разрежения, распространяющихся в среде в виде волны. Каждая частица упругой среды в этом случае будет совершать колебательные движения.

В жидких и газообразных средах, где отсутствуют значительные колебания плотности, акустические волны имеют продольный характер, то есть направление колебания частиц совпадает с направлением перемещения волны. В твёрдых телах, помимо продольных деформаций, возникают также упругие деформации сдвига, обусловливающие возбуждение поперечных (сдвиговых) волн; в этом случае частицы совершают колебания перпендикулярно направлению распространения волны. Скорость распространения продольных волн значительно больше скорости распространения сдвиговых волн.

Физические параметры звука.

Колебательная скорость измеряется в м/с или см/с. В энергетическом отношении реальные колебательные системы характеризуются изменением энергии вследствие частичной её затраты на работу против сил трения и излучение в окружающее пространство. В упругой среде колебания постепенно затухают. Для характеристики затухающих колебаний используются коэффициент затухания (S), логарифмический декремент (D) и добротность (Q).

Коэффициент затухания отражает быстроту убывания амплитуды с течением времени. Если обозначить время, в течение которого амплитуда уменьшается в e = 2,718 раз, через τ, то:

$$S = \frac{1}{\tau.}$$

Уменьшение амплитуды за один цикл характеризуется логарифмическим декрементом. Логарифмический декремент равен отношению периода колебаний ко времени затухания τ:

$$D = \frac{T}{\tau}$$

Если на колебательную систему с потерями действовать периодической силой, то возникают *вынужденные колебания*, характер которых в той или иной мере повторяет изменения внешней силы. Частота вынужденных колебаний не зависит от параметров колебательной системы. Напротив, амплитуда зависит от массы, механического сопротивления и гибкости системы. Такое явление, когда амплитуда колебательной скорости достигает максимального значения, называется механическим резонансом. При этом частота вынужденных колебаний совпадает с частотой собственных незатухающих колебаний механической системы.

При частотах воздействия, значительно меньших резонансной, внешняя гармоническая сила уравновешивается практически только силой упругости. При частотах возбуждения, близких к резонансной, главную роль играют силы трения. При условии, когда частота внешнего воздействия значительно больше резонансной, поведение колебательной системы зависит от силы инерции или массы.

Свойство среды проводить акустическую энергию, в том числе и ультразвуковую, характеризуется акустическим сопротивлением.

Звуковое или *акустическое давление* в среде представляет собой разность между мгновенным значением давления в данной точке среды при наличии звуковых колебаний и статического давления в той же точке при их отсутствии. Иными словами, звуковое давление есть переменное давление в среде, обусловленное акустическими колебаниями. Максимальное значение переменного акустического давления (амплитуда давления) может быть рассчитано через амплитуду колебания частиц:

Давление, оказываемое на частицы среды при распространении волны, является результатом действия упругих и инерционных сил. Последние вызываются ускорениями, величина которых также растёт в течение периода от нуля до максимума (амплитудное значение ускорения). Кроме того, в течение периода ускорение меняет свой знак.

Максимальные значения величин ускорения и давления, возникающие в среде при прохождении в ней ультразвуковых волн, для данной частицы не совпадают во времени. В момент, когда перепад ускорения достигает своего максимума, перепад давления становится равным нулю. Амплитудное значение ускорения (а) определяется выражением:

Если бегущие ультразвуковые волны наталкиваются на препятствие, оно испытывает не только переменное давление, но и постоянное. Возникающие при прохождении ультразвуковых волн участки сгущения и разрежения среды создают добавочные изменения давления в среде по отношению к окружающему её внешнему давлению. Такое добавочное внешнее давление носит название давления излучения (радиационного давления). Оно служит причиной того, что при переходе ультразвуковых волн через границу жидкости с воздухом образуются фонтанчики жидкости и происходит отрыв отдельных капелек от поверхности. Этот механизм нашёл применение в образовании аэрозолей лекарственных веществ. Радиационное давление часто используется при измерении мощности ультразвуковых колебаний в специальных измерителях – ультразвуковых весах.

Скорость звука



Средства звукового наблюдения, основанные на бинауральном эффекте

Скорость звука – скорость распространения звуковых волн в среде.

Как правило, в газах скорость звука меньше, чем в жидкостях, а в жидкостях скорость звука меньше, чем в твёрдых телах, что связано в основном с убыванием сжимаемости веществ в этих фазовых состояниях соответственно.

В среднем в идеальных условиях в воздухе скорость звука составляет 340—344 м/с

Скорость звука в любой среде вычисляется по формуле:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\beta\rho}}$$

где β – адиабатическая сжимаемость среды; ρ – плотность.

Громкость звука

Громкость звука – субъективное восприятие силы звука (абсолютная величина слухового ощущения). Громкость главным образом зависит от звукового давления, амплитуды и частоты звуковых колебаний. Также на громкость звука влияют его спектральный состав, локализация в пространстве, тембр, длительность воздействия звуковых колебаний, индивидуальная чувствительность слухового анализатора человека и другие факторы

Наука о звуке называется акустикой. Звук распространяется в воздухе со скоростью 340 м/с, в воде – 1500 м/с, в стали – 5000 м/с.

Инфразвук (от лат. infra – ниже, под) – упругие волны, аналогичные звуковым, но с частотами ниже области слышимых человеком частот. Обычно за верхнюю границу инфразвуковой области принимают частоты 16-25 Гц. Нижняя граница инфразвукового диапазона неопределенна. Практический интерес могут представлять колебания от десятых и даже сотых долей Гц, т. е. с периодами в десяток секунд. Инфразвуки содержатся в шуме атмосферы, леса и моря; их источник – турбулентность атмосферы и ветер (например, так называемый "голос моря" – инфразвуковые колебания, образующиеся от завихрений ветра на гребнях морских волн). Источником инфразвуковых колебаний являются грозовые разряды (гром), а также взрывы и орудийные выстрелы.

Практическое применение инфразвука.

Для инфразвука характерно малое поглощение в различных средах вследствие чего инфразвуковые волны в воздухе, воде и в земной коре могут распространяться на очень далёкие расстояния. Это явление находит практическое применение при определении места сильных взрывов или положения стреляющего орудия. Распространение инфразвука на большие расстояния в море даёт возможность предсказания стихийного бедствия – цунами. Звуки взрывов, содержащие большое количество инфразвуковых частот, применяются для исследования верхних слоев атмосферы, свойств водной среды.

Животным инфразвуковые сигналы сообщают о приближении цунами, землетрясения и других бедствий

Вопросы для закрепления:

1. Какие колебания называют свободными?
2. При каких условиях в системе возникают свободные колебания?
3. Какие колебания называют вынужденными? Приведите примеры вынужденных колебаний.
4. Что представляет собой автоколебательная система?
5. Какие колебания называются гармоническими?

34. Аналогия между механическими и электромагнитными колебаниями. Графики гармонических колебаний.

Электромагнитные колебания в контуре имеют сходство со свободными механическими колебаниями, например с колебаниями тела, закрепленного на пружине (пружинный маятник). Сходство относится не к природе самих величин, которые периодически изменяются, а к процессам периодического изменения различных величин.

При механических колебаниях периодически изменяются координата тела x и проекция его скорости v_x, а при электромагнитных колебаниях изменяются заряд q конденсатора и сила тока i в цепи. Одинаковый характер изменения величин (механических и электрических) объясняется тем, что имеется аналогия в условиях, при которых возникают механические и электромагнитные колебания.

Возвращение к положению равновесия тела на пружине вызывается силой упругости $F_{x\,упр}$, пропорциональной смещению тела от положения равновесия. Коэффициентом пропорциональности является жесткость пружины k.

Разрядка конденсатора (появление тока) обусловлена напряжением и между пластинами конденсатора, которое пропорционально заряду q. Коэффициентом пропорциональности является величина $\frac{1}{C}$, обратная емкости, так как $u = \frac{1}{C}q$.

Подобно тому как, вследствие инертности, тело лишь постепенно увеличивает скорость под действием силы и эта скорость после прекращения действия силы не становится сразу равной нулю, электрический ток в катушке за счет явления самоиндукции увеличивается под действием напряжения постепенно и не исчезает сразу, когда это напряжение становится равным нулю. Индуктивность контура **L** выполняет ту же роль, что и масса тела m при механических колебаниях. Соответственно кинетическая энергия тела $\frac{mv_x^2}{2}$ аналогична энергии магнитного поля тока $\frac{Li^2}{2}$.

Зарядка конденсатора от батареи аналогична сообщению телу, прикрепленному к пружине, потенциальной энергии $\frac{kx_m^2}{2}$ при смещении тела на расстояние x_m от положения равновесия (рис. 4.5, а). Сравнивая это выражение с энергией конденсатора $\frac{q_m^2}{2C}$, замечаем, что жесткость **k** пружины выполняет при механических колебаниях такую же роль, как величина $\frac{1}{C}$, обратная емкости, при электромагнитных колебаниях. При этом начальная координата x_m соответствует заряду q_m.

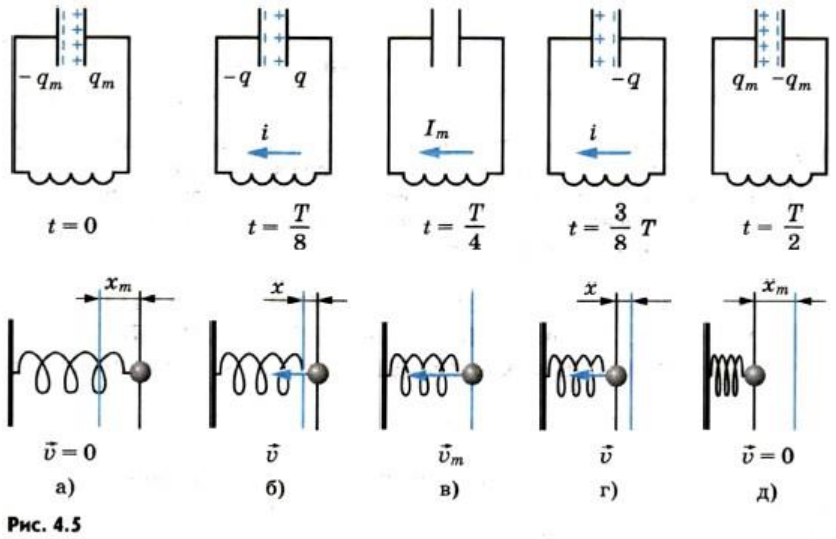


Рис. 4.5

Возникновение в электрической цепи тока **i** соответствует появлению в механической колебательной системе скорости тела $\mathbf{v_x}$ под действием силы упругости пружины (рис. 4.5, б).

Момент времени, когда конденсатор разрядится, а сила тока достигнет максимума, аналогичен тому моменту времени, когда тело будет проходить с максимальной скоростью (рис. 4.5, в) положение равновесия.

Далее конденсатор в ходе электромагнитных колебаний начнет перезаряжаться, а тело в ходе механических колебаний – смещаться влево от положения равновесия (рис. 4.5, г). По прошествии половины периода **T** конденсатор полностью перезарядится и сила тока станет равной нулю.

При механических колебаниях этому соответствует отклонение тела в крайнее левое положение, когда его скорость равна нулю (рис. 4.5, д). Соответствие между механическими и электрическими величинами при колебательных процессах можно свести в таблицу.

Механическая величина	**Электрическая величина**
Координата x	Заряд q
Скорость v_x	Сила тока i
Масса m	Индуктивность L
Жесткость пружины k	Величина, обратная емкости, $\frac{1}{C}$
Потенциальная энергия $\frac{kx^2}{2}$	Энергия электрического поля $\frac{q^2}{2C}$
Кинетическая энергия $\frac{mv_x^2}{2}$	Энергия магнитного поля $\frac{Li^2}{2}$

Электромагнитные и механические колебания имеют разную природу, но описываются одинаковыми уравнениями.

Наряду с поступательными и вращательными движениями тел в механике значительный интерес представляют и колебательные движения. ***Механическими колебаниями*** называют движения тел, повторяющиеся точно (или приблизительно) через одинаковые промежутки времени. Закон движения тела, совершающего колебания, задается с помощью некоторой периодической функции времени $\boldsymbol{x=f(t)}$. Графическое изображение этой функции дает наглядное представление о протекании колебательного процесса во времени.

Примерами простых колебательных систем могут служить груз на пружине или математический маятник (рис. 2.1.1).

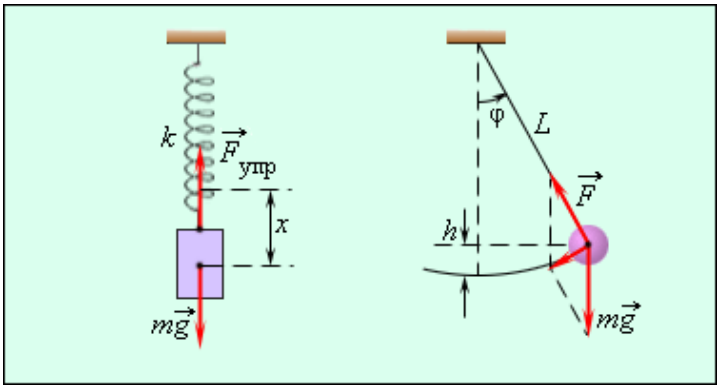


Рисунок 2.1.1. Механические колебательные системы

Механические колебания, как и колебательные процессы любой другой физической природы, могут быть **свободными** и **вынужденными**. ***Свободные колебания*** совершаются под действием **внутренних сил** системы, после того, как система была выведена из состояния равновесия. Колебания груза на пружине или колебания маятника являются свободными колебаниями. Колебания, происходящие под действием **внешних** периодически изменяющихся сил, называются ***вынужденными***.

Простейшим видом колебательного процесса являются простые ***гармонические колебания***, которые описываются уравнением $x=x_m\cos(\omega t+\varphi_0)$.

Здесь $\boldsymbol{x}$ – смещение тела от положения равновесия, $\boldsymbol{x_m}$ – амплитуда колебаний, т.е. максимальное смещение от положения равновесия, $\boldsymbol{\omega}$ – ***циклическая или круговая частота*** колебаний, $\boldsymbol{t}$ – время. Величина, стоящая под знаком косинуса $\varphi=\omega t+\varphi_0$ называется **фазой** гармонического процесса. При $t=0\varphi=\varphi_0$, поэтому φ_0 называют **начальной фазой**. Минимальный интервал времени, через который происходит повторение движения тела, называется ***периодом колебаний*** T. Физическая величина, обратная периоду колебаний, называется **частотой колебаний**:

$$f=\frac{1}{T}.$$

Частота колебаний f показывает, сколько колебаний совершается за 1 с. Единица частоты – **герц** (Гц). Частота колебаний f связана с циклической частотой ω и периодом колебаний T соотношениями:

$$\omega=2\pi f=\frac{2\pi}{T}.$$

На рис. 2.1.2 изображены положения тела через одинаковые промежутки времени при гармонических колебаниях. Такую картину можно получить экспериментально при освещении колеблющегося тела короткими периодическими вспышками света (**стробоскопическое освещение**). Стрелки изображают векторы скорости тела в различные моменты времени.

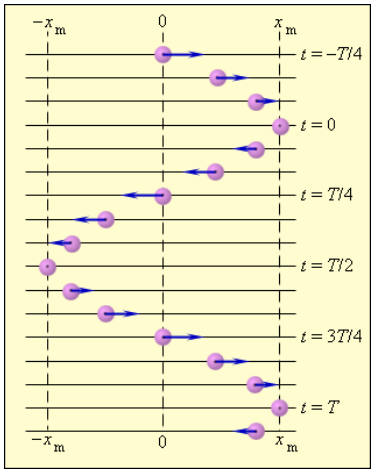


Рисунок 2.1.2.
Стробоскопическое изображение гармонических колебаний. Начальная фаза $\varphi_0=0$. Интервал времени между последовательными положениями тела $\tau=T/12$

Рис. 2.1.3 иллюстрирует изменения, которые происходят на графике гармонического процесса, если изменяются либо амплитуда колебаний x_m, либо период T (или частота f), либо начальная фаза φ_0.

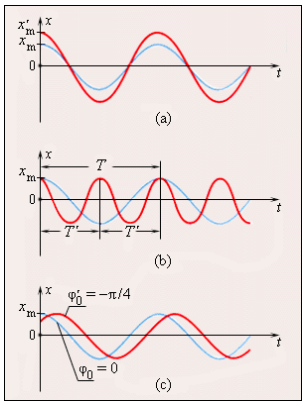


Рисунок 2.1.3.
Во всех трех случаях для синих кривых $\varphi_0=0$: a – красная кривая отличается от синей **только** большей амплитудой ($x'_m>x_m$); b – красная кривая отличается от синей **только** значением периода ($T'=T/2$); c – красная кривая отличается от синей **только** значением начальной фазы ($\varphi_0'=-\pi/2$ рад)

При колебательном движении тела вдоль прямой линии (**ось *OX***) вектор скорости направлен всегда вдоль этой прямой. Скорость $\upsilon=\upsilon_x$ движения тела определяется выражением

$$\upsilon = \frac{\Delta x}{\Delta t};\ (\Delta t \to 0).$$

В математике процедура нахождения предела отношения $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ при $\Delta t \to 0$ называется вычислением производной функции $x(t)$ по времени t и обозначается как $\frac{dx\,(t)}{dt}$ или как $x'(t)$ или, наконец, как $\dot{x}\,(t)$. Для гармонического закона движения $x = x_m \cos\left(\omega t + \varphi_0\right)$ вычисление производной приводит к следующему результату:

$$\upsilon = \dot{x}\,(t) = -\omega x_m \sin\left(\omega t + \varphi_0\right) = \omega x_m \cos\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right).$$

Появление слагаемого $+\pi/2$ в аргументе косинуса означает изменение начальной фазы. Максимальные по модулю значения скорости $\upsilon=\omega x_m$ достигаются в те моменты времени, когда тело проходит через положения равновесия ($x=0$). Аналогичным образом определяется ускорение $a=a_x$ тела при гармонических колебаниях:

$$a = \frac{\Delta \upsilon}{\Delta t};\ (\Delta t \to 0),$$

следовательно, ускорение a равно производной функции $\upsilon(t)$ по времени t, или второй производной функции $x(t)$. Вычисления дают:

$$a = \dot{\upsilon}\,(t) = \ddot{x}\,(t) = -\omega^2 x_m \cos\left(\omega t + \varphi_0\right) = -\omega^2 x\,(t).$$

Знак минус в этом выражении означает, что ускорение $a(t)$ всегда имеет знак, противоположный знаку смещения $x(t)$, и, следовательно, по второму закону Ньютона сила, заставляющая тело совершать гармонические колебания, направлена всегда в сторону положения равновесия ($x=0$).

На рис. 2.1.4 приведены графики координаты, скорости и ускорения тела, совершающего гармонические колебания.

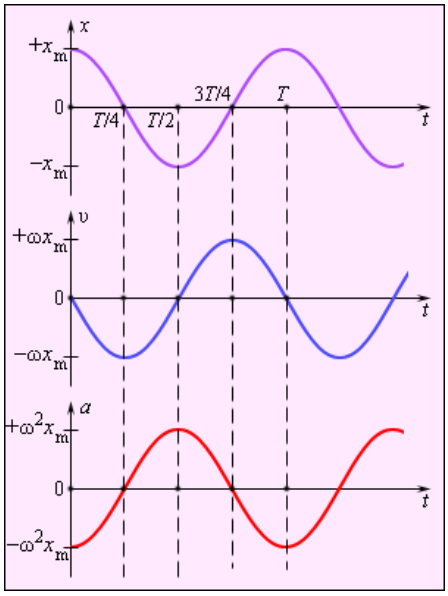
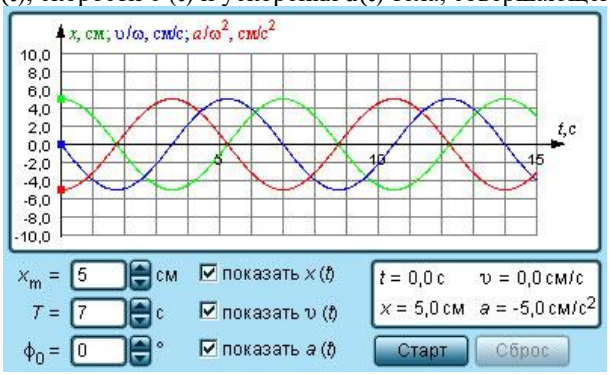


Рисунок 2.1.4.

Графики координаты $x(t)$, скорости $\upsilon(t)$ и ускорения $a(t)$ тела, совершающего гармонические колебания



Модель. Гармонические колебания

Вопросы для закрепления:

1. В чем проявляется аналогия между электромагнитными колебаниями в контуре и колебаниями пружинного маятника?
2. За счет какого явления электрический ток в колебательном контуре не исчезает сразу, когда напряжение на конденсаторе становится равным нулю?
3. Изменению какой величины в колебательном контуре соответствует увеличение коэффициента жесткости пружинного маятника?
4. В чем заключается суть метода векторных диаграмм?
5. Выразите амплитуду и начальную фазу колебаний через начальные условия
6. Почему свободные колебания в реальном колебательном контуре затухают?

35. Переменный электрический ток и его основные характеристики. Активное сопротивление в цепи переменного тока. Конденсатор и катушка индуктивности в цепи переменного тока. Закон Ома для полной цепи.

Свободные электромагнитные колебания в контуре быстро затухают, и поэтому они практически не используются. Напротив, незатухающие вынужденные колебания имеют огромное практическое значение.

Переменный ток в осветительной сети квартиры, применяемый па заводах и фабриках и т. д., представляет собой не что иное, как вынужденные электромагнитные колебания. Сила тока и напряжение меняются со временем по гармоническому закону.

Колебания напряжения легко обнаружить с помощью осциллографа. Если на вертикально отклоняющие пластины осциллографа подать напряжение от сети, то временная развертка на экране будет представлять собой синусоиду (рис. 4.8). Зная скорость движения луча по экрану в горизонтальном направлении (она определяется частотой пилообразного напряжения), можно вычислить частоту колебаний. Частота переменного тока – это число колебаний в 1 с.



Рис. 4.8

Стандартная частота промышленного переменного тока равна 50 Гц. Это означает, что на протяжении 1 с ток 50 раз идет в одну сторону и 50 раз – в противоположную. Частота 50 Гц принята для промышленного тока во многих странах мира. В США принята частота 60 Гц.

Если напряжение на концах цепи меняется по гармоническому закону, то и напряженность электрического поля внутри проводников будет также меняться гармонически. Эти гармонические изменения напряженности поля, в свою очередь, вызывают гармонические колебания скорости упорядоченного движения заряженных частиц и, следовательно, гармонические колебания силы тока.

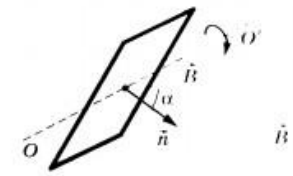


Рис. 4.9

Получение переменного тока при равномерном вращении рамки в магнитном поле.

Но при изменении напряжения на концах цепи электрическое поле не меняется мгновенно по всей цепи. Изменения поля распространяются хотя и с очень большой, но не с бесконечно большой скоростью.

Однако, если время распространения изменений поля в цепи много меньше периода колебаний напряжения, можно считать, что электрическое поле во всей цепи сразу же меняется при изменении напряжения на концах цепи. При этом сила тока в данный момент времени будет иметь практически одно и то же значение во всех сечениях не разветвленной цепи.

Переменное напряжение в гнездах розетки осветительной сети создается генераторами на электростанциях. Проволочную рамку, вращающуюся в постоянном однородном магнитном поле, можно рассматривать как простейшую модель генератора переменного тока. Поток магнитной индукции Ф, пронизывающий проволочную рамку площадью S, пропорционален косинусу угла α между нормалью к рамке и вектором магнитной индукции (рис. 4.9):

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

При равномерном вращении рамки угол a увеличивается прямо пропорционально времени:

$$\alpha = \omega t,$$

где ω – угловая скорость вращения рамки. Поток магнит ной индукции меняется по гармоническому закону:

$$\Phi = BS \cos \omega t.$$

Здесь величина ω играет уже роль циклической частоты.

Согласно закону электромагнитной индукции ЭДС индукции в рамке равна взятой со знаком «-» скорости изменения потока магнитной индукции, т. е. производной потока магнитной индукции по времени:

$$e = -\Phi' = -BS\,(\cos \omega t)' = BS\omega \cdot \sin \omega t = \mathscr{E}_m \sin \omega t,$$

где $\mathscr{E}_m = BS\omega$ — амплитуда ЭДС индукции.

Если к рамке подключить колебательный контур, то угловая скорость ω вращения рамки определит частоту ω колебаний значений ЭДС, напряжения на различных участках цепи и силы тока.

Мы будем изучать в дальнейшем вынужденные электрические колебания, происходящие в цепях под действием напряжения, меняющегося с циклической частотой ω по закону синуса или косинуса:

$$u=U_m\sin\omega t \text{ или } u=U_m\cos\omega t, \quad (4.14)$$

где U_m – амплитуда напряжения, т. е. максимальное по модулю значение напряжения.

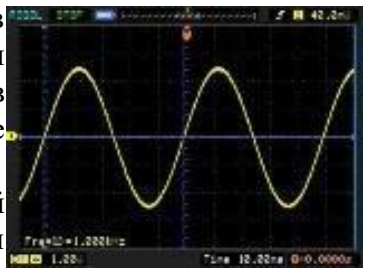
Если напряжение меняется с циклической частотой ω, то и сила тока в цепи будет меняться с той же частотой. Но колебания силы тока не обязательно должны совпадать по фазе с колебаниями напряжения. Поэтому в общем случае сила тока **i** в любой момент времени (мгновенное значение силы тока) определяется по формуле

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_c). \quad (4.15)$$

Здесь $\mathbf{I_m}$ – амплитуда силы тока, т. е. максимальное по модулю значение силы тока, а φ_c – разность (сдвиг) фаз между колебаниями силы тока и напряжения.

В промышленных цепях переменного тока сила тока и напряжение меняются гармонически с частотой ν=50 Гц. Переменное напряжение на концах цепи создается генераторами на электростанциях.

Период и частота переменного тока



Движение электронов в проводе сначала в одну сторону, а затем в другую называют одним колебанием переменного тока. За первым колебанием следует второе, затем третье и т. д. При колебаниях тока в проводе вокруг него происходит соответствующее колебание магнитного поля.

Время одного колебания называют периодом и обозначают буквой T. Период выражают в секундах или в единицах, составляющих доли секунды. К ним относятся: тысячная доля секунды – миллисекунда (мс), равная 10^{-3}с, миллионная доля секунды – микросекунда (мкс), равная 10^{-6}с, и миллиардная доля секунды – наносекунда (нс), равная 10^{-9}с.

Важной величиной, характеризующей переменный ток, является частота. Она представляет собой число колебаний или число периодов в секунду и обозначается буквой f или F. Единицей частоты служит герц, названный в честь немецкого ученого Г. Герца и обозначаемый сокращенно буквами Гц (или Hz). Если в одну секунду происходит одно полное колебание, то частота равна одному герцу. Когда в течение секунды совершается десять колебаний, то частота составляет 10 Гц. Частота и период являются обратными величинами: f=1/T и T=1/f

При частоте 10 Гц период равен 0,1 с. А если период равен 0,01 с, то частота составляет 100 Гц

В электрической сети переменного тока частота равна 50 Гц. Ток пятьдесят раз в секунду идет в одну сторону и пятьдесят раз в обратную. Сто раз в секунду он достигает амплитудного значения и сто раз становится равным нулю, т. е. сто раз меняет свое направление при переходе через нулевое значение. Лампы, включенные в сеть, сто раз в секунду притухают и столько же раз вспыхивают ярче, но глаз этого не замечает, благодаря зрительной инерции, т. е. способности сохранять полученные впечатления около 0,1 с.

Активное сопротивление в цепи переменного тока

Пусть цепь состоит из резистора и соединительных проводов, а напряжение на зажимах цепи меняется по закону

$$u=U_m \cos \acute{\omega} t. \quad (2.3)$$

В цепи переменного тока ранее известная нам величина – *электрическое сопротивление* – называется ***активным сопротивлением***. Дело в том, что в цепи переменного тока могут быть еще сопротивления, обусловленные индуктивностью и емкостью. Но тепловая энергия выделяется только на активном сопротивлении.

Для мгновенного значения напряжения и силы тока справедлив закон Ома:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \cos \acute{\omega} t}{R} = I_m \cos \acute{\omega} t,$$

где $I_m = \frac{U_m}{R}$ – амплитуда силы тока.

Итак, для цепи с активным сопротивлением:

$$i = I_m \cos \acute{\omega} t. \quad (2.4)$$

Сравнивая выражения (2.3) и (2.4), проходим к выводу, что *в проводнике с активным сопротивлением колебания напряжения и силы тока происходят в одинаковой фазе.*

Графики зависимости силы тока и напряжения от времени представлены на рис. 2.4.

Для наглядного представления фазовых соотношений между током и напряжением можно использовать метод векторных диаграмм. Амплитуда силы переменного тока и амплитуда переменного напряжения изображаются как параллельные векторы, угол между ними, а значит, сдвиг фаз равен нулю.

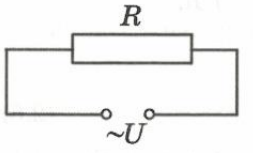


Рис. 2.3

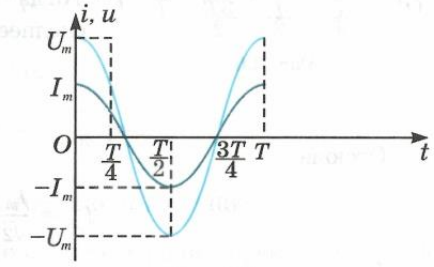


Рис. 2.4

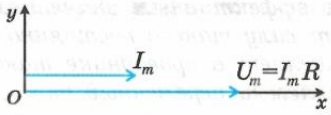


Рис. 2.5

Д а н о:	Р е ш е н и е. Сравнивая уравнение $u = 110 \cos (100\pi t + \frac{\pi}{6})$
$u = 110 \cos (100\pi t + \frac{\pi}{6})$	$u = U_m \cos (\acute{\omega} t + \varphi_0)$, находим:
U - ?	1) амплитудное значение напряжения $U_m = 110$ В. Тогда действующее значение напряжения $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{110}{\sqrt{2}} = 78$ В;
ν - ?	2) частота $\nu = \frac{\acute{\omega}}{2\pi} = \frac{100\pi}{2\pi} = 50$ Гц;
φ - ?	3) начальная фаза колебаний $\varphi = \frac{\pi}{6}$ рад.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1 Амплитудное значение напряжения в цепи переменного тока U_m = 10 В. Определите напряжение в момент времени $t = \frac{T}{6}$.

(*Ответ:* 5 В)

2 В цепи переменного тока с активным сопротивлением R = 400 Ом напряжение меняется по закону $U_m = 220 \cos 100\pi t$.

Напишите уравнение колебаний тока в этой цепи. Найдите силу тока в момент времени $t = \frac{T}{4}$.

($i = 0{,}55 \cos 100\pi t$; 0)

Емкость сопротивления в цепи переменного тока

Приложим переменное напряжение $u=U_m \cos \acute{\omega} t$ к конденсатору емкостью C. Тогда конденсатор будет все время перезаряжаться, и в цепи потечет ток. Если в цепь последовательно с конденсатором подсоединить лампу накаливания, при большой емкости конденсатора она загорится. Постоянный же ток не способен течь в цепи, содержащей конденсатор. Ведь фактически при этом цепь оказывается разомкнутой, так как обкладки конденсатора разделены диэлектриком. В цепи переменного тока между обкладками конденсатора электрические заряды также не проходят, но в результате периодической зарядки конденсатора по проводам, соединяющим его с источником напряжения, течет переменный ток.

Если пренебречь сопротивлением подходящих проводов, цепь состоит только из конденсатора, к которому приложено переменное напряжение. Напряжение на конденсаторе связано с его емкостью соотношением $u = \frac{q}{C}$, где q – заряд на обкладках конденсатора.

Необходимо помнить, что емкость конденсатора не зависит ни от величины заряда на его обкладках, ни от величины напряжения между ними. Тогда заряд на обкладках конденсатора будет изменяться по закону изменения напряжения: $u=CU$, или $q=U_m \cdot C \cdot \cos \acute{\omega} t$.

Сила тока равна первой производной от заряда по времени:

$$i = q` = -U_m \cdot C \acute{\omega} \sin \acute{\omega} t = U_m C \acute{\omega} \cos (\acute{\omega} t + \frac{\pi}{2}).$$

Введем обозначение

$$I_m = \acute{\omega} C \cdot U_m. \qquad (2.8)$$

Тогда $i = I_m \cos (\acute{\omega} t + \frac{\pi}{2})$.

Сравнив это уравнение с уравнением напряжения $u=U_m C \acute{\omega} t$, приложенного к конденсатору, приходим к выводу, что *колебания силы тока опережают колебания напряжения на конденсаторе на* $\frac{\pi}{2}$.

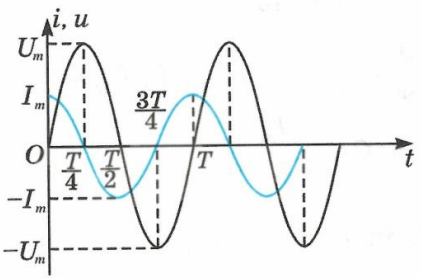
Графики зависимости силы тока и напряжения от времени и векторная диаграмма представлены на рис. 2.8 и 2.9 соответственно.

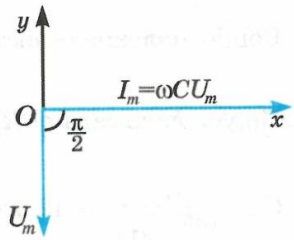
Выражение (2.8) определяет *амплитуду силы тока*. Введем обозначение

$$X_C = \frac{1}{\acute{\omega} C} \qquad (2.9)$$

и подставим его в уравнение (2.8):

$$I_m = \frac{Um}{X_C}, \; X_C = \frac{Um}{Im}.$$





Мы получили выражение закона Ома, где вместо сопротивления стоит величина $X_C=\frac{1}{\acute{\omega}C}$, обратная произведению циклической частоты на электрическую емкость. Эта величина называется ***емкостным сопротивлением.*** Видно, что емкостное сопротивление тем меньше, чем больше емкость конденсатора.

Емкостное сопротивление также обратно пропорционально частоте: чем больше частота, тем оно меньше. Поэтому при постоянном значении амплитуды напряжения в цепи переменного тока амплитуда силы тока возрастает с ростом частоты ω. Для постоянного тока ω = 0, поэтому емкостное сопротивление бесконечно велико ($X_C = \infty$), и ток в цепи не течет.

Д а н о U = 180 cos 314 t (B) $I_{эф}$ = 1,7 А	Р е ш е н и е. Из данного в условиях задачи уравнения напряжения находим его эффективное значение и циклическую частоту:
C - ?	$U_{эф} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{180}{\sqrt{2}}$ B; $\Omega = 314\ c^{-1}$.

Сопротивление резистора $R = \frac{U_{эф}}{I_{эф}}$.

По условию задачи $R = X_c = \frac{1}{\omega c} \rightarrow C = \frac{I_{эф}}{U_{эф} \bullet \omega}$;

$C = \frac{1,7}{\frac{180}{\sqrt{2}} \cdot 314}$ = 42 мкф; C = 42 мкф.

(C =42 мкф)

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

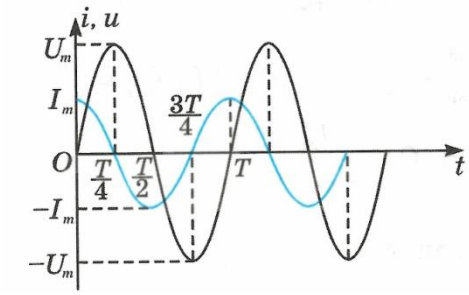
1 Емкостное сопротивление конденсатора в цепи переменного тока частотой ν=50 Гц равно X_C = 5 Ом. Какова его емкость?

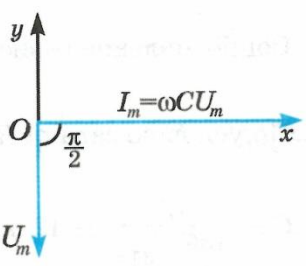
($6,4 \cdot 10^{-4}$ Ф)

2 Конденсатор емкостью C = 40 мкФ представляет для переменного тока сопротивление X_C = 8 Ом. Определите частоту и период переменного тока.

(497 кГц, 0,002 с)

Катушка индуктивности в цепи переменного тока





$$e_{is} = -L\frac{\Delta i}{\Delta t} = -Li`, \quad (2.10)$$

где $i`$ - первая производственная силы тока по времени.

По закону Ома

$$iR = e_{is} + u, \quad (2.11)$$

где R – активное сопротивление катушки; u – мгновенное напряжение на её концах. В идеальной катушке $R = 0$, и уравнение (1) принимает вид:

$$0 = e_{is} + u, \text{ или } u = -e_{is}.$$

При изменении силы тока по закону

$$i = I_m \sin \omega t, \quad (2.12)$$

ЭДС самоиндукции равна:

$$e_{is} = -Li` = -\omega L I_m \cos \omega t. \quad (2.13)$$

Так как $u = -e_{is}$, то напряжение равно:

$$u = \omega LI_m \cos \omega t = \omega LI_m \sin (\omega t + \frac{\pi}{2}) = U_m \sin (\omega t + \frac{\pi}{2}),$$

где $U_m = \omega LI_m$ – *амплитуда напряжения.* Сравнивая уравнения (2.12) и (2.13), приходим к выводу, что *колебания силы тока на катушке отстают по фазе от колебаний напряжения на* $\frac{\pi}{2}$.

Амплитуда силы тока в катушке равна:

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}.$$

Эта формула представляет собой не что иное, как *закон Ома для цепи переменного тока с идеальной катушкой индуктивности.* Выражение ωL называется *индуктивным сопротивлением катушки* и обозначается X_L:

$$X_L = \omega L.$$

Если вместо амплитуд силы тока и напряжения использовать их действующие значения, то получим:

$$I_{эф} = \frac{U_{эф}}{X_L}$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1 Определите индуктивное сопротивление катушки индуктивностью L = 5 Гн, если частота переменного тока ν = 1 кГц.

(31, 4 кОм)

2 Определите частоту и период переменного тока, если индуктивное сопротивление катушки индуктивностью L = 2 Гн равно X_L =628 Ом.

(50 Гц, 0,02 с)

Закон Ома полной цепи переменного типа

$$u = U_R + U_{Xc} + U_L.$$

В цепи возникнут вынужденные колебания, т.е. переменный ток. Амплитуду напряжения на резисторе, конденсаторе и катушке обозначим соответственно U_{mR}, U_{mC}, U_{mL}. Изобразим эти напряжения на векторной диаграмме. По горизонаталной оси отложим вектор амплитуды силы тока I_m. Тогда углы между горизонтальной осью и вектором амплитуды каждого напряжения будут равны разности фаз между колебаниями тока и соответствующего напряжения.

Колебания напряжения на активном сопротивлении совпадают по фазе с колебаниями силы тока, колебания напряжения на конденсаторе отстают по фазе от колебаний силы тока на $\frac{\pi}{2}$, и наконец, колебания напряжения на катушке опережают колебания силы тока на $\frac{\pi}{2}$.

Амплитуду приложенного напряжения $\bar{U}_m$ можно найти как сумму (модуль) векторов:

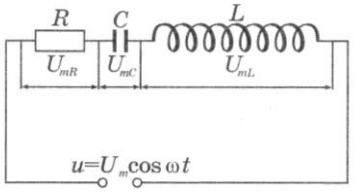
$$\bar{U}_m = \bar{U}_{mR} + \bar{U}_{mC} + \bar{U}_{mL}$$

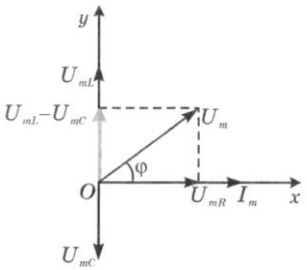
(стрелки над обозначением напряжений, конечно, не означают, что напряжение – векторная величина, это просто векторы, модули которых равны указанным напряжениям). Амплитуда напряжений на всей цепи по теореме Пифагора равна:

$$U_m = \sqrt{U_{mR}^2 + (U_{mL} - U_{mC})^2}$$

Согласно закону Ома,

$$U_{mL} = I_m X_L,\ U_{mC} = I_m X_c \text{ и } U_{mR} = I_m R,$$





поэтому

$$U_m = \sqrt{I_m^2 R^2 + (I_m X_L - I_m X_C)^2},$$

откуда

$$I_m = \frac{Um}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \qquad (2.14)$$

Сопротивление $X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ называют *реактивным сопротивлением*, а сопротивление $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ – *полным сопротивлением цепи переменного тока.*

Разность фаз φ можно определить, воспользовавшись векторной диаграммой:

$$\text{tg}\varphi = \frac{U_{mL} - U_{mC}}{U_{mR}}, \text{ или } \text{tg}\varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \qquad (2.15)$$

Уравнение (2.15) называют *законом Ома для полной цепи переменного тока*.

Поскольку $X_L = \omega L$ или $X_C = \frac{1}{\omega C}$, формулу (2.15) можно записать так:

$$I_m = \frac{Um}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})}}2$$

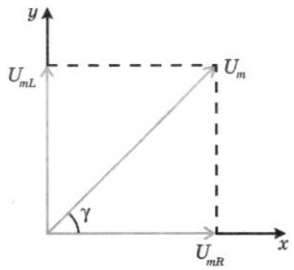
С учетом сдвига фаз уравнение колебаний силы тока в цепи можно записать:

$$i = I_m \cos(\omega t - \varphi) \qquad (2.16)$$

Рассмотрим частный случай, когда в цепи отсутствует конденсатор, и постоим векторную диаграмму $I = \frac{U}{Z}$. Тогда $\text{tg}\varphi = \frac{U_{mL}}{U_{mR}} = \frac{\omega L}{R}$, $I_m = \frac{Um}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$

Для последних выражения совпадают с (2.14) и (2.15), если в них $\frac{1}{\omega C} = 0$, т.е. C = ∞. Следовательно, *отсутствие конденсатора в цепи означает, что C =∞, а не C = 0!*

Действительно, сближая обкладки конденсатора до нуля, получаем цепь, где нет конденсатора. При этом из формулы $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$, положим, d = 0, получим C = ∞.



Дано:

$U_{эф} = 110$ В

$C = 5 \cdot 10^{-5}$ Ф

$L = 400$ мГн $= 0{,}4$ Гн

$R = 10$ Ом

$\nu = 50$ Гц

I_m — ?

Решение. Запишем закон Ома для переменного тока: $I_m = \dfrac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \dfrac{1}{\omega C}\right)^2}}$,

где $\omega = 2\pi\nu$.

Учитывая, что искомое амплитудное значение напряжения связано с его действующим значением соотношением $U_{эф} = \dfrac{U_m}{\sqrt{2}}$, найдем: $I_m = \dfrac{U_{эф} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi\nu L - \dfrac{1}{2\pi\nu C}\right)^2}} =$

$$= \frac{110 \text{ В} \cdot 1{,}41}{\sqrt{100 + \left(2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}4 - \dfrac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}\right)^2}} = 2{,}47 \text{ А, т. е.}$$

$I_m = 2{,}47$ А.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1 В сеть с эффективным напряжением $U_{эф} = 127$ В последовательно включили активное сопротивление $R = 199$ Ом и конденсатор емкостью $C = 40$ мкФ. Определите амплитуду силы тока в цепи.

(0,83 А)

2 В сеть с эффективным напряжением $U_{эф} = 220$ В последовательно включены катушка индуктивностью L = 0,16 Гн, активным сопротивлением R = 2 Ом и конденсатор емкостью C = 64 мкФ. Частота тока ν = 200 Гц. Определите эффективное значение силы тока в цепи.

Вопросы для закрепления:

1. Что называют переменным током?
2. Какое сопротивление называют активным?
3. Каковы фазовые соотношения между колебаниями силы тока и напряжения в цепи переменного тока с активным сопротивлением?
4. Что такое емкостное сопротивление?
5. От каких величин зависит емкостное сопротивление?
6. Что такое индуктивное сопротивление?
7. Как изменяется индуктивное сопротивление при увеличении индуктивности катушки?
8. Чему равно полное сопротивление цепи переменного тока?

36. Электрический резонанс в цепи переменного тока. Генератор переменного тока. Мощность в цепи переменного тока.

При протекании токов по электрической цепи, элементы которой соединены последовательно, параллельно или имеют смешанное соединение, могут получаться различные режимы работы этой цепи. Рассмотрим следующие режимы работы электрических цепей: резонанс в цепи с последовательным соединением элементов (резонанс напряжений), резонанс в цепи с параллельным соединением элементов (резонанс токов).

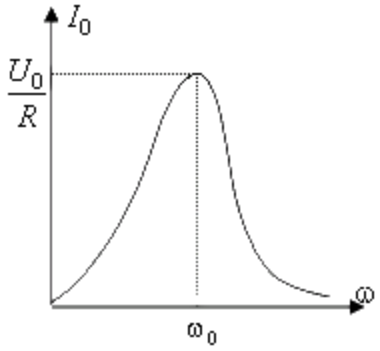


Рис. 7.14

Резонанс напряжений. Резонанс напряжений наблюдается в цепи, в которой последовательно включены все элементы. Исследуем зависимость амплитуды тока и разности фаз между током и напряжением от частоты изменения электродвижущей силы в цепи, содержащей активное сопротивление, индуктивность и емкость. Для этого воспользуемся полученными ранее формулами:

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad tg\varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Из приведенных формул видно, что амплитудное значение силы тока и сдвига фаз между током и напряжением зависят от частоты. Графики зависимостей $I_0(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ приведены на рис. 7.14 и 7.15 соответственно. Как видно из приведенных рисунков, при возрастании частоты амплитуда тока сначала возрастает, затем проходит через максимум, и, наконец, асимптотически стремится к нулю.

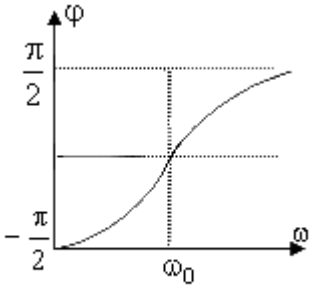


Рис. 7.15

Максимальное значение силы тока, равное $I_{max} = \frac{U_0}{R}$, достигается при обращении полного реактивного сопротивления в ноль: $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$. Этому случаю соответствует частота $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, называемая резонансной частотой. При этой частоте амплитуда тока определяется только активным сопротивлением R. Так как для обычных электрических цепей оно невелико, то при резонансе ток может быть очень большим, а напряжения на емкости и индуктивности будут значительно превышать напряжение источника тока. Разность фаз при резонансе $\varphi = 0$.

Генераторы.

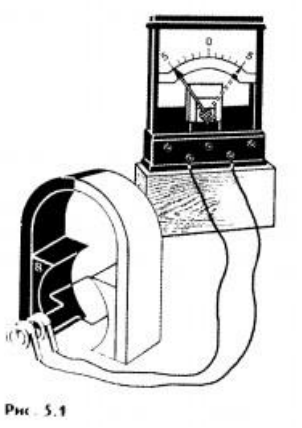
Электрический ток вырабатывается в генераторах – устройствах, преобразующих энергию того или иного вида в электрическую энергию. К генераторам относятся гальванические элементы, электростатические машины, термобатареи, солнечные батареи и т. п. Исследуются возможности создания принципиально новых типов генераторов.

В термобатареях используется свойство двух контактов разнородных материалов создавать ЭДС за счет разности температур контактов.

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.

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 (Φ_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 вращается 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.


Рис. 5.1

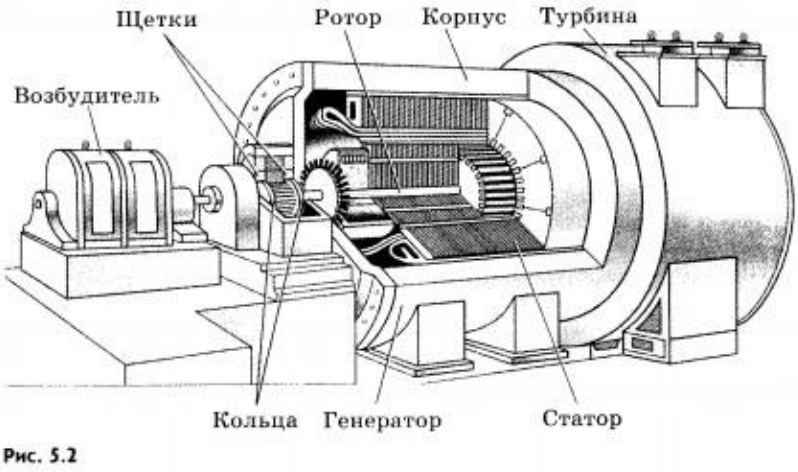


Рис. 5.2

В изображенной на рисунке 5.1 модели генератора вращается проволочная рамка, которая является ротором (по без железного сердечника). Магнитное поле создает неподвижный постоянный магнит. Разумеется, можно было бы поступить и наоборот: вращать магнит, а рамку оставить неподвижной.

Современный генератор электрического тока – это внушительное сооружение из медных проводов, изоляционных материалов и стальных конструкций. При размерах в несколько метров важнейшие детали генераторов изготовляются с точностью до миллиметра. Нигде в природе нет такого сочетания движущихся частей, которые могли бы порождать электрическую энергию столь же непрерывно и экономично.

Мощность в цепи с резистором.

В цепи переменного тока промышленной частоты (ν=50 Гц) сила тока и напряжение изменяются сравнительно быстро. Поэтому при прохождении тока по проводнику, например по нити электрической лампочки, количество выделенной энергии также будет быстро меняться со временем. Но этих быстрых изменений мы не замечаем.

Как правило, нам нужно бывает знать среднюю мощ ностъ тока на участке цепи за большой промежуток времени, включающий много периодов. Для этого достаточно найчи среднюю мощность за один период. Под средней за период, мощностью переменного тока понимают отношение суммарной энергии, поступающей в цепь за период, к периоду.

Мощность в цепи постоянного тока на участке с сопротивлением R определяется формулой

$$P=I^2R. \quad (4.18)$$

На протяжении очень малого интервала времени переменный ток можно считать практически постоянным.

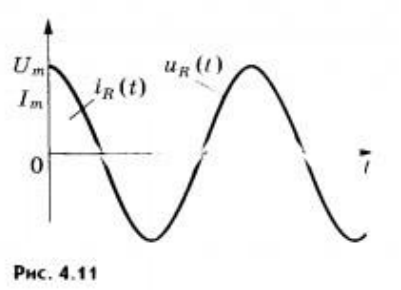


Рис. 4.11

Поэтому мгновенная мощность в цепи переменного тока на участке, имеющем активное сопротивление R, определяется формулой

$$P=i^2R. \quad (4.19)$$

Найдем среднее значение мощности за период. Для этого сначала преобразуем формулу (4.19), подставляя в нее выражение (4.16) для силы тока и используя известное из математики соотношение $\cos^2\alpha = \frac{1+\cos 2\alpha}{2}$:

$$P = \frac{I_m^2 R}{2}(1+\cos 2\omega t) = \frac{I_m^2 R}{2} + \frac{I_m^2 R}{2}\cos 2\omega t. \quad (4.20)$$

График зависимости мгновенной мощности от времени изображен на рисунке 4.12, а. Согласно графику (рис. 4.12, б.), на протяжении одной восьмой периода, когда $\cos 2\omega t > 0$, мощность в любой момент времени больше, чем $\frac{I_m^2 R}{2}$. Зато на протяжении следующей восьмой части периода, когда $\cos 2\omega t < 0$, мощность в любой момент времени меньше, чем $\frac{I_m^2 R}{2}$. Среднее за период значение $\cos 2\omega t$ равно нулю, а значит равно нулю второе слагаемое в уравнении (4.20).

Средняя мощность $\overline{P}$ равна, таким образом, первому члену в формуле (4.20):

$$\overline{P} = \overline{i}^2 R = \frac{I_m^2 R}{2}. \quad (4.21)$$

Действующие значения силы тока и напряжения. Из формулы (4.21) видно, что величина $\frac{I_m^2}{2}$ есть среднее за период значение квадрата силы тока:

$$i^2 = \frac{I_m^2}{2}. \quad (4.22)$$

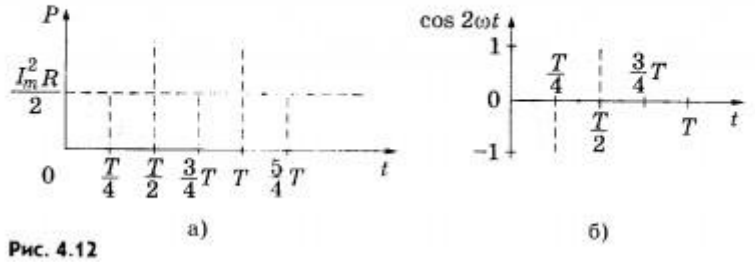


Рис. 4.12

Величина, равная квадратному корню из среднего значения квадрата силы тока, называется действующим значением силы переменного тока. Действующее зртачепие силы неременного тока обозначается через I:

$$I = \sqrt{\overline{i}^2} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (4.23)$$

Действующее значение переменного напряжения определяется аналогично действующему значению силы тока:

$$U = \sqrt{\overline{u^2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \qquad (4.24)$$

Заменяя в формуле (4.17) амплитудные значения силы тока и напряжения на их действующие значения, получаем

$$I = \frac{U}{R}. \qquad (4.25)$$

Это закон Ома для участка цепи переменного тока с резистором.

Как и при механических колебаниях, в случае электрических колебаний обычно нас не интересуют значения силы тока, напряжения и других величин в каждый момент времени.

Именно действующие значения силы тока и напряжения регистрируют амперметры и вольтметры переменного тока. Кроме того, действующие значения удобнее мгновенных значений еще и потому, что именно они непосредственно определяют среднее значение мощности P переменного тока: $\mathbf{P=I^2R=UI.}$

Колебания силы тока в цепи с резистором совпадают по фазе с колебаниями напряжения, а мощность определяется действующими значениями силы тока и напряжения.

Вопросы для закрепления:

1. В чем заключается явление резонанса?
2. Чему равна резонансная частота?
3. Как определяется мощность переменного тока**?**
4. Что такое коэффициент мощности?
5. Объясните принцип работы индукционного генератора переменного тока
6. Из каких составных частей состоит генератор переменного тока?
7. Объясните роль ротора и статора в работе генератора

37. Трансформатор. Производство и передача электрической энергии.

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.

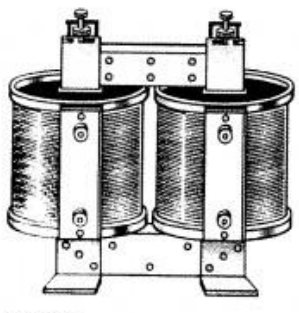


Рис. 5.3

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.

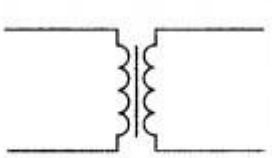


Рис. 5.4

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

$$e = -\Phi', \qquad (5.1)$$

где Ф' – 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

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}. \qquad (5.2)$$

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:

$$|u_1| \approx |e_1|. \qquad (5.3)$$

При разомкнутой вторичной обмотке трансформатора ток в ней не идет, и имеет место соотношение

$$|u_2| = |e_2|. \qquad (5.4)$$

Мгновенные значения ЭДС e_1 и e_2 изменяются синфазно (одновременно достигают максимума и одновременно проходят через ноль). Поэтому их отношение в формуле (5.2) мояию заменить отношением действующих значений $\mathscr{E}_1$ этих ЭДС или, учитывая равенства (5.3) и (5.4), отношением действующих значений напряжений U_1 и U_2:

$$\frac{\mathscr{E}_1}{\mathscr{E}_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{N_1}{N_2} = K. \qquad (5.5)$$

Величина К называется коэффициентом трансформации. Он равен отношению напряжений в первичной и вторичной обмотках трансформатора. При К>1 трансформатор является понижающим, а при К<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:

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2, \qquad (5.6)$$

отсюда

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}. \qquad (5.7)$$

Это означает, что, повышая с помощью трансформатора нанрлжение 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.

Передача электроэнергии.

Потребители электроэнергии имеются повсюду. Производится же она в сравнительно немногих местах, близких к источникам топливо- и гидроресурсов. **Электроэнергию** не удается консервировать в болыпих масштабах. Она должна быть потреблена сразу же после получения. Поэтому возникает необходимость в передаче электроэнергии на большие расстояния.

Передача электроэнергии связана с заметными потерями, так как электрический ток нагревает провода линий электропередачи. В соответствии с законом Джоуля-Ленца энергия, расходуемая на нагрев проводов линии, определяется формулой

$$Q = I^2 R t = \frac{P^2}{U^2} R t,$$

где R – сопротивление линии, U – передаваемое напряжение, P – мощность источника тока.

При очень большой длине линии передача энергии может стать экономически невыгодной. Значительно снизить сопротивление линии R практически весьма трудно. Поэтому приходится уменьшать силу тока I.

Так как мощность источника тока P равна произведению силы тока I на напряжение U, то для уменьшения передаваемой мощности нужно повысить передаваемое напряжение в линии передачи.

Поэтому на крупных электростанциях устанавливают повышающие трансформаторы. Трансформатор увеличивает напряжение в линии во столько же раз, во сколько раз уменьшает силу тока.

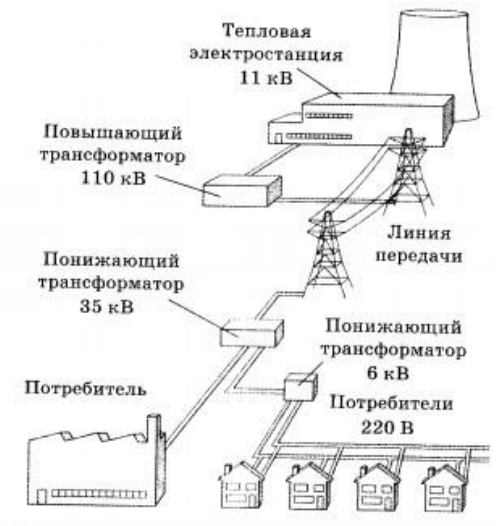


Рис. 5.7

Чем длиннее линия передачи, тем выгоднее использовать более высокое напряжение. Так, в высоковольтной линии передачи Волжская ГЭС – Москва и некоторых других используют напряжение 500 кВ. Между тем генераторы переменного тока настраивают на напряжения, не превышающие 16—20 кВ. Более высокое напряжение потребовало бы принятия

сложных специальных мер для и полиции обмоток и других частей генераторов.

Это достигается с помощью понижающих трансформаторов. Общая схема передачи энергии и ее распределения показана на рисунке 5.7.

Обычно понижение напряжения и соответственно увеличение силы тока осуществляются в несколько этапов. На каждом этапе напряжение становится все меньше, а территория, охватываемая электрической сетью, – все шире.

При очень высоком напряжении между проводами может начаться разряд, приводящий к потерям энергии. Допустимая амплитуда переменного напряжения должна быть такой, чтобы при заданной площади поперечного сечения провода потери энергии вследствие разряда были незначительными .

Электрические станции ряда районов страны объединены высоковольтными линиями электропередачи, образуя общую электрическую сеть, к которой подключены потребители. Такое объединение, называемое энергосистемой, дает возможность сгладить пиковые нагрузки потребления энергии в утренние и вечерние часы. Энергосистема обеспечивает бесперебойность подачи энергии потребителям вне зависимости от места их расположения. Сейчас почти вся территория нашей страны обеспечивается электроэнергией объединенными энергетическими системами. Действует Единая энергетическая система европейской части страны.

Передача электроэнергии на большие расстояния с малыми потерями – сложная задача. Использование электрического тока высокого напряжения помогает успешно разрешить ее.
се технологические процессы любого производства связаны с потреблением энергии. На их выполнение расходуется подавляющая часть энергетических ресурсов.

Важнейшую роль на промышленном предприятии играет электрическая энергия – самый универсальный вид энергии, являющейся основным источником получения механической энергии.

Преобразование энергии различных видов в электрическую происходит на ***электростанциях***.

Электростанциями называются предприятия или установки, предназначенные для производства электроэнергии. Топливом для электрических станций служат природные богатства – уголь, торф, вода, ветер, солнце, атомная энергия и др.

В зависимости от вида преобразуемой энергии электростанции могут быть разделены на следующие основные типы: тепловые, атомные, гидроэлектростанции, гидроаккумулирующие, газотурбинные, а также маломощные электрические станции местного значения – ветряные, солнечные, геотермальные, морских приливов и отливов, дизельные и др.

Основная часть электроэнергии (до 80%) вырабатывается на тепловых электростанциях (ТЭС). Процесс получения электрической энергии на ТЭС заключается в последовательном преобразовании энергии сжигаемого топлива в тепловую энергию водяного пара, приводящего во вращение турбоагрегат (паровую турбину, соединённую с генератором). Механическая энергия вращения преобразуется генератором в электрическую. Топливом для электростанций служат каменный уголь, торф, горючие сланцы, естественный газ, нефть, мазут, древесные отходы.

При экономичной работе ТЭС, т.е. при одновременном отпуске потребителем оптимальных количеств электроэнергии и теплоты, их КПД достигает более 70 %. В период, когда полностью прекращается потребление теплоты (например, в неотопительный сезон), КПД станции снижается.

Атомные электростанции (АЭС) отличаются от обычной паротурбинной станции тем, что на АЭС в качестве источника энергии используется процесс деления ядер урана, плутония, тория и др. В результате расщепления этих материалов в специальных устройствах – реакторах, выделяется огромное количество тепловой энергии.

По сравнению с ТЭС атомные электростанции расходуют незначительное количество горючего. Такие станции можно сооружать в любом месте, т.к. они не связаны с местом расположения естественных запасов топлива. Кроме того, окружающая среда не загрязняется дымом, золой, пылью и сернистым газом.

На гидроэлектростанциях (ГЭС) водная энергия преобразуется в электрическую при помощи гидравлических турбин и соединённых с ними генераторов.

Большинство электростанций объединены в ***энергетические системы***, к каждой из которых предъявляются следующие требования:

- Соответствие мощности генераторов и трансформаторов максимальной мощности потребителей электроэнергии.
- Достаточная пропускная способность линий электропередач (ЛЭП).
- Обеспечение бесперебойного электроснабжения при высоком качестве энергии.
- Экономичность, безопасность и удобство в эксплуатации.

Передачу электроэнергии на большие расстояния осуществляют при высоком напряжении (до 500кВт и более), чем обеспечиваются минимальные электрические потери в линиях электропередачи и получается большая экономия материалов за счёт сокращения сечений проводов. Поэтому в процессе передачи и распределения электрической энергии приходится повышать и понижать напряжение. Этот процесс выполняется посредством электромагнитных устройств, называемых трансформаторами. **Трансформатор** не является электрической машиной, т.к. его работа не связана с преобразованием электрической энергии в механическую и наоборот; он преобразует лишь напряжение электрической энергии. Повышение напряжения осуществляется при помощи повышающих трансформаторов на электростанциях, а понижение – при помощи понижающих трансформаторов на подстанциях у потребителей.

Промежуточным звеном для передачи электроэнергии от трансформаторных подстанций к приёмникам электроэнергии являются ***электрические сети***.

Вопросы для закрепления:

1. Объясните принцип действия трансформатора
2. В каких целях используется трансформатор?
3. Что такое коэффициент трансформации?
4. Какой трансформатор называют понижающим; повышающим?
5. Как осуществляется передача электроэнергии на большие расстояния?
6. В чем преимущества передачи энергии на большие расстояния при использовании постоянного тока?

38. Учение об электромагнитном поле. Идеи Максвелла. Электромагнитные волны.

Изучая свойства электромагнитного поля, Максвелл задался вопросом: если переменное магнитное поле порождает электрическое поле, то не существует ли в природе обратного процесса? Не порождает ли переменное электрическое поле, в свою очередь, магнитное? Это соображение, диктуемое уверенностью в единстве природы, во внутренней стройности и гармонии ее законов, составляет основу гипотезы Максвелла.

Возникновение магнитного поля при изменении электрического поля.

Максвелл допустил, что такого рода процесс реально происходит в природе. Во всех случаях, когда электрическое поле изменяется со временем, оно порождает магнитное поле. Линии магнитной индукции этого поля охватывают линии напряженности электрического

поля (рис. 2.16), подобно тому как линии напряженности электрического поля охватывают линии индукции переменного магнитного поля.

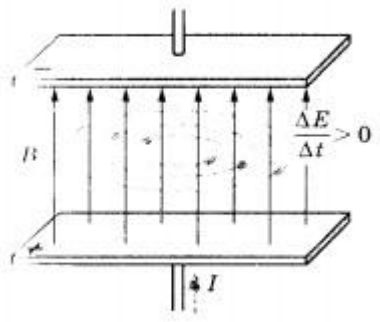


Рис. 2.16

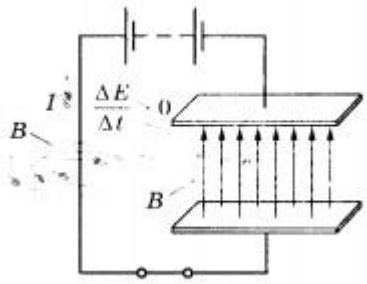


Рис. 2.17

Но теперь при возрастании напряженности электрического поля направление вектора индукции $\vec{B}$ возникающего магнитного поля образует правый, винт с направлением вектора $\vec{E}$.

При убывании напряженности электрического поля направление вектора магнитной индукции $\vec{B}$ образует с направлением вектора $\vec{E}$ левый винт.

Согласно гипотезе Максвелла магнитное поле, например, при зарядке конденсатора после замыкания ключа создается не только током в проводнике, но и изменяющимся электрическим полем, существующим в пространстве между обкладками конденсатора (рис. 2.17).

Причем изменяющееся электрическое поле создает такое же магнитное поле, как если бы ***между обкладками существовал электрический ток, такой же, как в проводнике.*** Справедливость гипотезы Максвелла была доказана экспериментальным обнаружением электромагнитных волн. Электромагнитные волны существуют потому, что переменное магнитное поле порождает переменное электрическое поле, которое, в свою очередь, порождает переменное магнитное поле и т. д.

Электромагнитное поле.

После открытия взаимосвязи между изменяющимися электрическим и магнитным полями стало ясно, что эти поля не существуют обособленно, независимо одно от другого. Нельзя создать переменное магнитное поле без того, чтобы одновременно в пространстве не возникло и электрическое поле. И наоборот, переменное электрическое поле не может существовать без магнитного.

Не менее важно и то, что электрическое поле без магнитного или магнитное без электрического могут существовать лишь по отношению к определенной системе отсчета. Так, покоящийся заряд создает только электрическое поле (рис. 2.18). Но ведь заряд покоится лишь относительно определенной системы отсчета. Относительно других систем отсчета он может двигаться и, следовательно, создавать и магнитное поле (рис. 2.19).

Точно так же в системе отсчета, связанной с магнитом, обнаруживается лишь магнитное поле. Но движущийся относительно магнита наблюдатель обнаружит и электрическое поле. Ведь в системе отсчета, движущейся относительно магнита, магнитное поле будет меняться с течением времени по мере приближения наблюдателя к магниту или удаления от него. Переменное же во времени магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

Значит, утверждение, что в данной точке пространства существует только электрическое или только магнитное поле, бессмысленно, если не указать, по отношению к какой системе отсчета эти поля рассматриваются. Отсутствие электрического поля в системе отсчета, содержащей покоящийся магнит, совсем не означает, что электрического поля нет вообще.

По отношению к любой движущейся относительно магнита системе отсчета это поле может быть обнаружено.

Электрические и магнитные поля – проявление единого целого – электромагнитного поля. Электромагнитное поле – особая форма материи, осуществляющая электромагнитное взаимодействие. В зависимости от того, в какой системе отсчета рассматриваются электромагнитные процессы, проявляются те или иные стороны единого целого – электромагнитного поля. Все инерциальные системы отсчета равноправны.

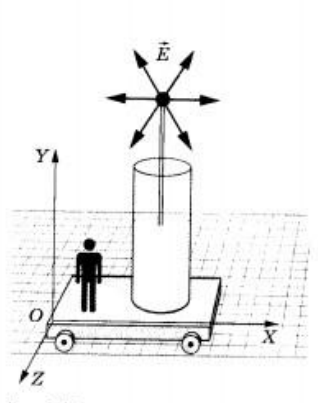


Рис. 2.18

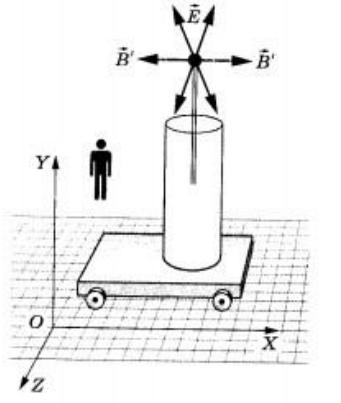


Рис. 2.19

Поэтому ни одному из обнаруживаемых проявлений электромагнитного поля не может быть отдано предпочтение.

Согласно гипотезе Максвелла переменное электрическое поле порождает магнитное поле. Электромагнитное поле – единое целое: в зависимости от системы отсчета nроявляются те или иные свойства поля.

Электромагнитное поле – это особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между заряженными частицами. Представляет собой взаимосвязанные переменные электрическое поле и магнитное поле. Взаимная связь электрического Е и магнитного Н полей заключается в том, что всякое изменение одного из них приводит к появлению другого: переменное электрическое поле, порождаемое ускоренно движущимися зарядами (источником), возбуждает в смежных областях пространства переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, возбуждает в прилегающих к нему областях пространства переменное электрическое поле.

Электрическое поле представляет собой частную форму проявления электромагнитного поля. В своем проявлении это силовое поле, основным свойством которого является способность воздействовать на внесенный в него электрический заряд с силой, не зависящей от скорости заряда. Источниками электрического поля могут быть электрические заряды (движущиеся и неподвижные) и изменяющиеся во времени магнитные поля.

Магнитное поле представляет собой частную форму электромагнитного поля. В своем проявлении это силовое поле, основным свойством которого является способность воздействовать на движущиеся электрические заряды (в т.ч. на проводники с током), а также на магнитные тела независимо от состояния их движения. Источниками магнитного поля могут быть движущиеся электрические заряды (проводники с током), намагниченные тела и изменяющиеся во времени электрические поля.

Источниками электромагнитных излучений радиочастот (ЭМИ РЧ) и сверхвысоких частот (СВЧ) являются технические средства и изделия, которые предназначены для применения в различных сферах человеческой деятельности и в основе которых используются физические свойства этих излучений: распространение в пространстве и отражение, нагрев материалов, взаимодействие с веществами.

Электромагнитное поле имеет двойную физическую природу. Это два взаимосвязанных поля – электрическое и магнитное. Только в особых случаях их можно разделить, но это будут всего лишь частные варианты того же электромагнитного поля.

Материальность электромагнитного *поля* проявляется физически в том, что оно производит силовое действие на частицы, обладающие электрическим зарядом, электрическим или магнитным моментами, а так же в том, что оно обладает энергией, массой и импульсом. При таких свойствах электромагнитное поле проявляет себя как реальный вид материи, а не как теоретическая модель, оторванная от реальности.

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, 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

$$W_м = \frac{LI^2}{2}. \qquad (2.9)$$

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: $w_м \sim B^2$, подобно тому как плотность энергии электрического поля пропорциональна квадрату напряженности электрического поля $w_м \sim B^2$.

Магнитное поле, созданное электрическим током, обладает энергией, прямо пропорциональной квадрату силы тока.

Существование электромагнитных волн было теоретически предсказано великим английским физиком Дж. Максвеллом в 1864 году. Максвелл проанализировал все известные к тому времени законы электродинамики и сделал попытку применить их к изменяющимся во времени электрическому и магнитному полям. Он обратил внимание на ассиметрию взаимосвязи между электрическими и магнитными явлениями. Максвелл ввел в физику понятие вихревого электрического поля и предложил новую трактовку закона электромагнитной индукции, открытой Фарадеем в 1831 г.:

Всякое изменение магнитного поля порождает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле, силовые линии которого замкнуты.

Максвелл высказал гипотезу о существовании и обратного процесса:

Изменяющееся во времени электрическое поле порождает в окружающем пространстве магнитное поле.

Рис. 2.6.1 и 2.6.2 иллюстрируют взаимное превращение электрического и магнитного полей.

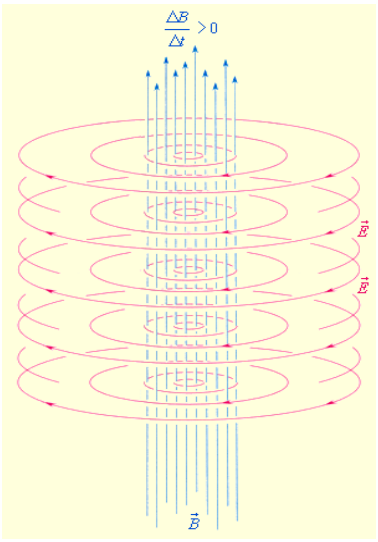


Рисунок 2.6.1.
Закон электромагнитной индукции в трактовке Максвелла

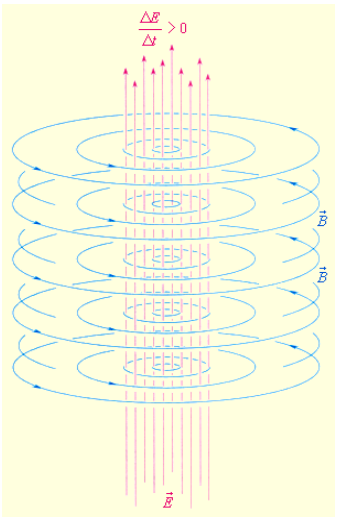


Рисунок 2.6.2.
Гипотеза Максвелла. Изменяющееся электрическое поле порождает магнитное поле

Эта гипотеза была лишь теоретическим предположением, не имеющим экспериментального подтверждения, однако на ее основе Максвеллу удалось записать непротиворечивую систему уравнений, описывающих взаимные превращения электрического и магнитного полей, т. е. систему уравнений электромагнитного поля (уравнений Максвелла). Из теории Максвелла вытекает ряд важных выводов:

Существуют электромагнитные волны, то есть распространяющееся в пространстве и во времени электромагнитное поле. Электромагнитные волны поперечны – векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны (рис. 2.6.3).

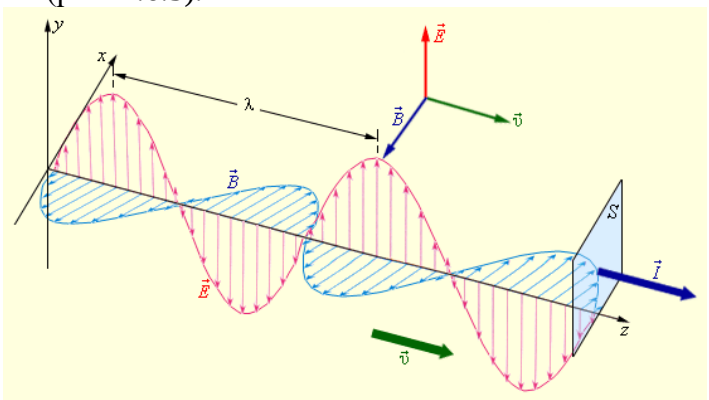


Рисунок 2.6.3.

Синусоидальная (гармоническая) электромагнитная волна. Векторы $\vec{E}$, $\vec{B}$ и $\vec{v}$ взаимно перпендикулярны

Электромагнитные волны распространяются в веществе с конечной скоростью

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}}.$$

Здесь **ε** и **μ** – диэлектрическая и магнитная проницаемости вещества, **ε0** и **μ0** – электрическая и магнитная постоянные: **ε0=8,85419·10–12 Ф/м, μ0=1,25664·10–6 Гн/м**.

Длина волны λ в синусоидальной волне свявзана со скоростью υ распространения волны соотношением λ=υT=υ/f, где f – частота колебаний электромагнитного поля, T=1/f.

Скорость электромагнитных волн в вакууме (ε=μ=1):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 2{,}99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Скорость с распространения электромагнитных волн в вакууме является одной из фундаментальных физических постоянных.

Вывод Максвелла о конечной скорости распространения электромагнитных волн находился в противоречии с принятой в то время теорией дальнодействия, в которой скорость распространения электрического и магнитного полей принималась бесконечно большой. Поэтому теорию Максвелла называют теорией близкодействия.

Вопросы для закрепления:

1. Какие идеи Фарадея нашли свое продолжение в теории Максвелла?
2. Назовите основные физические величины, отражаемые в теории Максвелла
3. Назовите источники электрической компоненты электромагнитного поля
4. В результате каких процессов возникает магнитное поле?
5. Почему утверждение о том, что в данной точке пространства существует только электрическое поле или только магнитное поле, не является точным?
6. В чем заключается взаимная связь электрического E и магнитного H полей ?

39. Излучение электромагнитных волн. Опыты Герца. Энергия и свойства электромагнитных волн.

Первое экспериментальное подтверждение электромагнитной теории Максвелла было дано примерно через 15 лет после создания теории в опытах Г. Герца (1888 г.). Герц не только экспериментально доказал существование электромагнитных волн, но впервые начал изучать их свойства – поглощение и преломление в разных средах, отражение от металлических поверхностей и т. п. Ему удалось измерить на опыте длину волны и скорость распространения электромагнитных волн, которая оказалась равной скорости света.

Опыты Герца сыграли решающую роль для доказательства и признания электромагнитной теории Максвелла. Через семь лет после этих опытов электромагнитные волны нашли применение в беспроводной связи (А. С. Попов, 1895 г.).

Электромагнитные волны могут возбуждаться только **ускоренно движущимися зарядами**. Цепи постоянного тока, в которых носители заряда движутся с неизменной скоростью, не являются источником электромагнитных волн. В современной радиотехнике излучение электромагнитных волн производится с помощью антенн различных конструкций, в которых возбуждаются быстропеременные токи.

Простейшей системой, излучающей электромагнитные волны, является небольшой по размерам электрический диполь, дипольный момент $p(t)$ которого быстро изменяется во времени.

Такой элементарный диполь называют ***диполем Герца***. В радиотехнике диполь Герца эквивалентен небольшой антенне, размер которой много меньше длины волны λ (рис. 2.6.4).

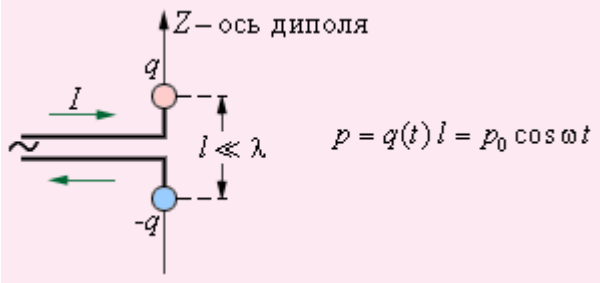


Рисунок 2.6.4.
Элементарный диполь, совершающий гармонические колебания

Рис. 2.6.5 дает представление о структуре электромагнитной волны, излучаемой таким диполем.

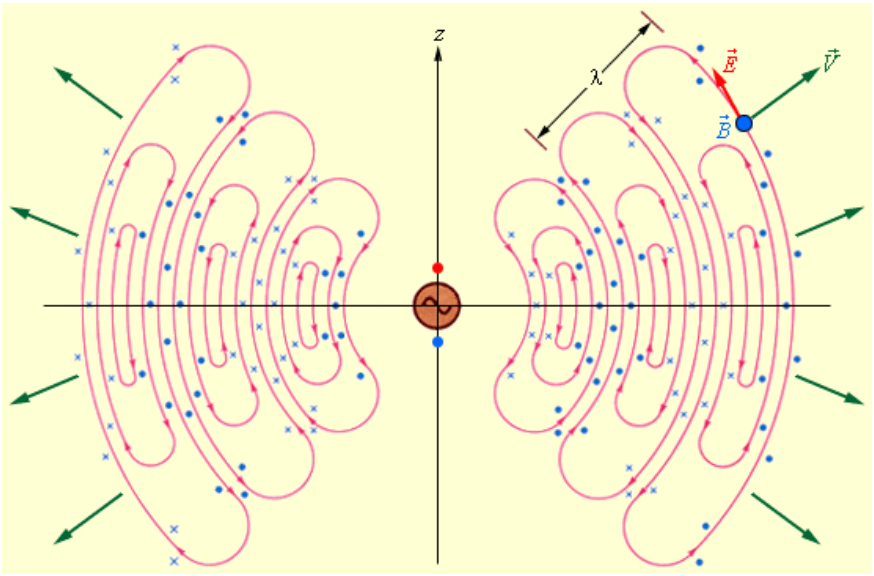


Рисунок 2.6.5.
Излучение элементарного диполя

Следует обратить внимание на то, что максимальный поток электромагнитной энергии излучается в плоскости, перпендикулярной оси диполя. Вдоль своей оси диполь не излучает энергии. Герц использовал элементарный диполь в качестве излучающей и приемной антенн при экспериментальном доказательстве существования электромагнитных волн.

В электромагнитной волне происходят взаимные превращения электрического и магнитного полей. Эти процессы идут одновременно, и электрическое и магнитное поля выступают как равноправные «партнеры». Поэтому объемные плотности электрической и магнитной энергии равны друг другу: $w_э = w_м$.

$$\frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}.$$

Отсюда следует, что в электромагнитной волне модули индукции магнитного поля $\vec{B}$ и напряженности электрического поля $\vec{E}$ в каждой точке пространства связаны соотношением

$$B = \frac{\sqrt{\varepsilon\mu}}{c} E.$$

Электромагнитные волны переносят энергию. При распространении волн возникает поток электромагнитной энергии. Если выделить площадку S (рис. 2.6.3), ориентированную

перпендикулярно направлению распространения волны, то за малое время Δt через площадку протечет энергия $\Delta W_{эм}$, равная $\Delta W_{эм}=(w_э+w_м)\upsilon S\Delta t$

Плотностью потока или ***интенсивностью*** I называют электромагнитную энергию, переносимую волной за единицу времени через поверхность единичной площади:

$$I=\frac{1}{S}\frac{\Delta W_{эм}}{\Delta t}=(w_э+w_м)\upsilon.$$

Подставляя сюда выражения для $w_э$, $w_м$ и υ, можно получить:

$$I=\sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}}\cdot E^2=\frac{EB}{\mu\mu_0}.$$

$\vec{I}$,

Поток энергии в электромагнитной волне можно задавать с помощью вектора направление которого совпадает с направлением распространения волны, а модуль равен $EB/\mu\mu_0$. Этот вектор называют ***вектором Пойнтинга***.

В синусоидальной (гармонической) волне в вакууме среднее значение $I_{ср}$ плотности потока электромагнитной энергии равно

$$I_{ср}=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}E_0^2,$$

Где E_0 – амплитуда колебаний напряженности электрического поля.

Плотность потока энергии в СИ измеряется в **ваттах на квадратный метр** (Вт/м^2).

Из теории Максвелла следует, что электромагнитные волны должны оказывать давление на поглощающее или отражающее тело. Давление электромагнитного излучения объясняется тем, что под действием электрического поля волны в веществе возникают слабые токи, то есть упорядоченное движение заряженных частиц. На эти токи действует сила Ампера со стороны магнитного поля волны, направленная в толщу вещества. Эта сила и создает результирующее давление. Обычно давление электромагнитного излучения ничтожно мало. Так, например, давление солнечного излучения, приходящего на Землю, на абсолютно поглощающую поверхность составляет примерно 5 мкПа. Первые эксперименты по определению давления излучения на отражающие и поглощающие тела, подтвердившие вывод теории Максвелла, были выполнены П. Н. Лебедевым в 1900 г. Опыты Лебедева имели огромное значение для утверждения электромагнитной теории Максвелла.

Существование давления электромагнитных волн позволяет сделать вывод о том, что электромагнитному полю присущ **механический импульс**. Импульс электромагнитного поля в единичном объеме выражается соотношением

$$g=\frac{w_{эм}}{c},$$

где $w_{эм}$ – объемная плотность электромагнитной энергии, c – скорость распространения волн в вакууме. Наличие электромагнитного импульса позволяет ввести понятие электромагнитной массы.

Для поля в единичном объеме

$$\rho_{эм}=\frac{g}{c}=\frac{w_{эм}}{c^2}.$$

Отсюда следует:

$$w_{эм}=\rho_{эм}c^2.$$

Это соотношение между массой и энергией электромагнитного поля в единичном объеме является универсальным законом природы. Согласно специальной теории относительности, оно справедливо для любых тел независимо от их природы и внутреннего строения.

Таким образом, электромагнитное поле обладает всеми признаками материальных тел – энергией, конечной скоростью распространения, импульсом, массой. Это говорит о том, что электромагнитное поле является одной из форм существования материи.

Вопросы для закрепления:

1. Почему закрытый колебательный контур не может излучать электромагнитные волны?
2. Почему в открытом вибраторе при электромагнитных колебаниях излучается волна?
3. Объясните опыты Герца по возбуждению и регистрации электромагнитных волн
4. Какую роль играет искровой промежуток в излучающем и принимающем вибраторах?
5. Чем вызван расход энергии вовремя электромагнитных колебаний в контуре?
6. Какой характеристикой волны является плотность потока электромагнитной волны?
7. Как меняется энергия волны с расстоянием?

40. Изобретение радио А.С. Поповым. Принципы современной радиосвязи. Модуляция и детектирование

Попов Александр Степанович (1859—1906) – русский физик, изобретатель радио. Убежденный в возможности связи без проводов при помощи электромагнитных волн, построил первый в мире радиоприемник, применив в его схеме чувствительный элемент – когерер. Во время опытов по радиосвязи с помощью приборов Попова было впервые обнаружено отражение радиоволн от кораблей.

Сила тока в катушке электромагнитного реле возрастает, и оно включает звонок. Молоточек звонка, ударяя по когереру, встряхивает его и возвращает в исходное состояние. С последним встряхиванием когерера аппарат готов к приему новой волны. Схема приемника А. С. Попова приведена на рисунке 7.7, который был взят из его статьи в «Журнале Русского физико-химического общества».

Чтобы повысить чувствительность аппарата, А. С. Попов один из выводов когерера заземлил, а другой присоединил к высоко поднятому куску проволоки, создав тем самым первую в мире приемную антенну для беспроволочной связи. Заземление превращает проводящую поверхность земли в часть открытого колебательного контура, что увеличивает дальность приема.

Хотя современные радиоприемники очень мало напоминают приемник А. С. Попова, основные принципы их действия те же, что и в его приборе. Современный приемник так же имеет антенну, в которой приходящая волна вызывает очень слабые электромагнитные колебания. Как и в приемнике А. С. Попова, энергия этих колебаний не используется непосредственно для приема. Слабые сигналы лишь управляют источниками энергии, питающими последующие цепи. Сейчас такое управление осуществляется с помощью полупроводниковых приборов.

7 мая 1895 г. на заседании Русского физико-химического общества в Петербурге А. С. Попов продемонстрировал действие своего прибора, явившегося, по сути дела, первым в мире радиоприемником. День 7 мая стал днем рождения радио. Ныне он ежегодно отмечается в нашей стране.

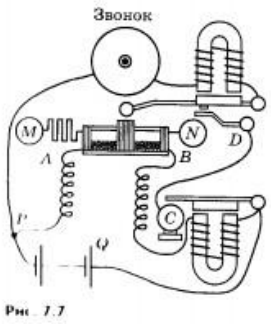


Рис. 7.7

А. С. Попов продолжал настойчиво совершенствовать приемную и передающую аппаратуру. Он ставил своей непосредственной задачей создать прибор для передачи сигналов на большие расстояния.

Вначале радиосвязь была установлена на расстоянии 250 м. Неустанно работая над своим изобретением, А. С. Попов вскоре добился дальности связи более 600 м. Затем па маневрах Черноморского ф.пота в 1899 г. ученый установил радиосвязь на расстоянии свыше 20 км, а в 1901 г. дальность радиосвязи была уже 150 км. Важную роль в этом сыграла новая конструкция передатчика. Искровой промежуток был размещен в колебательном контуре, индуктивно связанном с передающей антенной и настроенном с ней в резонанс. Существенно изменились и способы регистрации сигнала. Параллельно звонку был подключен телеграфный аппарат, позволивший вести автоматическую запись сигналов. В 1899 г. была обнаружена возможность приема сигналов с помощью телефона. В начале 1900 г. радиосвязь успешно использовали в ходе спасательных работ в Финском заливе. При участии Л. Попова радиосвязь начали применять на флоте и в армии России.

За границей усовершенствование подобных приборов проводилось фирмой, организованной итальянским инженером Г. Маркони. Опыты, поставленные в широком масштабе, позволили осуществить радиотелеграфную передачу через Атлантический океан.

Впервые радиосвязь была установлена в России А. С. Поповым, создавшим аппаратуру, принимающую и передающую сигналы

Принципы радиосвязи.

Принципы радиосвязи заключаются в следующем. Переменный электрический ток высокой частоты, созданный в передающей антенне, вызывает в окружающем пространстве быстроменяющееся электромагнитное поле, которое распространяется в виде электромагнитной волны. Достигая приемной антенны, электромагнитная волна вызывает в ней переменный ток той же частоты, на которой работает передатчик.

Важнейшим этапом в развитии радиосвязи было создание в 1913 г. генератора незатухающих электромагнитных колебаний. Кроме передачи телеграфных сигналов, состоящих из коротких и более продолжительных импульсов («точки» и «тире») электромагнитных волн, стала возможной надежная и высококачественная радиотелефонная связь – передача речи и музыки с помощью электромагнитных волн.

Радиотелефонная связь.

При радиотелефонной связи колебания давления воздуха в звуковой волне превращаются с помощью микрофона в электрические колебания той же формы. Казалось бы, если эти колебания усилить и подать в антенну, то можно будет передавать на расстояние речь и музыку с помощью электромагнитных волн.

Однако в действительности такой способ передачи неосуществим. Дело в том, что частота звуковых колебаний мала, а электромагнитные волны низкой (звуковой) частоты имеют малую интенсивность.

Модуляция.

Для осуществления радиотелефонной связи необходимо использовать высокочастотные колебания, интенсивно излучаемые антенной. Незатухающие гармонические колебания высокой частоты вырабатывает генератор, например генератор на транзисторе.

Для передачи звука эти высокочастотные колебания изменяют, или, как говорят, модулируют, с помощью электрических колебаний низкой (звуковой) частоты. Можно, например, изменять со звуковой частотой амплитуду высокочастотных колебаний. Этот способ называют амплитудной модуляцией.

Без модуляции мы в лучшем случае сможем контролировать лишь, работает станция или молчит. Без модуляции нет ни телеграфной, ни телефонной, ни телевизионной передачи.

Модуляция – медленный процесс. Это такие изменения в высокочастотной колебательной системе, при которых она успевает совершить очень много высокочастотных колебаний, прежде чем их амплитуда изменится заметным образом.

Детектирование.

В приемнике из модулированных колебаний высокой частоты выделяются низкочастотные колебания. Такой процесс преобразования сигнала называют детектированием. Полученный в результате детектирования сигнал соответствует тому звуковому сигналу, который действовал на микрофон передатчика. После усиления колебания низкой частоты могут быть превращены в звук.

Вопросы для закрепления:

1. Какие принципы радиосвязи являются основными?
2. Из каких частей состоит первый приемник?
3. На каком физическом принципе основана работа когерера?
4. Что называется модуляцией?
5. С какой целью применяют детектор?
6. Нарисуйте схему простейшего детекторного приемника

41. Распространение радиоволн. Радиолокация. Понятие о телевидении. Современные средства связи.

Распространение радиоволн, процессы распространения электромагнитных волн радиодиапазона в атмосфере, космическом пространстве и толще Земли. *Радиоволны*, излучаемые передатчиком, прежде чем попасть в приёмник, проходят путь, который может быть сложным. Радиоволны могут достигать пункта приёма, распространяясь по прямолинейным траекториям, огибая выпуклую поверхность Земли, отражаясь от ионосферы, и т.д. Способы распространения радиоволн существенно зависят от длины волны **l**, от освещённости земной атмосферы Солнцем и от ряда др. факторов.

Прямые волны. В однородных средах радиоволны распространяются прямолинейно с постоянной скоростью, подобно световым лучам (радиолучи). Такое распространение радиоволн называется свободным. Условия распространения радиоволн в космическом пространстве при радиосвязи между наземной станцией и космическим объектом, между двумя космическими объектами, при радиоастрономических наблюдениях, при радиосвязи наземной станции с самолётом или между самолётами близки к свободному.

Волну, излученную антенной, на больших расстояниях от неё можно считать плоской. Плотность потока электромагнитной энергии, пропорциональная квадрату напряжённости поля волны, убывает с увеличением расстояния r от источника обратно пропорционально r^2, что приводит к ограничению расстояния, на котором может быть принят сигнал передающей станции. Дальность действия радиостанции (при отсутствии поглощения) равна: $r_д = 4\pi\sqrt{\frac{P_c}{P_ш} G_1 G_2 \lambda}$,

где P_c – мощность сигнала на входе приёмника, $P_ш$ – мощность шумов, G_1, G_2 – коэффициенты направленного действия передающей и приёмной антенн. Скорость распространения радиоволн в свободном пространстве равна скорости света в вакууме: c=300 000 *км*/*сек.*

При распространении волны в материальной среде (например, в земной атмосфере, в толще Земли, в морской воде и т.п.) происходят изменение её фазовой скорости и

поглощение энергии. Это объясняется возбуждением колебаний электронов и ионов в атомах и молекулах среды под действием электрического поля волны и переизлучением ими вторичных волн. Если напряжённость поля волны мала по сравнению с напряжённостью поля, действующего на электрон в атоме, то колебания электрона под действием поля волны происходят по гармоническому закону с частотой пришедшей волны. Поэтому электроны излучают радиоволны той же частоты, но с разными амплитудами и фазами. Сдвиг фаз между первичной и переизлучённой волнами приводит к изменению фазовой скорости. Потери энергии при взаимодействии волны с атомами являются причиной поглощения радиоволн. Поглощение и изменение фазовой скорости в среде характеризуются показателем поглощения **c** и показателем преломления ***n***, которые, в свою очередь, зависят от диэлектрической проницаемости **e** и проводимости **s** среды, а также от длины волны **l**:

$$\chi = \sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\varepsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2} - \varepsilon\right]} \qquad (1)$$

$$n = \sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{\varepsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2} + \varepsilon\right]}$$

Коэффициент поглощения **b=2pc/l**, фазовая скорость **u=*c*/*n***. В этом случае $r_д$ определяется не только характеристиками передатчика, приёмника и длиной волны, но и свойствами среды (**e, s**). В земных условиях распространение радиоволн обычно отличается от свободного. На распространение радиоволн оказывают влияние поверхность Земли, земная атмосфера, структура ионосферы и т.д. Влияние тех или иных факторов зависит от длины волны.

Влияние поверхности Земли на распространение радиоволн зависит от расположения радиотрассы относительно её поверхности.

Радиолокация

Обнаружение и точное определение местонахождения объектов с помощью радиоволн называют радиолокацией. Радиолокационная установка – радиолокатор (или радар) – состоит из передающей и приемной частей. В радиолокации используют электрические колебания сверхвысокой частоты (10^8—10^{11} Гц). Мощный генератор СВЧ связан с антенной, которая излучает остронаправленную волну. В радиолокаторах, работающих на длинах волн порядка 10 см и меньше, такая волна создается антеннами в виде параболических зеркал. Для волн метрового диапазона антенны имеют вид сложных систем вибраторов. При этом острая направленность излучения получается вследствие сложения волн. Антенна устроена так, что волны, посланные каждым из вибраторов, при сложении взаимно усиливают друг друга лишь в заданном направлении. В остальных направлениях происходит полное или частичное их взаимное гашение.

Отраженная волна улавливается либо той же излучающей антенной, либо другой приемной антенной, тоже остронаправленной. Строгая направленность излучения позволяет говорить о луче радиолокатора. Направление на объект и определяется как направление луча в момент приема отраженного сигнала.

Для определения расстояния до цели применяют импульсный режим излучения. Передатчик излучает волны кратковременными импульсами. Длительность каждого импульса составляет миллионные доли секунды, а промежуток между импульсами примерно в 1000 раз больше. Во время пауз принимаются отраженные волны.

Определение расстояния **R** проводится путем измерения общего времени **t** прохождения радиоволн до цели и обратно. Так как скорость радиоволн

$c=3*10^8$ м/с в атмосфере практически постоянна на всем пути луча, то вследствие рассеяния радиоволн до приемника доходит лишь ничтожная часть той энергии, которую излучает передатчик. Потому приемники радиолокаторов усиливают принятый сигнал в миллионы миллионов раз (10^{12}). Такой чувствительный приемник, разумеется, должен быть отключен на время

$$R = \frac{ct}{2}.$$

посылки импульса передатчиком.

Для фиксации посланного и отраженного сигналов используют электронно-лучевую трубку. В момент посылки импульса светлая точка, равномерно движущаяся по экрану электронно-лучевой трубки, отклоняется. На экране появляется всплеск около нулевой отметки шкалы дальности. Светящееся пятнышко на экране продолжает равномерно двигаться вдоль шкалы и в момент приема слабого отраженного сигнала снова отклоняется. Расстояние между всплесками на экране пропорционально времени **t** прохождения сигнала и, следовательно, расстоянию **R** до цели. Это позволяет проградуировать шкалу непосредственно в километрах.

Радиолокационные установки обнаруживают корабли и самолеты на расстояниях до нескольких сот километров. На их работу лишь незначительно влияют условия погоды и время суток. В больших аэропортах локаторы следят за взлетающими и идущими на посадку самолетами. Наземная служба передает по радио пилотам необходимые указания и таким образом обеспечивает безопасность полетов. Внешний вид аэродромного локатора показан на рисунке 7.23. Корабли и самолеты также снабжены радиолокаторами, служащими для навигационных целей. Такие локаторы создают на экране картину расположения объектов, рассеивающих радиоволны, и оператор видит радиолокационную карту местности.

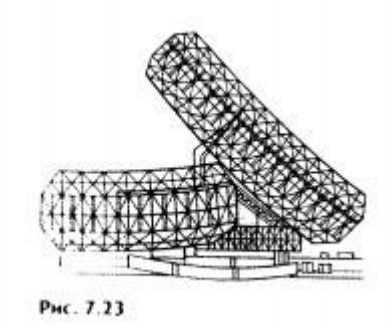


Рис. 7.23

В настоящее время применение радиолокации становится все более разнообразным. С помощью локаторов наблюдают метеоры в верхних слоях атмосферы. Локаторы используются службой погоды для наблюдения за облаками.

Наконец, локаторы используются в космических исследованиях. Каждый космический корабль обязательно имеет на борту несколько радиолокаторов. В 1946 г. в США и Венгрии был осуществлен эксперимент по приему сигнала, отраженного от поверхности Луны. В 1961 г. учеными нашей страны произведена радиолокация планеты Венера, что позволило оценить период ее вращения вокруг своей оси. В настоящее время осуществлена локация и других планет Солнечной системы.

Радиолокаторы используются для обнаружения самолетов и кораблей, в службе погоды, для локации планет и др.

Понятие о телевидении.

Радиоволны используются для передачи не только звука, но и изображения (телевидение).

Принцип передачи изображения на расстоянии состоит в следующем. На передающей станции производится преобразование изображения в последовательность электрических сигналов. Этими сигналами модулируются колебания, вырабатываемые генератором высокой частоты. Модулированная электромагнитная волна переносит информацию на большие расстояния. В приемнике производится обратное преобразование. Высокочастотные модулированные колебания детектируются, а полученный сигнал преобразуется в видимое изображение.

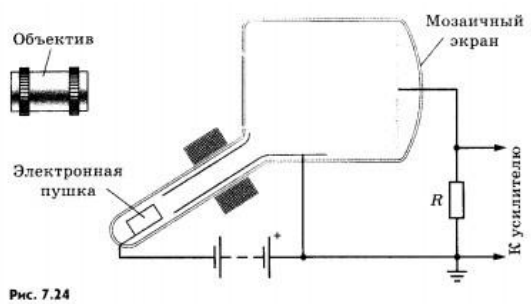


Рис. 7.24

Для передачи движения используется принцип кино: немного отличающиеся друг от друга изображения движущегося объекта (кадры) передаются десятки раз в секунду (в нашем телевидении 50 раз). ***Изображение кадра преобразуется с помощью передающей вакуумной электронной трубки – иконоскопа (рис.***

7.24) – в серию электрических сигналов. Кроме иконоскопа существуют и другие передающие устройства.

Внутри иконоскопа расположен мозаичный экран, на который с помощью оптической системы проецируется изображение объекта. Каждая ячейка мозаики заряжается, причем ее заряд зависит от интенсивности падающего на ячейку света. Этот заряд меняется при попадании на ячейку электронного пучка, создаваемого электронной пушкой. Электронный пучок последовательно попадает на все элементы сначала одной строчки мозаики, затем другой строчки и т. д. (всего 625 строк). От того, насколько сильно меняется заряд ячейки, зависит сила тока в резисторе **R**. Поэтому напряжение на резисторе изменяется пропорционально изменению освещенности вдоль строк кадра.

Высокочастотные сигналы, полученные на выходе трубки, попадают на антенну, излучающую соответствующие электромагнитные волны.

Эти сигналы формируются в телевизионном приемнике после детектирования. Это видеосигналы. Они преобразуются в видимое изображение на экране приемной вакуумной электронной трубки – кинескопа. Электронная пушка такой трубки снабжена электродом, управляющим числом электронов в пучке и, следовательно, свечением экрана в месте попадания луча. Системы катушек горизонтального и вертикального отклонения заставляют электронный луч обегать весь экран точно таким же образом, как электронный луч обегает мозаичный экран в передающей трубке. Синхронность движения лучей в передающей и приемной трубках достигается посылкой специальных синхронизирующих сигналов.

Телевизионные радиосигналы могут быть переданы только в диапазоне ультракоротких (метровых) волн. Такие волны распространяются обычно лишь в пределах прямой видимости антенны. Поэтому для охвата телевизионным вещанием большой территории необходимо размещать телепередатчики как можно ближе друг к другу и поднимать их антенны как можно выше.

Зона надежного приема телевидения непрерывно увеличивается, в основном за счет использования ретрансляционных спутников.

Современные средства связи. В современном мире существуют различные средства связи, которые постоянно развиваются и совершенствуются.

Традиционные виды связи подразделяются на:

- почтовые (переносящие графическую и буквенно-цифровую информацию);
- телефонные (передающие речь);
- телеграфные (предназначенные для переноса буквенно-цифровых сообщений);
- факсимильные (способствующие передаче графической и буквенно-цифровой информации);
- радиорелейные и спутниковые виды связи.

При этом способы передачи информации могут быть проводными (телеграфные, телефонные и т.п.), а также беспроводными. Во втором типе связи, в свою очередь, классифицируются отдельные группы (радио, радиорелейные и спутниковые системы).

При этом передача речи, например, возможна посредством практически любого из видов. Современные виды связи подразделяют на:

- телефонную;
- компьютерную телефонию;
- радиотелефонную;
- системы радиотелефонной сотовой связи;
- системы, включенные в стандарт Wi-Fi.

Вопросы для закрепления:

1. Назовите границы всех диапазонов радиоволн?
2. Рассчитайте частоты, соответствующие различным диапазонам
3. Что называется радиолокацией?

4. Назовите основные понятия в телевидении
5. Основные направления развития средств связи

42. Шкала электромагнитных волн. Биологическое действие высокочастотных электромагнитных волн и защита от них.

Электромагнитные волны классифицируются по длине волны **λ** или связанной с ней частотой волны **f**. Отметим также, что эти параметры характеризуют не только волновые, но и квантовые свойства электромагнитного поля. Соответственно в первом случае электромагнитная волна описывается классическими законами, изучаемыми в этом курсе.

Рассмотрим понятие спектра электромагнитных волн. Спектром электромагнитных волн называется полоса частот электромагнитных волн, существующих в природе.

Спектр электромагнитного излучения в порядке увеличения частоты составляют:

- Низкочастотные волны;
- Радиоволны;
- Инфракрасное излучение;
- Световое излучение;
- Ультрафиолетовое излучение;
- Рентгеновское излучение;
- Гамма излучение

Различные участки электромагнитного спектра отличаются по способу излучения и приёма волн, принадлежащих тому или иному участку спектра. По этой причине, между различными участками электромагнитного спектра нет резких границ, но каждый диапазон обусловлен своими особенностями и превалированием своих законов, определяемых соотношениями линейных масштабов.

Радиоволны изучает классическая электродинамика. Инфракрасное световое и ультрафиолетовое излучение изучает как классическая оптика, так и квантовая физика. Рентгеновское и гамма излучение изучается в квантовой и ядерной физике.

Рассмотрим спектр электромагнитных волн более подробно.

Низкочастотные волны

Низкочастотные волны представляют собой электромагнитные волны, частота колебаний которых не превышает 100 КГц). Именно этот диапазон частот традиционно используется в электротехнике. В промышленной электроэнергетике используется частота 50 Гц, на которой осуществляется передача электрической энергии по линиям и преобразование напряжений трансформаторными устройствами. В авиации и наземном транспорте часто используется частота 400 Гц, которая дает преимущества по весу электрических машин и трансформаторов в 8 раз по сравнению с частотой 50 Гц. В импульсных источниках питания последних поколений используются частоты трансформирования переменного тока единицы и десятки кГц, что делает их компактными, энергонасыщенными.

Коренным отличием низкочастотного диапазона от более высоких частот является падение скорости электромагнитных волн пропорционально корню квадратному их частоты от 300 тыс. км/с при 100 кГц до примерно 7 тыс км/с при 50 Гц.

Радиоволны

Радиоволны представляют собой электромагнитные волны, длины которых превосходят 1 мм (частота меньше 3 1011гц = 300 Ггц) и менее 3 км (выше 100 кГц).

Радиоволны делятся на:

- Длинные волны в интервале длин от 3 км до 300 м(частота в диапазоне 10^5-10^6 Гц=1 МГц);
- Средние волны в интервале длин от 300 м до 100 м (частота в диапазоне 10^6 - $3*10^6$ Гц=3 МГц);
- Короткие волны в интервале длин волн от 100м до 10м (частота в диапазоне $3*10^6$-$3*10^7$ Гц=30 МГц);
- Ультракороткие волны с длиной волны меньше 10м(частота больше $3*10^7$ Гц=30 МГц).

Ультракороткие волны в свою очередь делятся на :

a. метровые волны;
b. сантиметровые волны;
c. миллиметровые волны;

Волны с длиной волны меньше, чем 1 м (частота меньше чем 300мгц) называются микроволнами или волнами сверхвысоких частот(СВЧ-волны).

Из-за больших значений длин волн радиодиапазона по сравнению с размерами атомов распространение радиоволн можно рассматривать без учета атомистического строения среды, т.е. феноменологически, как принято при построении теории Максвелла. Квантовые свойства радиоволн проявляются лишь для самых коротких волн, примыкающих к инфракрасному участку спектра и при распространении т.н. сверхкоротких импульсов с длительностью порядка 10-12 сек- 10-15 сек, сравнимой со временем колебаний электронов внутри атомов и молекул.

Коренным отличием радиоволн от более высоких частот является иное термодинамическое соотношение между длиной волны носителя волн (эфира), равной 1 мм (2,7 К), и электромагнитной волны, распространяющейся в этой среде.

Биологическое действие радиоволнового излучения

Страшный жертвенный опыт применения мощного радиоволнового излучения в радиолокационной технике показал специфичное действие радиоволн в зависимости от длины волны (частоты).

На человеческий организм разрушительное действие оказывает не столько средняя, сколько пиковая мощность излучения, при которой происходят необратимые явления в белковых структурах. К примеру, мощность непрерывного излучения магнетрона СВЧ-печи (микроволновки), составляющая 1 КВатт, воздействует лишь на пищу в малом замкнутом (экранированном) объеме печи, и почти безопасна для человека, находящегося рядом. Мощность радиолокационной станции (РЛС, радара) в 1 КВатт средней мощности, излучаемой короткими импульсами скважностью 1000:1 (отношение периода повторения к длительности импульса) и, соответственно, импульсной мощностью в 1 МВатт, очень опасна для здоровья и жизни человека на расстоянии до сотен метров от излучателя. В последнем, конечно, играет роль и направленность излучения РЛС, которая подчеркивает разрушительное действие именно импульсной, а не средней мощности.

Воздействие метровых волн

Метровые волны большой интенсивности, излучаемые импульсными генераторами метровых радиолокационных станций (РЛС), имеющих импульсную мощность более мегаватта (таких, например, как станция дальнего обнаружения П-16) и соизмеримые с протяженностью спинного мозга человека и животных, а таже длиной аксонов, нарушают проводимость этих структур, вызывая диэнцефальный синдром (СВЧ-болезнь). Последняя приводит к быстрому развитию (в течение от нескольких месяцев до нескольких лет) полному или частичному (в зависимости от полученной импульсной дозы излучения) необратимому параличу конечностей человека, а также нарушению иннервации кишечника и других внутренних органов.

Воздействие дециметровых волн

Дециметровые волны соизмеримы по длине волны с кровеносными сосудами, охватывающими такие органы человека и животных, как легкие, печень и почки. Это одна из причин, почему они вызывают развитие "доброкачественных" опухолей (кист) в этих органах. Развиваясь на поверхности кровеносных сосудов, эти опухоли приводят к остановке нормального кровообращения и нарушению работы органов. Если вовремя не удалить такие опухоли оперативным путем, то наступает гибель организма. Дециметровые волны опасных уровней интенсивности излучают магнетроны таких РЛС, как мобильная РЛС ПВО П-15, а также РЛС некоторых воздушных судов.

Воздействие сантиметровых волн

Мощные сантиметровые волны вызывают такое заболевание, как лейкемию – "белокровие", а также другие формы злокачественных опухолей человека и животных. Волны достаточной для возникновения этих заболеваний интенсивности генерируют РЛС сантиметрового диапазона П-35, П-37 и практически все РЛС воздушных судов.

Инфракрасное, световое и ультрафиолетовое излучения

Инфракрасное, световое, ультрафиолетовое излучения составляют оптическую область спектра электромагнитных волн в широком смысле этого слова. Этот спектр занимает диапазон длин электромагнитных волн в интервале от $2 \cdot 10^{-6}$ м =2 мкм до 10^{-8} м =10 нм (по частоте от $1{,}5 * 10^{14}$ Гц до $3 * 10^{16}$ Гц). Верхняя граница оптического диапазона определяется длинноволновой границей инфракрасного диапазона, а нижняя коротковолновой границей ультрафиолета.

Близость участков спектра перечисленных волн обусловило сходство методов и приборов, применяющихся для их исследования и практического применения. Исторически для этих целей применяли линзы, дифракционные решетки, призмы, диафрагмы, оптически активные вещества, входящие в состав различных оптических приборов (интерферометров, поляризаторов, модуляторов и пр.).

С другой стороны излучение оптической области спектра имеет общие закономерности прохождения различных сред, которые могут быть получены с помощью геометрической оптики, широко используемой для расчетов и построения, как оптических приборов, так и каналов распространения оптических сигналов. Инфракрасное излучение является видимым для многих членистоногих (насекомых, пауков и пр.) и рептилий (змей, ящериц и пр.), доступным для полупроводниковых датчиков (инфракрасных фотоматриц), но его не пропускает толща атмосферы Земли, что не позволяет наблюдать с поверхности Земли инфракрасные звезды – "коричневые карлики", которые составляют более 90% всех звёзд в Галактике.

Ширина оптического диапазона по частоте составляет примерно 18 октав, из которых на оптический диапазон приходится примерно одна октава ($\lambda = 400 - 760 нм$); на ультрафиолет – 5 октав ($\lambda = 10 - 400\ нм$), на инфракрасное излучение – 11 октав ($\lambda = 760\ нм - 2 мкм$).

В оптической части спектра становятся существенными явления, обусловленные атомистическим строением вещества. По этой причине наряду с волновыми свойствами оптического излучения проявляются квантовые свойства.

Свет

Свет, световое, видимое излучение - видимая глазами человека и приматов часть оптического спектра электромагнитного излучения, занимает диапазон длин электромагнитных волн в интервале от 400 нанометров до 780 нанометров, то есть менее одной октавы – двухкратного изменения частоты.

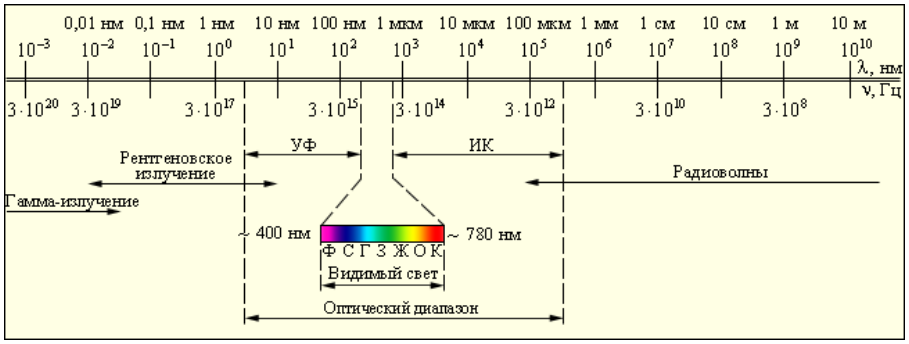


Рис. 1.14. Шкала электромагнитных волн

Словесный мем-запоминалка порядка следования цветов в световом спектре:

"Каждая Обезьяна Желает Знать Главный Секрет Физики" – "Красный, Оранжевый, Желтый, Зелёный, Голубой, Синий, Фиолетовый".

Рентгеновское и гамма излучение

В области рентгеновского и гамма излучения на первый план выступают квантовые свойства излучения.

Рентгеновское излучение возникает при торможении быстрых заряженных частиц (электронов, протонов и пр.), а также в результате процессов, происходящих внутри электронных оболочек атомов.

Гамма-излучение является следствием явлений, происходящих внутри атомных ядер, а также в результате ядерных реакций. Граница между рентгеновским и гамма излучением определяются условно по величине кванта энергии $E = h\nu$, соответствующего данной частоте ν излучения.

Рентгеновское излучение составляют электромагнитные волны с длиной от 50 нм до 10^{-3} нм, что соответствует энергии квантов от 20 ЭВ до 1 МЭВ.

Гамма-излучение составляют электромагнитные волны с длиной волны меньше 10^{-2} нм, что соответствует энергии квантов больше 0.1 МЭВ.

Вопросы для закрепления:

1. Разделите электромагнитную шкалу на диапазоны по длинам волн и частотам
2. Назовите источники электромагнитных волн различных диапазонов
3. Какова роль атмосферы Земли в защите биосферы?
4. Почему космические телескопы выводят за пределы атмосферы?
5. Сколько времени в день можно проводить перед компьютером?
6. Знаете ли Вы, что мобильный телефон – это маленькая станция. Сделайте сообщение о его пользе и вреде.

Раздел 5. Оптика. Основы теории относительности

43. Электромагнитная природа света. Квантовая теория света. Скорость распространения света в вакууме.Определение скорости света.

Электромагнитная природа света

Свет представляет собой видимый участок спектра электромагнитных волн, длины волн которых занимают интервал от 0.4 мкм до 0.76 мкм. Каждой спектральной составляющей оптического излучения может быть поставлен в соответствие определённый цвет. Окраска спектральных составляющих оптического излучения определяется их длиной волны. Цвет излучения изменяется по мере уменьшения его длины волны следующим образом: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый.

Красный свет, соответствующий наибольшей длине волны, определяет красную границу спектра. Фиолетовый свет – соответствует фиолетовой границе.

Естественный (дневной, солнечный) свет не окрашен и представляет суперпозицию электромагнитных волн из всего видимого человеком спектра. Естественный свет появляется в результате испускания электромагнитных волн возбужденными атомами. Характер возбуждения может быть различным: тепловой, химический, электромагнитный и др. В результате возбуждения атомы излучают хаотическим образом электромагнитные волны примерно в течении 10^{-8} сек. Поскольку энергетический спектр возбуждения атомов достаточно широкий, то излучаются электромагнитные волны из всего видимого спектра, начальная фаза, направление и поляризация которых имеет случайный характер . По этой причине естественный свет не поляризован. Это означает, что "плотность" спектральных составляющих электромагнитные волны естественного света, имеющих взаимно перпендикулярные поляризации одинаково.

Основным понятием геометрической оптики является луч света. Геометрическая оптика изучает распространение, отражение и преломление лучей света.

Развитие представлений о природе света.

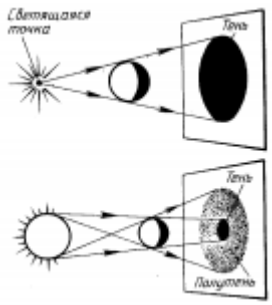
Световой луч – это идеализация очень тонкого светового пучка. Раздел оптики, в котором изучается ход световых лучей, называют геометрической оптикой, так как для определения хода лучей часто используют геометрические построения.

Первый трактат по геометрической оптике написал древнегреческий ученый Евклид. Первое положение евклидовой «Оптики» гласит: «Исходящие из глаз лучи распространяются прямолинейно». Сегодня это может вызвать улыбку, но идущие первыми могут и ошибаться (даже если это великие ученые). Обратим лучше внимание на правильное утверждение о ***прямолинейном*** распространении лучей света. В «Оптике» Евклида правильно сформулированы также законы отражения света.

Свет в однородной среде распространяется прямолинейно.

Луч – часть прямой, указывающей направление распространения света. Понятие луча ввел Евклид (геометрическая или лучевая оптика – раздел оптики, изучающий законы распространения света, основанные на понятии луча, без учета природы света).

Прямолинейностью распространения света объясняется образование тени и полутени. При малых размерах источника (источник, находится на расстоянии, по сравнению с которым размерами источника можно пренебречь) получается только тень (область пространства, в которую свет не попадает). При больших размерах источника света (или, если источник находится близко к предмету) создаются нерезкие тени (тень и полутень).



В астрономии – объяснение затмений.

Световые пучки распространяются независимо друг от друга. **Например, проходя один через другой, они не влияют** на взаимное распространение.

Световые пучки обратимы, т.е., если поменять местами источник света и изображение, полученное с помощью оптической системы, то ход лучей от этого не изменится.

Скорость света и методы ее измерения.



Первые предложения выдвинуты Галилеем: фонарь и зеркало устанавливаются на вершинах двух гор; зная расстояние между горами и, измеряя время распространения, можно рассчитать скорость света

17-м веке ученые начали изучать физическую природу света. По данным наблюдений за затмениями спутника Юпитера датский астроном О. Рёмер впервые смог определить скорость света. И хотя впоследствии выяснилось, что полученный им результат не очень точен, главным было то, что скорость света оказалась ***конечной.*** Так было установлено, что свет ***движется.***

В те времена ученым были известны две формы движения, казавшиеся тогда ***взаимоисключающими:*** это движение ***частиц,*** при котором происходит перемещение вещества, и распространение ***волн,*** при котором вещество не перемещается.

Возник вопрос: что представляет собой свет — поток частиц или распространение волн?

Корпускулярная теория света

Исаак Ньютон предположил, что свет является потоком мельчайших частиц. Такое представление о природе света получило название ***корпускулярной*** теории света.

Корпускулярная теория убедительно объясняла прямолинейное распространение света, а также его отражение. Она объясняла также распространение света в пустоте (благодаря чему мы видим Солнце и звезды). Это свойственно потокам частиц, а для распространения волн, как тогда считали, необходима материальная среда.

Но если она существует, то почему огромная Земля и планеты тысячелетиями движутся вокруг Солнца, не испытывая никакого сопротивления этой среды?

Волновая теория света

Создателем ***волновой*** теории света был современник Ньютона, голландский ученый Христиан Гюйгенс. Главным доводом в пользу волновой теории было то, что световые лучи свободно проходят один сквозь другой, — а это характерно именно для распространения волн. В пересекающихся же потоках частиц должны происходить столкновения.

В рамках волновой теории света Гюйгенс смог дать объяснение законам отражения и преломления света.

И частицы, и волны!

В течение полутора веков ни одна из двух теорий света не могла одержать убедительной победы над другой. Но в 19-м веке волновая теория света начала «одерживать верх». Выяснилось, что некоторые световые явления можно объяснить только с помощью волновой теории, а затем на опыте была установлена электромагнитная природа световых волн.

И сторонники корпускулярной теории света сдались: пришлось признать, что ошибаться мог даже великий Ньютон.

Но дальнейшее развитие событий оказалось неожиданным.

Так случилось, что в конце 19-го века ***один и тот же*** ученый практически ***в одно и то же время*** получил опытные подтверждения как ***волновой,*** так и ***корпускулярной*** теории света!

Этим ученым был уже известный вам Генрих Герц. Подтвердив на опыте, что свет представляет собой электромагнитные волны, он тут же обнаружил, что свет может выбивать электроны из металла. Это явление назвали ***фотоэффектом.*** Объяснил законы

фотоэффекта Альберт Эйнштейн, предположив, что свет обладает свойствами ***частиц.*** Более подробно мы расскажем об этом в теме ***«Фотоэффект».***

Так выяснилось, что Ньютон, настаивавший на корпускулярной природе света, оказался прав. Но прав оказался и Гюйгенс, считавший, что свет имеет волновую природу!

Двойственная природа света оказалась для физиков «крепким орешком»: только в 20-м веке общими усилиями ученых нескольких стран была построена теория, которая совместила свойства волн и частиц. Это ***квантовая механика.*** Более подробно мы расскажем о ней в ***Главе «Кванты и атомы».***

Когда мы поворачиваем выключатель, то вся комната сразу же озаряется светом. Кажется, что свету совсем не надо времени, чтобы достигнуть стен. Предпринимались многочисленные попытки определить скорость света. Для этого пытались измерить по точным часам время распространения светового сигнала на большие расстояния (несколько километров). Но эти попытки не дали результата. Начали думать, что распространение света совсем не требует времени, что свет любые расстояния преодолевает мгновенно. Однако оказалось, что скорость света не бесконечно велика, и эта скорость была в конце концов измерена.

Астрономический метод измерения скорости света. Скорость света впервые удалось измерить датскому ученому О. Рёмеру в 1676 г. Рёмер был астрономом, и его успех объясняется именно тем, что он использовал для измерений очень большие, проходимые светом расстояния. Это расстояния между планетами Солнечной системы.

Рёмер наблюдал затмения спутников Юпитера – самой большой планеты Солнечной системы. Юпитер имеет четырнадцать спутников. Ближайший его спутник – Ио – стал предметом наблюдений Рёмера. Он видел, как спутник проходил перед планетой, погружался в ее тень и пропадал из поля зрения. Затем он опять появлялся, как мгновенно вспыхнувшая лампа. Промежуток времени между двумя вспышками оказался равным 42 ч 28 мин. Таким образом, эта «луна» представляла собой громадные небесные часы, через равные промежутки времени посылавшие свои сигналы на Землю.

Вначале измерения проводились в то время, когда Земля при своем движении вокруг Солнца ближе всего подошла к Юпитеру (рис. 8.2). Такие же измерения, проведенные несколько месяцев спустя, когда Земля удалилась от Юпитера, неожиданно показали, что спутник опоздал появиться из тени на целых 22 мин по сравнению с моментом времени, который можно было рассчитать, зная период обращения Ио.

Рёмер объяснял это так: «Если бы я мог остаться на другой стороне земной орбиты, то спутник всякий раз появлялся бы из тени в назначенное время; наблюдатель, находящийся там, увидел бы Ио на 22 мин раньше. Запаздывание в этом случае происходит оттого, что свет употребляет 22 мин на прохождение от места моего первого наблюдения до моего теперешнего положения». Зная время запаздывания появления Ио и расстояние, которым оно вызвано, можно определить скорость света, разделив это расстояние на время запаздывания. Скорость оказалась чрезвычайно большой, примерно 300 000 км/с. Потому-то крайне трудно определить время распространения света между двумя удаленными точками на Земле. Ведь за одну секунду свет проходит расстояние, большее длины земного экватора в 7,5 раза.

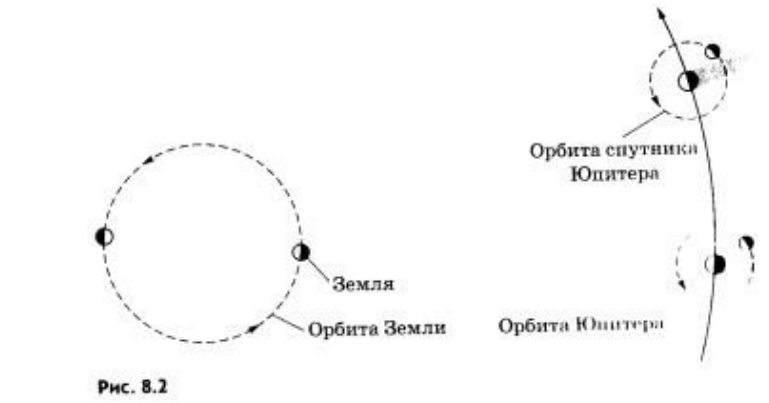


Рис. 8.2

Лабораторные методы измерения скорости света. Впервые скорость света лабораторным методом удалось измерить французскому физику И. Физо в 1849 г.

В опыте Физо свет от источника, пройдя через линзу, падал на полупрозрачную пластинку 1 (рис. 8.3). После отражения от пластинки сфокусированный узкий пучок направлялся на периферию быстро вращающегося зубчатого колеса. Пройдя между зубцами, свет достигал зеркала 2, находящегося на расстоянии нескольких километров от колеса. Отразившись от зеркала, свет, прежде чем попасть в глаз наблюдателя, должен был пройти опять между зубцами. Когда колесо вращалось медленно, свет, отраженный от зеркала, был виден. При увеличении скорости вращения он постепенно исчезал. В чем же здесь дело? Пока свет, прошедший между двумя зубцами, шел до зеркала и обратно, колесо успевало повернуться так, что на место прорези вставал зубец, и свет переставал быть видимым.

При дальнейшем увеличении скорости вращения свет опять становился видимым. Очевидно, что за время распространения света до зеркала и обратно колесо успевало в этом случае повернуться настолько, что на место прежней прорези вставала уже новая прорезь.

Зная это время и расстояние между колесом и зеркалом, можно определить скорость света. В опыте Физо при расстоянии, равном 8,6 км, для скорости света было получено значение 313 000 км/с.

Было разработано еще много других, более точных лабораторных методов измерения скорости света. В частности, американский физик А. Майкельсон разработал весьма совершенный метод определения скорости света с применением вращающихся зеркал.

Была измерена скорость в различных прозрачных средах. Скорость света в воде была определена в 1856 г. Она оказалась в 4/3 раза меньше, чем в вакууме. Во всех других веществах она также меньше, чем в вакууме.

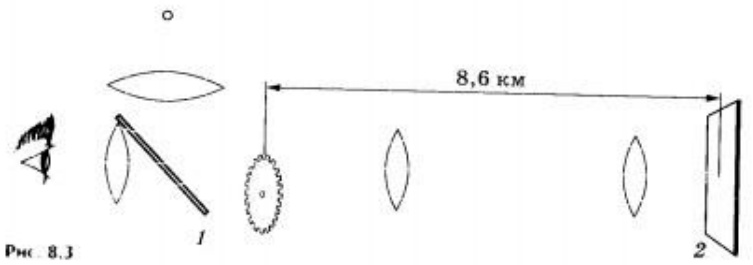


Рис. 8.3

По современным данным, скорость света в вакууме равна 299 792 458 м/с (с точностью до ±1,2 м/с). Приближенно скорость света можно считать равной $3 \cdot 10^8$ м/с. Это значение скорости света нужно обязательно запомнить.

Определение скорости света сыграло в науке очень важную роль. Была не только выяснена природа света, но и установлено, что никакое тело не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме.

Вопросы для закрепления:

1. Расскажите о развитии учения о природе света?

2. В каких опытах подтверждается волновая природа света?
3. В каких явлениях проявляются квантовые свойства излучения?
4. Обоснуйте единство корпускулярно-волновых свойств света.
5. Каким образом определил скорость света Рёмер?
6. Как определил скорость света Физо?

44. Законы отражения. Плоские и сферические зеркала. Законы преломления света.

Опыт показывает, что **представление о лучах света применимо, когда размеры препятствий для света намного больше длины световой волны.**

В таких случаях волновые свойства света не проявляются и можно использовать законы геометрической оптики.

А поскольку длины волн видимого света меньше одной тысячной доли миллиметра, то область применимости геометрической оптики очень широка: ее законы объясняют строение глаза и действие оптических приборов – лупы, микроскопа, телескопа.

Прямолинейное распространение света

Первый закон геометрической оптики – это **закон прямолинейного распространения света: в вакууме и в однородной среде свет распространяется прямолинейно.**

При распространении света в неоднородной среде лучи света искривляются. Этим обусловлены, например, миражи.

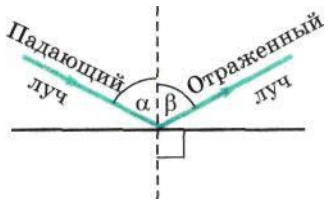
Отражение света. законы отражения света

Опыт показывает, что когда свет падает на гладкую отражающую плоскую поверхность (например, поверхность зеркала или спокойной воды), выполняются следующие ***законы отражения*** (рис. 13.1):

1. **Отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред, восставленным в точке падения луча.**
2. **Угол отражения равен углу падения.**

Рис. 13.1. Отражение луча света от зеркальной поверхности

Обратите внимание: углы падения и отражения света отсчитываются от перпендикуляра к отражающей плоскости, восставленного в точке падения луча.



Зеркальное отражение

При зеркальном отражении света ***изображением точки*** является снова ***точка.*** Вот почему при отражении от такой поверхности изображение предметов будет ***четким:*** ведь изображение любого предмета состоит из изображений отдельных точек этого предмета.

При отражении света от шероховатой поверхности четких изображений предметов нет.



Рис. 13.2. Зеркальное отражение точечного источника света



Рис. 13.3. Диффузное отражение точечного источника света

Дело в том, что отраженные от такой поверхности лучи направлены случайным образом (рис. 13.3). Такое отражение называют ***диффузным*** или ***рассеянным.***

Диффузное отражение не является исключением: наоборот, большинство окружающих нас предметов мы видим именно благодаря диффузному отражению. Ведь чистое зеркало само по себе ***невидимо*** – глядя на него, мы видим только предметы, которое оно ***отражает.***

Не видна также гладкая поверхность чистой воды: глядя на спокойное море или озеро, мы видим либо дно (то есть преломленные лучи, отраженные от дна), либо небо и облака (зеркально отраженные лучи).

Преломление света законы преломления света

Когда луч света падает на границу раздела двух однородных прозрачных сред (например, воздуха и стекла), он не только отражается, но и ***преломляется.***

Как показывают опыты, выполняются следующие ***законы преломления*** (рис. 13.4):

1. **Преломленный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред, восставленным в точке падения луча.**
2. **Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для двух данных сред постоянно:** $\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = n$ **.**

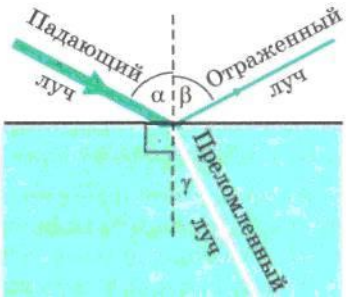


Рис. 13.4. Отражение и преломление луча света

Интенсивность отраженного и преломленного лучей зависит от свойств сред и угла падения луча. На рисунке интенсивность каждого из трех лучей — падающего, отраженного и преломленного — схематически передана толщиной линии.

Величину ***n*** называют ***относительным показателем преломления*** двух данных сред.

Если луч падает в данную среду из вакуума, величину ***n*** называют ***абсолютным показателем преломления*** (или просто показателем преломления) данной среды.

Показатель преломления воздуха очень мало отличается от единицы, а показатель преломления воды равен примерно 1,33. Ту из двух сред, показатель преломления которой больше, называют***оптически более плотной.***

Когда преломленных лучей нет?

Когда луч падает на поверхность раздела двух сред из оптически более плотной среды (например, из воды на границу «вода-воздух»), угол преломления γ ***больше*** угла падения α (рис. 13.5).

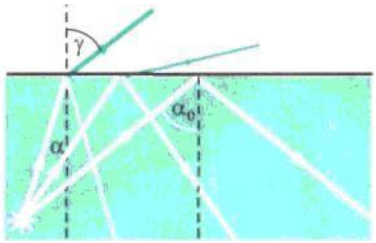


Рис. 13.5. Исчезновение преломленного луча при увеличении угла падения, когда луч света идет из оптически более плотной среды в оптически менее плотную

Поэтому возникает вопрос: что будет происходить с преломленным лучом при увеличении угла падения до 90°? Ведь угол преломления не может быть больше 90°!

Опыт показывает, что при увеличении угла падения интенсивность преломленного луча ***уменьшается,*** а интенсивность отраженного – увеличивается. И при таком угле падения α_0, когда угол преломления γ становится равным 90° (то есть преломленный луч должен был бы

идти вдоль плоскости раздела сред), преломленный луч вообще ***исчезает*** и остается только ***отраженный*** луч!

Этот угол падения α_0 называют ***предельным углом полного отражения,*** потому что, если угол падения $\alpha \geq \alpha_0$, падающий луч ***полностью*** отражается от границы раздела двух сред. Поэтому такое явление назвали ***полным внутренним отражением.***

Волоконная оптика

Явление полного внутреннего отражения используют, например, в волоконной оптике при передаче световых сигналов по тонким стеклянным нитям – ***световодам.***

Ход луча света в световоде схематически показан на рис. 13.6.

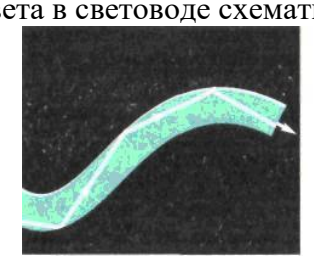


Рис. 13.6. Световод

Луч света следует за изгибами стеклянной нити, испытывая полное внутреннее отражение на ее стенках.

По проводу толщиной в волос, состоящему из тонких стеклянных нитей, передают сигналы для работы телевизоров, телефонов и компьютеров. Световоды используют и для подачи света от общего источника к различным приборным панелям в автомобилях.

Оптические волокна используют также в медицине. С их помощью изображение внутреннего органа передается на телекамеру, что позволяет производить обследование без операции.

Луч, идущий от голубого неба, попадает в глаз путника снизу, и поэтому путнику кажется, что он видит водоем, отражающий небо.

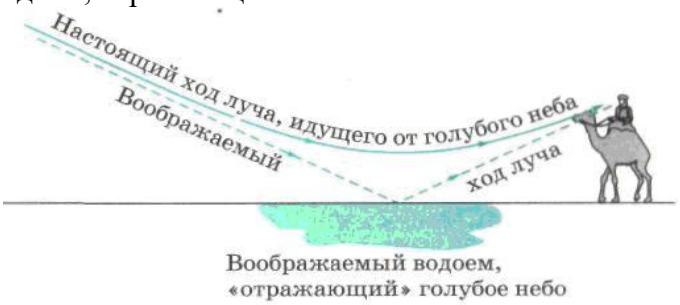


Рис. 13.7. Схема возникновения миража

Почему появляются миражи?

Когда лучи света проходят через неоднородно нагретый воздух, они искривляются. Например, в пустыне нижние слои воздуха нагреваются от горячего песка, поэтому они теплее верхних слоёв. В результате лучи света искривляются так, как показано на рис. 13.7. Это и приводит к появлению миражей.

В средних широтах также можно наблюдать подобный мираж. Благодаря ему в жаркий летний день пассажир или водитель автомобиля видит впереди «лужи» на совершенно сухом асфальте.

Вопросы для закрепления:

1. Какое явление называется отражением света?
2. Выведите законы отражения света.
3. Какие виды отражения Вы знаете?
4. Какое явление называется преломлением света?
5. Сформулируйте и выведите законы преломления света.
6. Каков физический смысл абсолютного и относительного показателей преломления?

45. Линзы. Формула тонкой линзы. Построение изображений в тонкой линзе.

Прозрачное тело, ограниченное сферическими поверхностями, называют ***линзой***.

Виды линз. Линза может быть ограничена двумя выпуклыми сферическими поверхностями (двояковыпуклая линза – рис. 8.24, а), выпуклой сферической поверхностью и плоскостью (плосковыпуклая линза – рис. 8.24, б), выпуклой и вогнутой сферическими поверхностями (вогнуто-выпуклая линза – рис. 8.24, в). Эти линзы посредине толпце, чем у краев, и все они называются выпуклыми.

Линзы, которые посредине тоньше, чем у краев, называются вогнутыми. Па рисунке 8.25 изображены три вида вогнутых линз: ***двояковогнутая*** – а, ***плосковогнутая*** – б и ***выпукло-вогнутая*** – в.

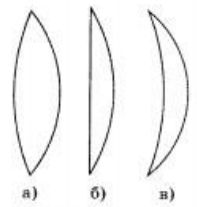


Рис. 8.24

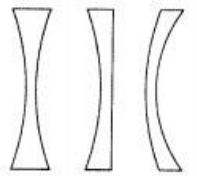


Рис. 8.25

Тонкая линза. Мы рассмотрим наиболее простой случай, когда толщина линзы I=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***.

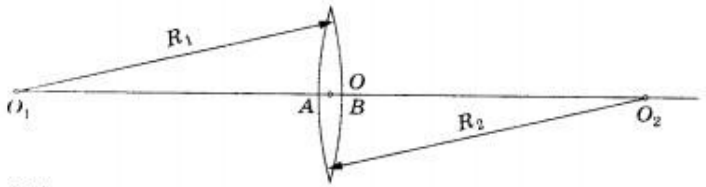


Рис. 8.26

Точка О – оптический центр линзы. 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).

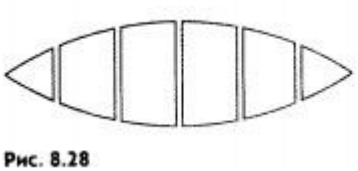


Рис. 8.27

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.

Собирающая линза. Обычно линзы изготавливают из стекла. Выпуклые линзы являются собирающими. Любую из них схематично можно себе представить как совокупность стеклянных призм (рис. 8.28). В воздухе каждая призма отклоняет лучи к основанию. Все лучи, идущие через линзу, отклоняются в сторону ее главной оптической оси.


Рис. 8.28

Точка, в которой пересекаются после преломления в собирающей линзе лучи, падающие на нее параллельно главной оптической оси, называется главным фокусом линзы. Эту точку обозначают буквой F (рис. 8.29, а).

Пучки, параллельные главной оптической оси, можно направить на линзу и с противоположной стороны.

Точка, в которой они сойдутся, пройдя линзу, будет другим главным фокусом (рис. 8.29, б).

Таким образом, у линзы два главных фокуса. В однородной среде они располагаются по обе стороны линзы на одинаковых расстояниях от нее. Эти расстояния называются фокусным расстоянием линзы; его обозначают буквой F (той же буквой, что и фокус).

Направим три узких параллельных пучка лучей от осветителя под углом к главной оптической оси линзы. Мы увидим, что пересечение лучей произойдет не в главном фокусе, а в другой точке (рис. 8.30, а).

Но примечательно то, что точки пересечения независимо от углов, образуемых этими пучками с главной оптической осью, располагаются в плоскости, перпендикулярной главной оптической оси линзы и проходящей через главный фокус (рис. 8.30, б). Эту плоскость называют фокальной плоскостью.

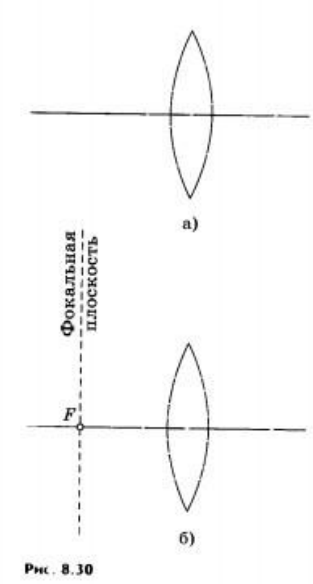


Рис. 8.30

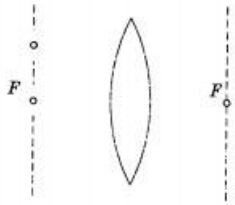


Рис. 8.31

Поместив светящуюся точку в фокусе линзы (или в любой точке ее фокальной плоскости), получим после преломления параллельные лучи (рис. 8.31).

Если сместить источник дальше от фокуса линзы, лучи за линзой становятся сходящимися и дают действительное изображение (рис. 8.32, а). Когда же источник находится ближе фокуса, преломленные лучи расходятся и изображение получается мнимым (рис. 8.32, б).

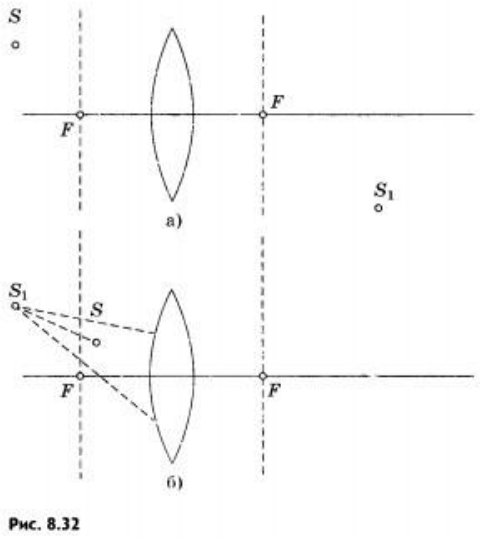


Рис. 8.32

Рассеивающая линза. Вогнутые линзы, находящиеся в оптически менее плотной среде (по сравнению с материалом линзы), являются рассеивающими. Направив на такую линзу лучи параллельно главной оптической оси, мы получим расходящийся пучок лучей. Их продолжения пересекаются в главном фокусе рассеивающей линзы.

В этом случае главный фокус является мнимым (рис. 8.33) и расположен на расстоянии F от линзы. Другой мнимый главный фокус находится по другую сторону линзы на таком же расстоянии, если среда по обе стороны линзы одна и та же (рис. 8.34).



Рис. 8.33 Рис. 8.34

Оптическая сила линзы. Величину, обратную фокусному расстоянию, называют оптической силой линзы. Ее обозначают буквой D:

$$D = \pm \frac{1}{|F|}.$$

D > 0, если линза собирающая, D < 0, если линза рассеивающая.

Чем ближе к линзе ее фокусы, тем сильнее линза преломляет лучи, собирая или рассеивая их, и тем больпхе оптическая сила линзы.

Оптическую силу D линз выражают в диоптриях (дптр). Оптической силой в 1 дптр обладает линза с фокусным расстоянием 1 м.

Основной характеристикой линзы является ее оптическая сила.

Построение изображения в линзе

Рассмотрим способы построения изображения в линзе.

Свойства тонкой линзы определяются главным образом расположением ее фокусов. Это означает, что, зная расстояние от источника света до линзы и ее фокусное расстояние (положение фокусов), можно найти расстояние до изображения, не рассматривая ход лучей внутри линзы. Поэтому нет необходимости изображать на чертеже точный вид сферических поверхностей линзы. Собирающую линзу обозначают символом, показанным на рисунке 8.35, а рассеивающую – символом, приведенным на рисунке 8.36.

Нам уже известно, что все лучи, вышедшие из какой-либо точки предмета, пройдя сквозь линзу, пересекаются также в одной точке. Именно поэтому тонкая линза дает изображение любой точки предмета, а следовательно, и всего предмета в целом.

Для построения изображений, получаемых с помощью собирающей линзы, фокусы и оптический центр которой заданы, мы будем пользоваться в основном тремя видами «удобных» лучей.

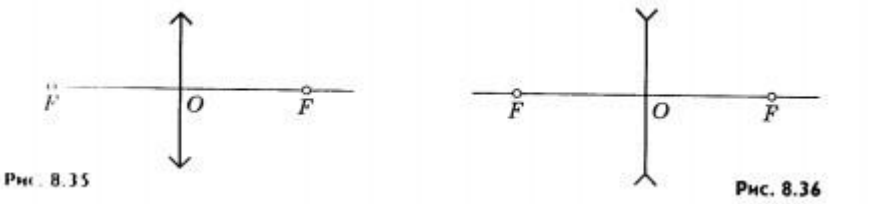


Рис. 8.35 Рис. 8.36

Как было выяснено в предыдущем параграфе, лучи, параллельные главной оптической оси, преломившись в линзе, проходят через ее фокус. Из обратимости хода лучей следует, что лучи, идущие к линзе через ее фокус, после преломления будут направлены параллельно главной оптической оси. Наконец, лучи, проходящие через оптический центр линзы, не меняют своего направления. Они лишь испытывают параллельное смещение, которое в случае тонкой линзы невелико, и им можно пренебречь.

Построим изображение предмета AB (рис. 8.37). Чтобы найти изображение точки A, направим луч AC параллельно главной оптической оси. После преломления он пройдет через фокус линзы. Другой луч – AD можно направить через фокус. После преломления он пройдет параллельно главной оптической оси. В точке пересечения этих двух преломленных лучей будет находиться изображение A_1 точки A. Так же можно построить и все остальные точки изображения. Не следует только думать, что изображение создается двумя или тремя лучами; оно формируется всем бесчисленным множеством лучей, вышедших из точки A и собравшихся в точке A_1. В частности, в точку попадает луч AOA_1, прошедший через оптический центр O линзы. Таким образом, для построения изображения точки можно использовать любые два из трех «удобных» лучей, ход которых через линзу известен:

1) луч, проходящий через оптический центр;

2) луч, падающий на линзу параллельно главной оптической оси;

3) луч, проходящий через фокус.

Изображение предмета AB в этом случае будет действительным, перевернутым, увеличенным.

Рассмотрим еще случай, когда необходимо построить изображение точки, расположенной на главной оптической оси. Трудность заключается в том, что все три «удобных» луча сливаются в один луч SF, совпадающий с главной опт и ческой осью. Поэтому необходимо определить ход произвольного луча SB (рис. 8.38), попавшего на линзу в точке B.

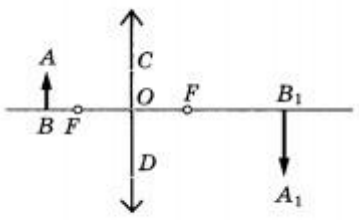


Рис. 8.37

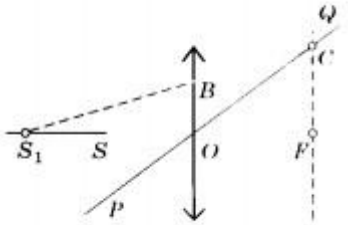


Рис. 8.38

Для построения преломленного луча проведем побочную оптическую ось PQ, параллельную лучу SB. Затем построим фокальную плоскость и найдем точку C пересечения фокальной плоскости с побочной оптической осью. Через эту точку и пройдет преломленный луч BC. Таким образом, построен ход двух лучей, выходящих из точки S. После преломления в линзе эти лучи расходятся. Изображение S_1 точки S будет мнимым, так как источник расположен между фокусом и линзой.

Для построения изображения можно использовать два из трех «удобных» лучей.

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

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{OF}{FB_1}.$$

Отсюда

$$\frac{BO}{OB_1} = \frac{OF}{FB_1},$$

или

$$\frac{d}{f} = \frac{F}{f - F}.$$

Учитывая свойство пропорции, имеем:

$$fF + Fd = fd.$$

Поделив все члены полученного равенства на произведение Ffd, получим

$$\boxed{\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F},} \qquad (8.10)$$

или

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D. \qquad (8.11)$$

Уравнение (8.10), как и (8.11), принято называть формулой тонкой линзы. Величины d, f и. F могут быть как поло-нсительными, так и отрицательными. Отметим (без доказательства), что, применяя формулу линзы, нуншо 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 $\frac{1}{|f|}$ 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, что фокус, изображение или источник мнимые.

Увеличение линзы. Изображение, получаемое с помощью линзы, обычно отличается своими размерами от предмета. Различие размеров предмета и изображения характеризуют увеличением.

Линейным увеличением называют отноптение линейного размера изображения к линейному размеру предмета.

Для нахождения линейного увеличения обратимся снова к рисунку 8.37. Если высота предмета АВ равна h, а высота изображения A_1B_1 равна H, то есть линейное увеличение.

Из подобия треугольников АОВ и OA_1B_1 следует, что

$$\Gamma = \frac{H}{h} \qquad (8.12)$$

Следовательно, увеличение линзы равно отношению расстояния от изображения до линзы к расстоянию от линзы до предмета:

Линз $\frac{H}{h} = \frac{|f|}{|d|}$. ной ча $\Gamma = \frac{|f|}{|d|}$. (8.13) микроскопа, телескоп ь линзе

Вопросы для закрепления:

1. Какую линзу называют тонкой?
2. Что называется главным фокусом линзы?
3. Какие лучи удобно использовать для построения изображения в линзе?
4. Что называется увеличением линзы?
5. Какой фокус у собирающей линзы, а какой у рассеивающей?
6. Какая плоскость называется фокальной плоскостью?

46. Понятие о волновом движении. Явления интерференции и дифракции волн.

Если речь идёт о механических колебаниях, то есть о колебательном движении какой-либо твёрдой, жидкой или газообразной среды, то распространение колебаний означает передачу колебаний от одних частиц среды к другим. Передача колебаний обусловлена тем, что смежные участки среды связаны между собой. Эта связь может осуществляться различно. Она может быть обусловлена, в частности, силами упругости, возникающими вследствие деформации среды при её колебаниях. В результате колебание, вызванное каким-либо образом в одном месте, влечёт за собой последовательное возникновение колебаний в других местах, всё более и более удалённых от первоначального, и получается так называемая волна.

А зачем вообще мы изучаем волновое движение? Дело в том, что волновые явления имеют огромное значение для повседневной жизни. К этим явлениям относится распространение звуковых колебаний, обусловленное упругостью окружающего нас воздуха. Благодаря упругим волнам мы можем слышать на расстоянии. Круги, разбегающиеся на поверхности воды от брошенного камня, мелкая рябь на поверхности озёр и огромные океанские волны – это тоже механические волны, хотя и иного типа. Здесь связь смежных участков поверхности воды обусловлена не упругостью, а силой тяжести или же силами поверхностного натяжения.

Цунами – огромные океанские волны. Все о них слышали, но знаете ли вы, почему они образуются?

Возникают они, главным образом, при подводных землетрясениях, когда происходят быстрые смещения участков морского дна. Могут возникать они также в результате взрывов подводных вулканов и сильных обвалов.

В открытом море цунами не только не разрушительны, но, более того, они незаметны. Высота волн цунами не превышает 1-3 м. Если такая волна, обладающая огромным запасом энергии, стремительно пронесётся под кораблём, то тот всего лишь плавно приподнимется, а потом так же плавно опустится. А проносится волна цунами по океанским просторам поистине стремительно, со скоростью 700-1000 км/ч. Для сравнения, с такой же скоростью летит современный реактивный лайнер.

Возникнув, волна цунами способна пройти по океану тысячи и десятки тысяч километров, почти не ослабевая.

Будучи совершенно безопасной в открытом океане, такая волна становится крайне опасной в прибрежной зоне. Всю свою нерастраченную огромную энергию она вкладывает в

сокрушительный удар по берегу. При этом скорость волны уменьшается до 100-200 км/ч, высота же возрастает до десятков метров.

Последний раз цунами обрушилось на Индонезию в декабре 2004 года и унесла жизни свыше 120 тысяч человек, более миллиона людей лишились крова.

Вот почему так важно изучать эти явления и, по возможности, предотвращать подобные трагедии.

В воздухе могут распространяться не только звуковые волны, но и разрушительные взрывные волны. Сейсмические станции записывают колебания почвы, вызванные землетрясениями, происходящими за тысячи километров. Это возможно только потому, что от места землетрясения распространяются сейсмические волны – колебания в земной коре.

Огромную роль играют и волновые явления совершенно иной природы, а именно электромагнитные волны. К явлениям, обусловленным электромагнитными волнами, относится, например, свет, значение которого для жизни человека трудно переоценить.

На последующих уроках мы ещё рассмотрим применение электромагнитных волн более подробно. А пока что вернёмся к изучению механических волн.

Процесс распространения колебаний в пространстве с течением времени называется ***волной***. Частицы среды, в которой распространяется волна, не переносятся, они лишь совершают колебания около своих положений равновесия.

В зависимости от направления колебаний частиц по отношению к направлению распространения волны, различают ***продольные и поперечные волны.***

Опыт. Подвесим за один конец длинный шнур. Если нижний конец шнура быстро отвести в сторону и вернуть обратно, то «изгиб» побежит по шнуру вверх. Каждая точка шнура колеблется перпендикулярно к направлению распространения волны, то есть поперёк направления распространения. Поэтому и волны такого вида называются поперечными.

В результате чего получается передача колебательного движения от одной точки среды к другой и почему она происходит с запаздыванием? Чтобы ответить на этот вопрос, надо разобраться в динамике волны.

Смещение в сторону нижнего конца шнура вызывает деформацию шнура в этом месте. Появляются силы упругости, стремящиеся уничтожить деформацию, то есть, появляются натяжения, которые тянут непосредственно прилегающий участок шнура вслед за участком, смещённым нашей рукой. Смещение этого второго участка вызывает деформацию и натяжение следующего и т.д. Участки шнура обладают массой, и поэтому вследствие инерции набирают или теряют скорость под действием упругих сил не мгновенно. Когда мы довели конец шнура до наибольшего отклонения вправо и начали вести его влево, смежный участок ещё будет продолжать двигаться вправо, и лишь с некоторым запозданием остановится и тоже пойдёт влево. Таким образом, запаздывающий переход колебания от одной точки шнура к другой объясняется наличием у материала шнура упругости и массы.

Распространение поперечных волн можно показать и с помощью волновой машины. Белые шарики моделируют частицы среды, они могут скользить вдоль вертикальных стержней. Шарики соединены нитями с диском. При вращении диска шарики согласованно движутся вдоль стержней, их движение напоминает волновую картину на поверхности воды. Каждый шарик движется то вверх, то вниз, не смещаясь в стороны.

Теперь обратим внимание, как движутся два крайних шарика, они колеблются с одинаковыми периодом и амплитудой, причём, одновременно оказываются то в верхнем, то в нижнем положении. Говорят, что они колеблются в одинаковой фазе.

Расстояние между ближайшими точками волны, колеблющимися в одинаковой фазе, называется ***длиной волны.*** Длину волны обозначают греческой буквой **λ.**

Теперь попробуем смоделировать продольные волны. При вращении диска шарики колеблются из стороны в сторону. Каждый шарик периодически отклоняется то влево, то вправо от положения равновесия. В результате колебаний частицы то сближаются, образуя

сгусток, то расходятся, создавая разрежение. Направление колебаний шарика совпадает с направлением распространения волны. Такие волны называются продольными.

Конечно, и для продольных волн остаётся в полной силе определение длины волны.

И продольные, и поперечные волны могут возникать только в упругой среде. Но в любой ли? Как уже было сказано, в поперечной волне происходит сдвиг слоёв друг относительно друга. Но упругие силы при сдвиге возникают только в твёрдых телах. В жидкостях и газах смежные слои свободно скользят друг по другу без появления упругих сил. А раз нет упругих сил, то и образование поперечных волн невозможно.

В продольной волне участки среды испытывают сжатие и разрежение, то есть меняют свой объём. Упругие силы при изменении объёма возникают как в твёрдых телах, так и в жидкостях, и в газах. Поэтому продольные волны возможны в телах, находящихся в любом из этих состояний.

В том, что распространение механических волн происходит не мгновенно, нас убеждают простейшие наблюдения. Каждый видел, как постепенно и равномерно расширяются круги на воде или как бегут морские волны. Здесь мы непосредственно видим, что распространение колебаний из одного места в другое занимает определённое время. Но и для звуковых волн, которые в обычных условиях невидимы, легко обнаружить то же самое. Если вдали произошёл выстрел, гудок паровоза, удар по какому-то предмету, то мы сначала видим эти явления и лишь спустя некоторое время слышим звук. Чем дальше от нас источник звука, тем больше запаздывание. Промежуток времени между вспышкой молнии и ударом грома может доходить иногда до нескольких десятков секунд.

За время, равное одному периоду, волна распространяется на расстояние, равное длине волны, поэтому её скорость определяется формулой:

$$\mathbf{v=\lambda/T} \text{ или } \mathbf{v=\lambda\nu}$$

Распространение механической волны, представляющее собой последовательную передачу движения от одного участка среды к другой, означает тем самым передачу энергии. Эту энергию доставляет источник волны, когда он приводит в движение прилегающий к нему слой среды. От этого слоя энергия передаётся следующему слою и т.д. При встрече волны с различными телами переносимая ею энергия может произвести работу или превратиться в другие виды энергии.

Яркий пример такого переноса энергии без переноса вещества дают нам взрывные волны. На расстояниях во много десятков метров от места взрыва, куда не долетают ни осколки, ни поток горячего воздуха, взрывная волна выбивает стёкла, ломает стены и т.п., то есть производит большую механическую работу. Наблюдать эти явления мы можем по телевизору, например, в военных фильмах.

Перенос волной энергии – это одно из свойств волн. А какие ещё свойства присущи волнам?

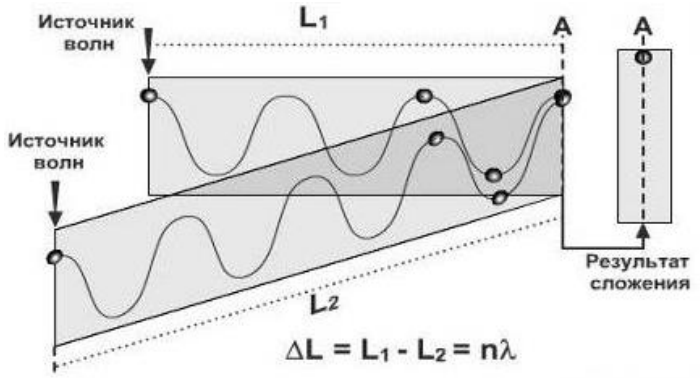
1. отражение
2. преломление
3. интерференция
4. дифракция

Интерференция

Интерференция – сложение в пространстве двух (или нескольких) волн, при котором в разных его точках получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны. Явление характерно для волн любой природы: звуковых волн, волн на поверхности воды, электромагнитных волн и др.

Устойчивую интерференционную картину дают только *когерентные волны*, т.е. волны, имеющие одинаковые частоты и постоянную во времени разность фаз колебаний.

Пусть в точку А пришли две волны одинаковой частоты, прошедшие перед этим различные расстояния $\boldsymbol{l_1}$ и $\boldsymbol{l_2}$ от своих источников.



Амплитуда результирующего колебания зависит от величины, называемой **разностью хода** волн.

$$\Delta l = l_1 - l_2$$

$$\Delta = n_1 l_1 - n_2 l_2$$

Δl – *разность хода*

l_1, l_2 – *путь волн*

Δ – *оптическая разность хода*

n_1, n_2 – *показатель преломления сред*

$[l] = 1м$ $[\Delta] = 1м$

Если разность хода равна целому числу волн, [illegible] но. Складываясь, волны усиливают друг друга и дают колебание с удвоенной амплитудой.

Условие максимума

$$\Delta l = m\lambda, \quad m = 0,\ \pm 1,\ \pm 2,\ldots$$

Δl – *разность хода*

$m = 0,\ 1,\ 2\ldots$ – *любое целое число*

λ – *длина волны*

$[l] = 1м$ $[\lambda] = 1м$

Если разность хода равна нечетному числу полуволн, то волны приходят в точку А в противофазе. В этом случае они гасят друг друга, амплитуда результирующего колебания равна нулю.

Условие минимума

$$\Delta l = (2m+1)\frac{\lambda}{2}, \quad m = 0,\ \pm 1,\ \pm 2,\ldots$$

Δl – *разность хода*

$(2m+1)$, $m \in Z$ – *нечетное число*

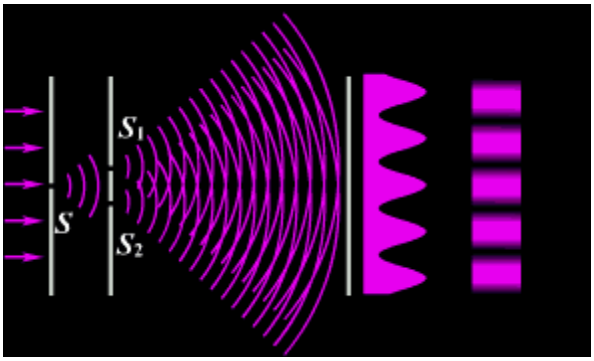
λ – *длина волны*

$[l] = 1м$ $[\lambda] = 1м$

В других точках пространства наблюдается частичное усиление или ослабление результирующей волны.

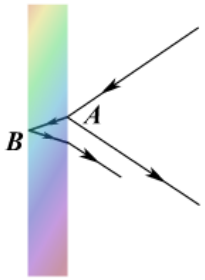
Опыт Юнга

В 1802 г. английский ученый *Томас Юнг* поставил опыт, в котором наблюдал интерференцию света. Свет из узкой щели ***S***, падал на экран с двумя близко расположенными щелями ***S₁*** и ***S₂***. Проходя через каждую из щелей, световой пучок расширялся, и на белом экране световые пучки, прошедшие через щели ***S₁*** и ***S₂***, перекрывались. В области перекрытия световых пучков наблюдалась интерференционная картина в виде чередующихся светлых и темных полос.



Ход луча в мыльной пленке

На рисунке изображена в разрезе сильно увеличенная по толщине мыльная пленка. Пусть в точке **А** пленки попадает световая волна. Часть света отражается от этой поверхности, а часть – преломляется, проходит внутрь пленки и отражается от ее поверхности в точке **В**. Эти два отраженных пучка света имеют одинаковую частоту, поскольку исходят от одного источника. Складываясь, они образуют интерференционную картину.



С интерференционными явлениями мы сталкиваемся довольно часто: цвета масляных пятен, рисунки на крыльях некоторых бабочек и жуков и др.

Дифракция света

На улице из-за угла мы хорошо слышим, что едет автомобиль, хотя не видим его. Таким образом, звуковые волны достигают нашего уха, "заворачивая за угол"!

Явление огибания волнами препятствий получило название *дифракции*. Для проявления дифракции размеры препятствий должны быть меньше или сравнимы с длиной волны. Поэтому в примере с машиной звук "завернул за угол", а свет – нет.

Вопросы для закрепления:

1. Какое движение называется волновым?
2. Что понимают под волной?
3. Как можно отличить продольную волну от поперечной?
4. Сформулируйте принцип Гюйгенса?
5. Почему не могут интерферировать лучи света, идущие от двух различных источников?

47. Интерференция света. Практическое применение интерференции света. Дифракция света. Дифракционная решетка.

Явление интерференции широко используют для создания различных измерительных и контролирующих устройств.

Существуют специальные приборы – *интерферометры,* действие которых основано на явлении интерференции. Их назначение – точное измерение длин волн, показателей преломления, коэффициентов линейного расширения и др.

Действие всех интерферометров основано на одном и том же принципе, и интерферометры различаются лишь конструктивно. На рисунке 17.12 представлена упрощенная схема интерферометра Майкельсона.

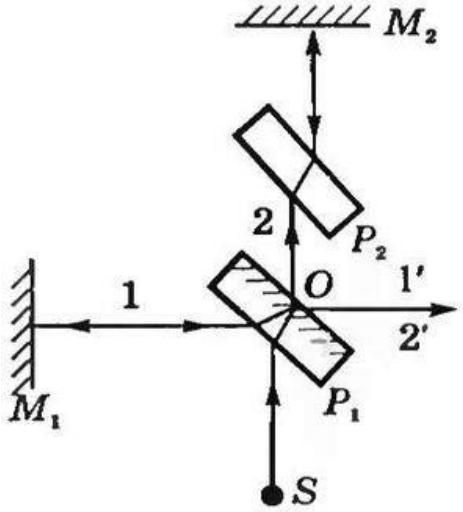


Рис. 17.12

Монохроматический пучок света от источника **S** падает под углом 45° на плоскопараллельную пластинку $\mathbf{P_1}$. Сторона пластинки, удаленная от **S**, покрыта тонким слоем серебра с таким расчетом, что он половину светового пучка пропустит, а половину отразит (полупрозрачная пластинка), т.е. здесь луч разделяется на две части: луч **1** отражается от посеребренного слоя, луч **2** проходит через него. Луч **1** отражается от зеркала $\mathbf{M_1}$ и, возвращаясь обратно, вновь проходит через пластинку $\mathbf{P_1}$ (луч **1'**). Луч **2** идет к зеркалу $\mathbf{M_2}$, отражается от него, возвращается обратно и отражается от пластинки $\mathbf{P_1}$ (луч **2'**). Так как первый луч проходит пластинку $\mathbf{P_1}$ дважды, то для компенсации возникшей разности хода на пути второго луча ставится пластинка $\mathbf{P_2}$ (точно такая же, как и $\mathbf{P_1}$ только не покрытая слоем серебра).

Лучи **1'** и **2'** когерентны, следовательно, будет наблюдаться интерференция, результат которой зависит от оптической разности хода луча **1** от точки **O** до зеркала $\mathbf{M_1}$ и луча **2** от точки **O** до зеркала $\mathbf{M_2}$. При перемещении одного из зеркал на расстояние λ4λ4 разность хода обоих лучей изменится на λ2λ2, и в интерференционной картине максимум сдвинется на место минимума, и наоборот, т.е. интерференционный максимум сдвинется на половину расстояния между полосами. Такой сдвиг полос наблюдатель отчетливо увидит. Следовательно, по незначительному смещению интерференционной картины можно судить о малом перемещении одного из зеркал и использовать интерферометр для достаточно точных ($\sim 10^{-9}$ м) измерений длин (длины тел, длины световой волны, определений температурного коэффициента линейного расширения и др.).

Используя явление интерференции, можно оценить *качество обработки* поверхности изделия с точностью до 10^{-6} см. Для этого нужно создать тонкую клиновидную прослойку воздуха между поверхностью образца и очень гладкой эталонной пластинкой. Неровности поверхности вызовут заметные искривления интерференционных полос, образующихся при отражении света от проверяемой поверхности и нижней границы эталонной пластинки. На рисунке 17.13 приведены наблюдаемые интерференционные картины при отступлении от требуемой точности обработки и при достижении необходимой точности обработки плоской поверхности детали Д.

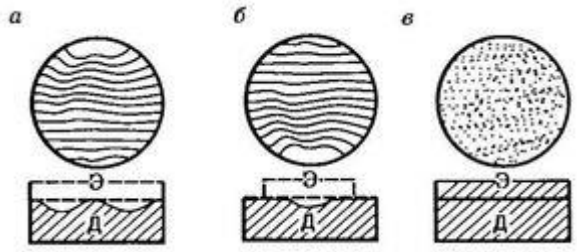


Рис. 17.13

Просветление оптики. Отполированная поверхность стекла отражает около 4% перпендикулярно падающего на нее света. Современные оптические приборы состоят из большого числа оптических стекол – линз, призм и т.д. Поэтому общие потери света в объективе фотоаппарата составляют около 25%, в микроскопе – 50% и т.д. В результате освещенность изображения получается малой, ухудшается также качество изображения.

Часть светового пучка после многократного отражения от внутренних поверхностей все же проходит через оптический прибор, но рассеивается и уже не участвует в создании четкого изображения, а на фотографии образуется "вуаль".

Для уменьшения световых потерь на поверхность оптического стекла наносят тонкую пленку с абсолютным показателем преломления $\mathbf{n_п}$, меньшим, чем абсолютный показатель преломления стекла $\mathbf{n_c}$ (рис. 17.14). При отражении света от границ раздела воздух-пленка и пленка-стекло возникает интерференция когерентных волн **1** и **2**. Толщину пленки $\boldsymbol{h}$ и показатель преломления $\mathbf{n_п}$ подбирают так, чтобы интерферирующие волны гасили друг друга. Считая, что свет падает нормально (α=0) (α=0) и учитывая, что потеря полуволны происходит на обеих поверхностях, так как $n_c>n_п>n_{возд}$, будем иметь 2nnh=(2m+1)λ22nnh=(2m+1)λ2 и при m=0, m=0, 2nnh=λ2.2nnh=λ2. Откуда h=λ(4nn)h=λ(4nn) В результате гашения отраженных волн происходит усиление волны, которая проходит в стекло.

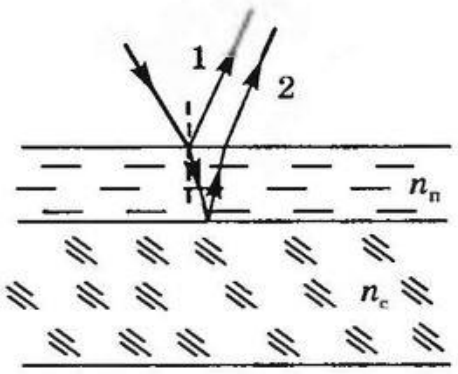


Рис. 17.14

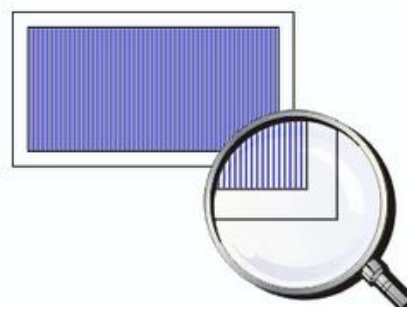
Так как обычно на поверхность стекла падает белый свет, то осуществить гашение отраженных волн всех частот невозможно. Толщину пленки подбирают так, чтобы полное гашение имело место для волн средней части спектра (зеленый цвет).

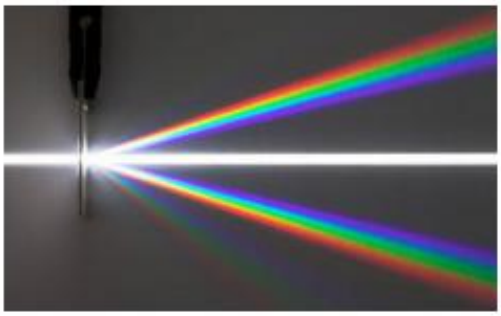
Гашение красных и фиолетовых частей спектра происходит незначительно. Поэтому объектив с просветленной оптикой имеет сиреневатый оттенок.

Явление интерференции используется для получения высокоотражающих покрытий. В этом случае используют тонкую пленку толщиной h=λ2nnh=λ2nn из материала, абсолютный показатель преломления которого $\boldsymbol{n_п}$ больше абсолютного показателя преломления стекла $\boldsymbol{n_п}$. В этом случае отражение от передней грани происходит с потерей полуволны, так как $n_п>n_{возд}$, а отраженные от задней границы – без потери полуволны. В результате Δ=λΔ=λ и отраженные волны усилят друг друга.

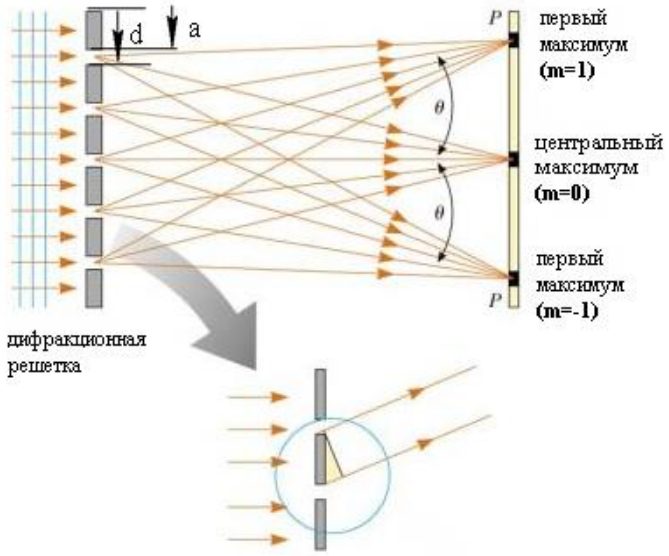
Дифракционная решетка

Дифракционная решетка представляет собой совокупность большого числа равноотстоящих щелей, нанесенных на стеклянной или металлической поверхности.





Период решетки ***d*** – это сумма ширины щели ***b*** и расстояния между щелями ***a***.



Условие максимума

$$d \cdot \sin\theta = m\lambda$$

d $(d = b + a)$ – *период дифракционной решетки*

θ – *угол распространения лучей*

λ – *длина волны*

$m = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots \quad m \in Z$

$[d] = 1м \qquad [\lambda] = 1м$

Вопросы для закрепления:

1. В чем состоит различие интерференции света от интерференции механических волн?
2. Что такое когерентные электромагнитные волны?
3. В чем заключаются особенности протекания дифракции в оптике?
4. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френели?
5. Что называется дифракционной решеткой?
6. Как рассчитать период дифракционной решетки?

48. Дисперсия света. Распределение энергии в непрерывном спектре. Спектры испускания и поглощения.

Дисперсия света

Занимаясь усовершенствованием телескопов, Ньютон обратил внимание на то, что изображение, даваемое объективом, по краям окрашено. Он первый «исследовал

разнообразие световых лучей Пучок световых лучей, прошедших через призму, окрашивается по краям.


Рис. 8.42

Опыт Ньютона был гениально прост. Ньютон догадался направить на призму световой пучок малого поперечного сечения. Пучок солнечного света проходил в затемненную комнату через маленькое отверстие в ставне. Падая на стеклянную призму, он преломлялся и давал на противоположной стене удлиненное изображение с радужным чередованием цветов. Следуя многовековой традиции, согласно которой радуга считалась состоящей из семи основных цветов, Ньютон тоже выделил семь цветов: фиолетовый, синий, голубой, зеленый, желтый, оранжевый и красный. Саму радужную полоску Ньютон назвал спектром.

Другой важный вывод, к которому пришел Ньютон, был сформулирован им в трактате «Оптика» следующим образом: «Световые пучки, отличающиеся по цвету, отличаются по степени преломляемости» (для них стекло имеет различные показатели преломления). Наиболее сильно преломляются фиолетовые лучи, меньше других – красные. Зависимость показателя преломления света от его цвета Ньютон назвал ***дисперсией – зависимостью показателя преломления среды от частоты световой волны***. (От латинского слова dispersio — рассеяние.)

Показатель преломления зависит и от скорости света в веществе. Абсолютный показатель преломления $n = \frac{c}{v}$. Луч красного цвета преломляется меньше из-за того, что красный свет имеет в веществе наибольшую скорость, а луч фиолетового цвета преломляется больше, так как скорость для фиолетового света наименьшая. Именно поэтому призма и разлагает свет. В пустоте скорости света разного цвета одинаковы. Если бы это было не так, то, к примеру, спутник Юпитера Ио, который наблюдал Рёмер, казался бы красным в момент выхода спутника из тени. Но этого не наблюдается.

Зная, что белый свет имеет сложный состав, можно объяснить удивительное многообразие красок в природе. Если предмет, например лист бумаги, отражает все падающие на него лучи различных цветов, то он будет казаться белым. Покрывая бумагу слоем красной краски, мы не создаем при этом свет нового цвета, но задерживаем на листе некоторую часть имеющегося. Отражаться теперь будут только красные лучи, остальные же поглотятся слоем краски. Трава и листья деревьев кажутся нам зелеными потому, что из всех падающих на них солнечных лучей они отражаются лишь зеленые, остальные поглощаются. Если посмотреть на траву через красное стекло, пропускающее только красные лучи, то она будет казаться почти черной.

Явление дисперсии, открытое Ньютоном, первый шаг к пониманию природы цвета. Основательно понять дисперсию смогли лишь после того, как была выяснена зависимость цвета от частоты колебаний (или длины световой волны).

Распределение энергии в спектре.

Ни один из источников не дает монохроматического света, т. е. света строго определенной длины волны. В этом нас убеждают опыты по разложению света в спектр с помощью призмы, а также опыты по интерференции и дифракции.

Зрительно оценить (приблизительно) распределение энергии нельзя, так как глаз обладает избирательной чувствительностью к свету: максимум его чувствительности лежит в желто-зеленой области спектра. Лучше всего воспользоваться свойством очень черного тела почти полностью поглощать свет всех длин волн. При этом энергия излучения (т. е. света) вызывает нагревание тела. Поэтому достаточно измерить температуру тела и по ней судить о количестве поглощенной в единицу времени энергии.

Виды спектров.

Спектральный состав излучения веществ весьма разнообразен. Но, несмотря на это, все спектры, как показывает опыт, можно разделить на три типа.

Непрерывные спектры. Солнечный спектр или спектр дугового фонаря является непрерывным. Это означает, что в спектре представлены волны всех длин волн. В спектре нет разрывов, и на экране спектрографа можно видеть сплошную разноцветную полосу.

Распределение энергии по частотам, т. е. спектральная плотность интенсивности излучения, для разных тел различно. Например, тело с очень черной поверхностью излучает электромагнитные волны всех частот, но кривая зависимости спектральной плотности интенсивности излучения от частоты имеет максимум при определенной частоте Vmax. Энергия излучения, приходящаяся на очень малые (V>0) и очень большие (v>v∞) частоты, ничтожно мала. При повышении температуры тела максимум спектральной плотности излучения смещается в сторону коротких волн.

Непрерывные (или сплошные) спектры, как показывает опыт, дают тела, находящиеся в твердом или жидком состоянии, а также сильно сжатые газы. Для получения непрерывного спектра нужно нагреть тело до высокой температуры.

Линейчатые спектры.



Рис. 10.4

Внесем в бледное пламя газовой горелки кусочек асбеста, смоченный раствором обыкновенной поваренной соли. При наблюдении пламени в спектроскоп увидим, как на фоне едва различимого непрерывного спектра пламени вспыхнет яркая желтая линия. Эту желтую линию дают пары натрия, которые образуются при расщеплении молекул поваренной соли в пламени. Каждый из спектров – это частокол цветных линий различной яркости, разделенных широкими темными полосами. Такие спектры называются линейчатыми. Наличие линейчатого спектра означает, что вещество излучает свет только вполне определенных длин волн (точнее, в определенных очень узких спектральных интервалах). На рисунке 10.4 показано примерное распределение спектральной плотности интенсивности излучения в линейчатом спектре. Каждая линия имеет конечную ширину.

Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном (но не молекулярном) состоянии. В этом случае свет излучают атомы, которые практически не взаимодействуют друг с другом. Это самый фундаментальный, основной тип спектров.

Изолированные атомы излучают свет строго определенных длин волн.

Обычно для наблюдения линейчатых спектров используют свечение паров вещества в пламени или свечение газового разряда в трубке, наполненной исследуемым газом.

При увеличении плотности атомарного газа отдельные спектральные линии расширяются, и, наконец, при очень большом сжатии газа, когда взаимодействие атомов становится существенным, эти линии перекрывают друг друга, образуя непрерывный спектр.

Полосатые спектры. Полосатый спектр состоит из отдельных полос, разделенных темными промежутками. С помощью очень хорошего спектрального аппарата можно обнаружить, что каждая полоса представляет собой совокупность большого числа очень тесно расположенных линий. В отличие от линейчатых спектров полосатые спектры образуются не атомами, а молекулами, не связанными или слабо связанными друг с другом.

Для наблюдения молекулярных спектров так же, как и для наблюдения линейчатых спектров, используют свечение паров вещества в пламени или свечение газового разряда.

Спектры поглощения. Все вещества, атомы которых находятся в возбужденном состоянии, излучают световые волны. Энергия этих волн определенным образом распределена по длинам волн. Поглощение света веществом также зависит от длины волны. Так, красное стекло пропускает волны, соответствующие красному свету ($\lambda \approx 8 \cdot 10^{-5}$ см), и поглощает все остальные.

Если пропускать белый свет сквозь холодный, не излучающий газ, то на фоне непрерывного спектра источника появляются темные линии. Газ поглощает наиболее интенсивно свет именно тех длин волн, которые он сам испускает в сильно нагретом состоянии. Темные линии на фоне непрерывного спектра – это линии поглощения, образующие в совокупности спектр поглощения.

Существуют непрерывные, линейчатые и полосатые спектры излучения и столько же видов спектров поглощения.

Спектральный анализ

Линейчатые спектры имеют большое значение, потому что их структура тесно связана со строением атома.

Главное свойство линейчатых спектров в том, что ***длины волн (или частоты) линейчатого спектра вещества зависят только от свойств атомов этого вещества, но совершенно не зависят от способа возбуждения свечения атомов***. Атомы любого химического элемента дают спектр, не похожий на спектры всех других элементов: они способны излучать строго определенный набор длин волн.

На этом и основан ***спектральный анализ – метод определения химического состава вещества по его спектру.*** Подобно отпечаткам пальцев у людей, линейчатые спектры различных элементов имеют неповторимую индивидуальность.

В настоящее время определены спектры всех атомов и составлены таблицы спектров. С помощью спектрального анализа были открыты многие новые элементы: рубидий, цезий и др. Элементам часто давали названия в соответствии с цветом наиболее интенсивных линий их спектров. Рубидий дает темно-красные, рубиновые линии. Слово цезий означает «небесно-голубой». Это цвет основных линий спектра цезия.

Именно с помощью спектрального анализа узнали химический состав Солнца и звезд. Другие методы анализа здесь вообще невозможны. Оказалось, что звезды состоят из тех же самых химических элементов, которые имеются и на Земле. Любопытно, что гелий сначала открыли на Солнце и лишь затем в атмосфере Земли.

Благодаря сравнительной простоте и универсальности спектральный анализ является основным методом контроля состава вещества в металлургии, машиностроении, атомной индустрии. С помощью спектрального анализа определяют химический состав руд и минералов.

Спектральный анализ можно проводить не только по спектрам испускания, но и по спектрам поглощения. Именно линии поглощения в спектре Солнца и звезд позволяют исследовать химический составов этих небесных тел. Ярко светящаяся поверхность (Солнца (фотосфера – дает непрерывный спектр. Солнечная атмосфера поглощает избирательно свет от фотосферы, что приводит к появлению линий поглощения на фоне непрерывного спектра фотосферы.

Но и сама атмосфера Солнца излучает свет. Во время солнечных затмений, когда солнечный диск закрыт Луной, происходит «обращение» линий спектра. Па месте линий поглощения в солнечном спектре вспыхивают линии излучения.

В астрофизике под спектральным анализом понимают не только определение химического состава звезд, газовых облаков и т. д., но и методы нахождения по спектрам многих других физических характеристик этих объектов: температуры, давления, скорости движения, магнитной индукции.

Разработано много способов определяется состава окружающих нас тел. Но состав звезд можно узнать только с помощью спектрального анализа.

Вопросы для закрепления:

1. Что такое дисперсия света?
2. Как зависит интенсивность излучения от частоты в видимой части спектра?
3. Является ли спектр лампы накаливания непрерывным?

4. В чем главное отличие линейчатых спектров от непрерывных и полосатых?
5. Какие операции нужно проделать с крупицей вещества, чтобы узнать ее химический состав при помощи спектрального анализа?
6. Что определяют по линиям поглощения в солнечном спектре: состав атмосферы Солнца или же состав его глубинных слоев?
7. На тетради написано красным карандашом «отлично» и зеленым – «хорошо». Имеется два стекла – зеленое и красное. Через какое стекло надо смотреть, чтобы увидеть слово «отлично»?
8. Почему только узкий световой пучок дает спектр после прохождения сквозь призму, а у широкого пучка окрашенными оказываются лишь края?

49. Ультрафиолетовая и инфракрасная части спектра. Рентгеновские лучи, их природа и свойства, применение в науке и технике.

Инфракрасное излучение.

Электромагнитное излучение с частотами в диапазоне от $3 \cdot 10^{11}$ до $3{,}75 \cdot 10^{14}$ Гц называется инфракрасным излучением. Его испускает любое нагретое тело даже в том случае, когда оно не светится. Например, батареи отопления в квартире испускают инфракрасные волны, вызывающие заметное нагревание окружающих тел. Поэтому инфракрасные волны часто называют тепловыми.

Не воспринимаемые глазом инфракрасные волны имеют длины волн, превышающие длину волны красного света (длина волны λ =780 нм - 1 мм). Максимум энергии излучения электрической дуги и лампы накаливания приходится на инфракрасные лучи.

Инфракрасное излучение применяют для сушки лакокрасочных покрытий, овощей, фруктов и т. д. Созданы приборы, в которых не видимое глазом инфракрасное изображение объекта преобразуется в видимое. Изготовляются бинокли и оптические прицелы, позволяющие видеть в темноте.

Ультрафиолетовое излучение.

Электромагнитное излучение с частотами в диапазоне от $8 \cdot 10^{14}$ до $3 \cdot 10^{16}$ Гц называется ультрафиолетовым излучением (длина волны λ =10-380 нм).

Обнаружить ультрафиолетовое излучение можно с помощью экрана, покрытого люминесцирующим веществом. Экран начинает светиться в той части, на которую падают лучи, лежащие за фиолетовой областью спектра.

Ультрафиолетовое излучение отличается высокой химической активностью. Повышенную чувствительность к ультрафиолетовому излучению имеет фотоэмульсия. В этом можно убедиться, спроецировав спектр в затемненном помещении на фотобумагу. После проявления бумага почернеет за фиолетовым концом спектра сильнее, чем в области видимого спектра.

Ультрафиолетовые лучи не вызывают зрительных образов: они невидимы. Но действие их на сетчатку глаза и кожу велико и разрушительно. Ультрафиолетовое излучение Солнца недостаточно поглощается верхними слоями атмосферы. Поэтому высоко в горах нельзя оставаться длительное время без одежды и без темных очков. Стеклянные очки, прозрачные для видимого спектра, защищают глаза от ультрафиолетового излучения, так как стекло сильно поглощают ультрафиолетовые лучи.

Роль ультрафиолетовых и инфракрасных излучений в природе, их применение в технике.

В малых дозах ультрафиолетовые лучи оказывают целебное действие. Умеренное пребывание на солнце полезно, особенно в юном возрасте: ультрафиолетовые лучи способствуют росту и укреплению организма. Кроме прямого действия на ткани кожи (образование защитного пигмента – загара, витамина D_2), ультрафиолетовые лучи оказывают влияние на центральную нервную систему, стимулируя ряд важных жизненных функций в организме.

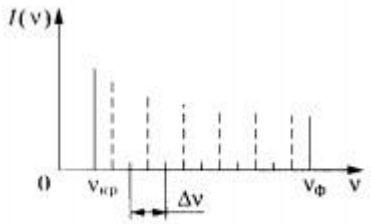


Рис. 10.1

Ультрафиолетовые лучи оказывают также бактерицидное действие. Они убивают болезнетворные бактерии и используются с этой целью в медицине.

Нагретое тело испускает преимущественно инфракрасное излучение с длинами волн, превышающими длины волн видимого излучения. Ультрафиолетовое излучение – более коротковолновое и обладает высокой химической активностью.

Спектральные аппараты.

Для точных исследований спектров пользуются спектральными аппаратами. Их основной частью является призма или ***дифракционная решетка.***

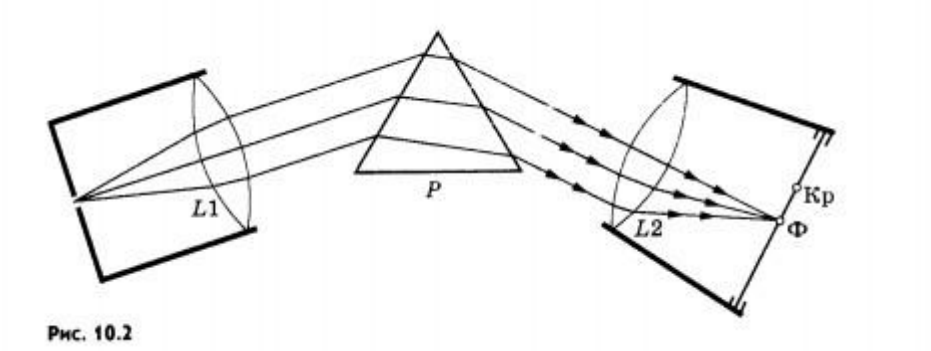


Рис. 10.2

Спектрограф

Схема устройства призменного спектрального аппарата (рис. 10.2). Исследуемое излучение поступает вначале в часть прибора, называемую коллиматором. Коллиматор представляет собой трубу, на одном конце которой имеется ширма с узкой щелью, а на другом – собирающая линза L1. Щель находится на фокусном расстоянии от линзы. Поэтому расходящийся световой пучок, попадающий на линзу из щели, выходит из нее параллельным пучком и падает на призму Р.

Так как разным частотам соответствуют различные показатели преломления, то из призмы выходят параллельные пучки, не совпадающие по направлению. Они падают на линзу L2. На фокусном расстоянии от этой линзы располагается экран – матовое стекло или фотопластинка. Линза L2 фокусирует параллельные пучки лучей на экране, и вместо одного изображения щели получается целый ряд изображений. Каждой частоте (точнее, узкому спектральному интервалу) соответствует свое изображение. Все эти изображения вместе и образуют спектр.

Описанный прибор называется ***спектрографом.*** Если вместо второй линзы и экрана используется зрительная труба для визуального наблюдения спектров, то прибор называется спектроскопом. Призмы и другие детали спектральных аппаратов изготовляются не только из стекла. Вместо стекла применяют и такие прозрачные материалы, как кварц, каменная соль и др.

Рентгеновское излучение – это излучение с частотами в диапазоне от $3 \cdot 10^{16}$ до $3 \cdot 10^{20}$ Гц.

Рентгеновские лучи были открыты в 1895 г. немецким физиком Вильгельмом Рентгеном. Рентген умел наблюдать, замечать новое там, где многие ученые до него не обнаруживали ничего примечательного. Этот особый дар помог ему сделать замечательное открытие.

Рентген Вильгельм (1845-1923) – немецкий физик, обнаруживший в 1895 г. коротковолновое электромагнитное излучение – рентгеновские лучи. Открытие рентгеновских лучей оказало огромное влияние на все последующее развитие физики, в частности привело к открытию радиоактивности. Ему была присуждена первая Нобелевская премия по физике. Способствовал быстрому распространению практического применения своего открытия в медицине. Конструкция созданной им первой рентгеновской трубки для получения рентгеновских лучей почти не изменилась до настоящего времени.

Занявшись исследованием катодных лучей. Рентген скоро заметил, что фотопластинка вблизи разрядной трубки оказывалась засвеченной даже в том случае, когда она была завернута в черную бумагу. После этого ему удалось наблюдать еще одно очень поразившее его явление. Бумажный экран, смоченный раствором платиносинеродистого бария, начинал светиться, если им обертывалась разрядная трубка. Причем когда Рентген держал руку между трубкой и экраном, то на экране были видны темные тени костей на фоне более светлых очертаний всей кисти руки. Ученый понял, что при работе разрядной трубки возникает какое-то неизвестное ранее сильно проникающее излучение. Он назвал его Х-лучами. Впоследствии за этим излучением прочно укрепился термин «рентгеновские лучи». Рентген обнаружил, что новое излучение появлялось в том месте, где катодные лучи (потоки быстрых электронов) сталкивались со стеклянной стенкой трубки. В этом месте стекло светилось зеленоватым светом. Последующие опыты показали, что Х-лучи возникают при торможении быстрых электронов любым препятствием, в частности металлическими электродами.

Свойства рентгеновских лучей. Лучи, открытые Рентгеном, ***действовали на фотопластинку, вызывали ионизацию воздуха***, но заметным образом ***не отражались от каких-либо веществ*** **и** ***не испытывали преломления***. ***Электромагнитное поле не оказывало никакого влияния на направление*** их распространения. Сразу же возникло предположение, что рентгеновские лучи – это электромагнитные волны, которые ***излучаются при резком торможении электронов. Большая проникающая способность*** рентгеновских лучей и прочие их особенности связывались с малой длиной волны.

Дифракция рентгеновских лучей. Если рентгеновское излучение представляет собой электромагнитные волны, то оно должно обнаруживать дифракцию – явление, присущее всем видам волн. Сначала пропускали рентгеновские лучи через очень узкие щели в свинцовых пластинках, но ничего похожего на дифракцию обнаружить не удавалось.

Немецкий физик Макс Лауэ предположил, что длина волны рентгеновских лучей слишком мала, для того чтобы можно было обнаружить дифракцию этих волн на

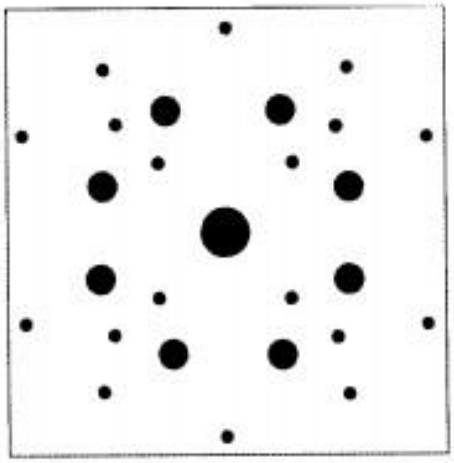


Рис. 10.5



Рис. 10.6

искусственно созданных препятствиях. Ведь нельзя сделать щели размером 10^{-8} см, поскольку таковы размеры самих атомов. А что, если рентгеновские лучи имеют примерно такую же длину волны? Тогда остается единственная возможность – использовать кристаллы. Они представляют собой упорядоченные структуры, где расстояния между отдельными атомами по порядку величины равны размерам самих атомов, т. е. 10^{-8} см. Кристалл с его периодической структурой и есть то естественное устройство, которое неизбежно должно вызвать заметную дифракцию волн, если их длина волны близка к размерам атомов. И вот узкий пучок рентгеновских лучей был направлен на кристалл, за которым располагалась фотопластинка. Результат полностью согласовался с самыми оптимистическими ожиданиями! Наряду с большим центральным пятном, которое давали лучи, распространяющиеся по прямой, возникли регулярно расположенные небольшие пятнышки вокруг центрального пятна (рис. 10.5). Появление этих пятнышек можно было объяснить только дифракцией рентгеновских лучей на упорядоченной структуре кристалла. Исследование дифракционной картины позволило определить длину волны рентгеновских лучей. Она оказалась меньше длины волны ультрафиолетового излучения и по порядку величины была равна размерам атома.

Применение рентгеновских лучей.

Рентгеновские лучи широко используют на практике. В медицине они применяются для постановки правильного диагноза заболевания, а также для лечения раковых заболеваний.

Поглощение рентгеновских лучей пропорционально плотности вещества.

Поэтому с помощью рентгеновских лучей можно получать фотографии внутренних органов человека. На этих фотографиях хорошо различимы кости скелета (рис. 10.6) и места перерождений мягких тканей.

Весьма обширны применения рентгеновских лучей в научных исследованиях. По дифракционной картине, даваемой рентгеновскими лучами при их прохождении сквозь кристаллы, удается установить порядок расположения атомов в пространстве – структуру кристаллов. Сделать это для неорганических кристаллических веществ оказалось не очень сложным. Но с помощью рентгеноструктурного анализа можно расшифровать также строение сложнейших органических соединений, в том числе белков. В частности, была определена структура молекулы гемоглобина, содержащей десятки тысяч атомов.

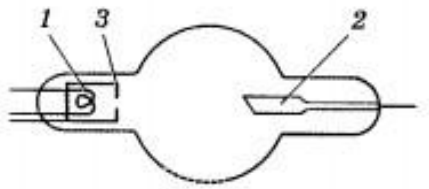


Рис. 10.7

Эти достижения стали возможны благодаря тому, что длина волны рентгеновских лучей очень мала, именно поэтому удалось «увидеть» молекулярные структуры, а именно: получить дифракционную картину, с помощью которой после ее расшифровки можно восстановить характер пространственного расположения атомов.

Устройство рентгеновской трубки. В настоящее время для получения рентгеновских лучей разработаны весьма совершенные устройства, называемые рентгеновскими трубками.

На рисунке 10.7 изображена упрощенная схема электронной рентгеновской трубки. Катод 1 представляет собой вольфрамовую спираль, испускающую электроны за счет термоэлектронной эмиссии. Цилиндр 3 фокусирует поток электронов, которые затем соударяются с металлическим электродом (анодом) 2. При этом появляются рентгеновские лучи. Напряжение между анодом и катодом достигает нескольких десятков киловольт. В трубке создается глубокий вакуум; давление газа в ней не превышает 10^{-5} мм рт. ст.

В мощных рентгеновских трубках анод охлаждается проточной водой, так как при торможении электронов выделяется большое количество теплоты. В полезное излучение превращается лишь около 3% энергии электронов.

Гамма-лучи. По своим свойствам γ-лучи очень сильно напоминают рентгеновские, но только их проникающая способность гораздо больше, чем у рентгеновских лучей. Это

наводило на мысль, что γ-лучи представляют собой электромагнитные волны. Все сомнения в этом отпали после того, как была обнаружена дифракция γ-лучей на кристаллах и измерена их длина волны. Она оказалась очень малой – от 10^{-8} до 10^{-11} см.

На шкале электромагнитных волн гамма-лучи следуют непосредственно за рентгеновскими. Скорость распространения γ-лучей такая же, как у всех электромагнитных волн, - около 300 000 км/с.

Рентгеновское излучение широко используется в медицине, для научных исследований. Рентгеновские лучи, как и γ-излучение – электромагнитные волны с малой длиной волны.

Вопросы для закрепления:

1. Что надо изменить в спектральном аппарате, если вместо призмы использовать дифракционную решетку?
2. Известен ли вам какой-либо источник ультрафиолетового излучения?
3. Почему солнечный свет, прошедший сквозь оконное стекло, не вызывает загара?
4. Кем и когда впервые сделано открытие рентгеновских лучей?
5. Каковы их свойства?
6. Где они применяются?
7. Как устроена рентгеновская трубка?
8. Почему трудно изготовить рентгеновский микроскоп?
9. Какими способами регистрируются радиоволны, излучения оптического диапазона, рентгеновские лучи?

50. Принцип относительности Эйнштейна. Относительность расстояний. Относительность одновременности.

Теория относительности представляет собой систему современных взглядов на пространство и время.

Согласно классическим представлениям о пространстве и времени, считавшимся на протяжении веков незыблемыми, движение не оказывает никакого влияния на течение времени (время абсолютно), а линейные размеры любого тела не зависят от того, покоиться ли тело или движется (длина абсолютна).

Развитие электродинамики привело к пересмотру представлений о пространстве и времени.

Возникновение СТО.

После того, как во второй половине 19 века, Максвелл сформулировал основные законы электродинамики, ученые осознали, что принцип относительности Галилея сложно применить к электромагнитным явлениям. Возник вопрос: протекают ли электромагнитные процессы одинаково во всех инерциальных СО?

Согласно законам электродинамики: $c=3*10^8$ м/с. Исходя из законов сложения скоростей механики Ньютона, скорость света может равняться только в одной избранной системе отсчета.

СТО появилась в результате возникшего противоречия между электродинамикой Максвелла и механикой Ньютона.



1. Что понимается в физике под «системой отсчета»?
2. Какие системы отсчета называются инерциальными и неинерциальными?
3. В чем заключается принцип относительности Галилея?
4. Основные положения электродинамики Максвелла?

Возможные выходы из противоречия:

1. несостоятельность принципа относительности (Х.Лоренц)
2. несостоятельность формул Максвелла (Г.Герц)
3. отказ от классических представлений о пространстве и времени, сохранение принципа относительности и законов Максвелла (А.Эйнштейн)

Единственно правильной оказалась именно третья возможность. Последовательно развивая ее, А.Эйнштейн пришел к новым представлениям о пространстве и времени. Первые два пути, как оказалось, опровергаются экспериментом.

Постулаты СТО.

В основе теории относительности лежат два постулата.

Понятие постулата в науке.

Постулат в физической теории играет ту же роль, что и аксиома в математике. Это – основное положение, которое не может быть логически доказано. В физике постулат есть результат обобщения опытных фактов.

Постулаты СТО:

1. Принцип относительности Эйнштейна: все процессы природы протекают одинаково во всех ИСО.
2. Второй постулат: скорость света в вакууме одинакова для всех ИСО. Она не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приемника светового сигнала

До начала 20 века никто не сомневался, что время абсолютно. Два события, одновременные для жителей Земли, одновременны для жителей любой другой космической цивилизации. Создание ТО показало, что это не так.

Следствия СТО.

1. Относительность одновременности: два пространственно разделенных события, одновременные в одной ИСО, могут не быть одновременными в другой ИСО.

При переходе из одной СО в другую может изменяться последовательность событий во времени, однако последовательность причинно-следственных событий остается неизменной во всех СО: следствие наступает после причины.

Причиной относительности одновременности является конечность скорости распространения сигналов.

2. Относительность расстояний (релятивистское сокращение размеров тела в движущейся СО): длина движущегося предмета сокращается в направлении движения.

$$l = l_0\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}} \Rightarrow l < l_0 \qquad (1)$$

l – длина покоящегося тела;

l_0 – длина движущегося тела;

υ – скорость его движения в данной СО.

(релятивистскими называются эффекты, наблюдаемые при скоростях движения, близких к скорости света)

Размеры предметов в направлении, перпендикулярном направлению движения, не изменяются.

3. Относительность промежутков времени: ход движущихся часов замедляется.

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \Rightarrow \tau > \tau_0 \qquad (2)$$

τ_0 – интервал времени, измеренный часами, покоящимися в той СО, где оба события произошли в одной и той же точке пространства.

τ – интервал времени между двумя событиями, измеренный движущимися часами.

Время на космическом корабле, летящем с постоянной скоростью, протекает медленнее, чем на «неподвижной» Земле. Но космонавт никаким образом не может подметить эти изменения, т.к. и все процессы внутри корабля, которые могли бы служить мерилом измерения времени, замедлены в том же отношении. Биение сердца и все функции организма тоже происходят в замедленном темпе. Если скорость движения приближается к скорости света, то путешествие до туманности Андромеды займет 29 лет. Но по земным часам пройдет почти 3 миллиона лет.

Если $\upsilon << c$, то в формулах (1) и (2) можно пренебречь величиной υ^2/c^2. Тогда $l \approx l_0$ и $\tau \approx \tau_0$, т.е. релятивистское сокращение размеров тел и замедление времени в движущейся СО можно не учитывать.

Вопросы для закрепления:

1. Привести примеры инвариантных и неинвариантных величин.
2. Какая система отсчета называется инерциальной?
3. Почему возникла проблема несовместимости законов электродинамики с преобразованиями Галилея?
4. Какой выход находит Эйнштейн из создавшейся ситуации?
5. Какие проблемы возникли после результата опыта Майкельсона-Морли?

51. Релятивистский закон сложения скоростей. Релятивистская динамика. Зависимость массы от скорости. Связь массы и энергии.

Релятивистский закон сложения скоростей (направленных вдоль одной линии)

$$\upsilon_2 = \frac{\upsilon_1 + \upsilon}{1 + \frac{\upsilon_1 \upsilon}{c^2}}$$

υ_1 – скорость тела в 1-й СО;

υ_2 – скорость тела во 2-й СО;

υ – скорость движения 1-й СО относительно 2-й.

При $\upsilon 1$, $\upsilon << c$ получаем $\upsilon_2 = \upsilon_1 + \upsilon$, т.е. закон сложения скоростей в классической механике.

Если $\upsilon = c$ (т.е. речь идет о распространении света), получаем $\upsilon_2 = c$, что соответствует второму постулату СТО.

Для начала рассмотрим, какой же вид приобретет второй закон Ньютона в релятивистской механике. И для этого вспомним первоначальный вид второго закона Ньютона в классической механике.

$$m \cdot \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{F}$$

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}$$

(импульсная форма)

При этом при увеличении скорости масса растет:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

m_0 – масса покоя

В современной теоретической физике существует тенденция называть массой только массу покоя, а понятие релятивистской массы не вводить.

Как видим, чем больше скорость тела, тем большая у него масса. Рассмотрим зависимость массы тела от его скорости (Рис. 1.).

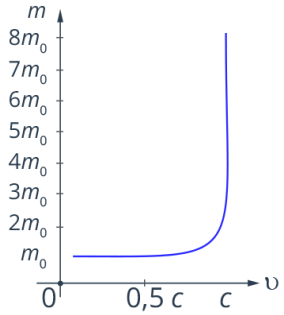


Рис. 1. Зависимость массы тела от его скорости

График зависимости массы от скорости тела

Из рисунка видно, что возрастание массы тела тем больше, чем ближе скорость тела v к скорости света c. При фактическом достижении скорости света масса тела стремится к бесконечности.

При больших скоростях, в релятивистском случае, второй закон Ньютона имеет точно такой же вид.

Учитывая тот факт, что скорости объектов в окружающем нас мире намного меньше скорости света, мы это увеличение массы в повседневном мире не ощущаем. На самом деле, даже для ракеты, которая движется со скоростью порядка 10 км/с, изменение массы будет составлять миллионные доли процентов.

Примеры и особенности изменения массы с изменением скорости

Однако для элементарных частиц, которые такие современные ускорители, как Большой адронный коллайдер, научились разгонять до скорости, близкой к скорости света, это изменение массы весьма существенное. Например, электроны могут быть разогнаны до скоростей, на 50 м/с меньших, чем скорость света в вакууме. При этом масса электрона возрастает примерно в 2000 раз по сравнению с его массой в неподвижном состоянии, т.н. массой покоя.

Это значит, что для расчета траектории таких частиц пользоваться классической механикой, механикой Ньютона, уже нельзя. Так как сила, которая потребуется, чтобы удержать этот электрон, на той траектории, по которой он двигается, тоже будет больше в 2000 раз.

Релятивистский импульс

С учетом увеличения массы формула для импульса приобретет вид:

$$\vec{p} = \frac{\vec{v} m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Что характерно, основной закон релятивистской динамики будет записан в точно такой же форме, как и закон в случае классической механики, а именно:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}$$

Но теперь мы понимаем, что под массой m мы подразумеваем именно релятивистскую массу, точнее массу, изменяющуюся при движении тела.

С учетом полученного нами выражения для массы, парадокс, о котором мы говорили выше, разрешен. Ведь если скорость тела крайне близка к скорости света, его масса, как мы видели, стремится к бесконечности, а значит, даже постоянно действующая сила не сможет разогнать, не сможет изменить его скорость.

Классическая механика Ньютона, те три закона Ньютона, которые лежат в ее основе, вполне успешно работает в случае скоростей, намного меньших, чем скорость света. Поэтому для решения повседневных задач, мы будем пользоваться именно классической механикой, в случае же работы со скоростями, близкими к скорости света, нужно учитывать данное изменение массы, о котором мы уже упоминали.

Связь между массой и энергией. Масса покоя

Теперь перейдем к важнейшему следствию из теории относительности, а именно к связи между массой и энергией. Это связь, которая неизбежно следует из того факта, что масса тела при движении изменяется.

Представьте себе сосуд, в котором находится какой-то газ, в качестве примера можно представить воздух в комнате, в которой вы находитесь (Рис. 3.).



Рис. 3. Комната, наполненная воздухом

Если мы нагреваем этот воздух, значит, мы сообщаем ему дополнительную энергию (E). Но при этом стоит вспомнить, что скорость хаотического теплового движения молекул, которая зависит от температуры, тоже естественно увеличивается при нагревании газа. Мы только что записали, что увеличение скорости движения молекул означает увеличение массы всех молекул, а именно масса молекул растет. Следовательно, и суммарная масса воздуха в комнате увеличивается, а следовательно, увеличивается внутренняя энергия.

С помощью теории относительности Эйнштейн вывел формулу связи массы и энергии.

$$E = mc^2 = \frac{c^2 m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Энергия тела или системы тел равна массе, умноженной на квадрат скорости света.

Таким образом, изменение энергии системы приводит к изменению массы системы.

Важно отметить, что небольшие изменения энергии влекут за собой такие же малые изменения массы.

Примеры

Согласно вышеприведенной формуле масса воды в горячем чайнике будет немного больше, чем масса воды в холодном чайнике, но это изменение будет настолько мало, что даже самые точные весы не смогут его зафиксировать.

Существенным такое изменение будет лишь для атомных ядерных реакций и для элементарных частиц.

При превращении элементарной частицы из частицы, масса покоя которой фиксирована, в частицу, масса покоя которой равна 0, такое изменение массы приводит к высвобождению энергии, к увеличению кинетической энергии вновь образовавшейся частицы.

Мы получили основной закон релятивистской динамики, он имеет схожий вид с законом в классической динамике, но теперь мы понимаем, что масса тела, которое движется со скоростью V, больше, чем масса покоящегося тела. Кроме того, мы ознакомились с универсальной формулой, которая связывает массу и энергию.

Вопросы для закрепления:

1. В чем заключается принцип относительности Галилея?
2. Сформулируйте постулаты специальной теории относительности.
3. В чем смысл опыта Майкельсона-Морли?
4. Какие возникли противоречия между классическим законом сложения скоростей и постулатом Эйнштейна об абсолютности скорости света?
5. Могли бы Вы логически обосновать то, что при движении тела сокращаются его продольные размеры, а не поперечные?

52. Внешний фотоэлектрический эффект. Законы внешнего фотоэффекта. Фотоны.

Зарождение квантовой теории

В конце XIX в. многие ученые считали, что развитие физики завершилось по следующим причинам:

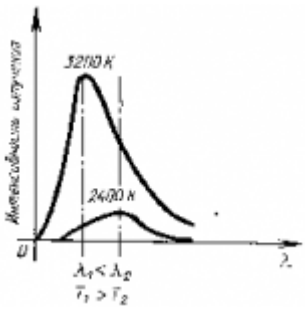
1. Больше 200 лет существуют законы механики, теория всемирного тяготения.
2. Разработана МКТ.
3. Подведен прочный фундамент под термодинамику.
4. Завершена максвелловская теория электромагнетизма.
5. Открыты фундаментальные законы сохранения (энергии, импульса момента импульса, массы и электрического заряда).

В конце XIX-начале XX в. открыты В. Рентгеном Х-лучи (рентгеновские лучи), А. Беккерелем – явление радиоактивности, Дж. Томсоном – электрон. Однако классическая физика не сумела объяснить эти явления. Специальные опыты подтвердили справедливость гипотезы Дж. Максвелла об электромагнитной природе света.

Для теоретического рассмотрения законов излучений использовали *модель абсолютно черного тела*, т.е. тела, полностью поглощающего электромагнитные волны любой длины и, соответственно, излучающего все длины электромагнитных волн.

Примером абсолютно черного тела по излучающей способности может быть Солнце, по поглощающей – полость с зеркальными стенками с маленьким отверстием.

Австрийские физики И. Стефан и Л. Больцман экспериментально установили, что полная энергия *E,* излучаемая за 1 с абсолютно черным телом с единицы поверхности, пропорциональна четвертой степени абсолютный температуры *T:*



$\boxed{E = \sigma T^4}$, где s=5,67·10^{-8} Дж/(м^2·К-с) – постоянная Стефана-Больцмана.

Этот закон был назван *законом Стефана-Больцмана.* Он позволил вычислить энергию излучения абсолютно черного тела по известной температуре.

Пример экспериментально полученных кривых распределения энергии в спектре излучения черного тела.

При заданном значении температуры T интенсивность излучения черного тела максимальна и соответствует определенному значению длины волны l. Немецкий физик В. Вин обнаружил, что при изменении температуры длина волны, на которую приходится максимальная энергия $\mathbf{E_{max}}$, убывает обратно пропорционально температуре, поэтому $\lambda_{max} T = const$ (закон Вина). Используя законы термодинамики, В. Вин получил закон распределения энергии в спектре черного тела, который совпадал с экспериментальными результатами лишь в области больших частот.

Законы электромагнетизма, полученные Максвеллом, оказались не в состоянии объяснить форму кривой распределения интенсивности в спектре абсолютно черного тела. При удалении от этого значения интенсивность электромагнитного излучения плавно убывает.

Гипотеза Планка

Стремясь преодолеть затруднения классической теории при объяснении излучения черного тела, М. Планк в 1900 г. высказал гипотезу: ***атомы испускают электромагнитную энергию отдельными порциями – квантами***. Энергия E

$$E = h\nu$$

где **h=6,63·10^{-34} Дж·с – постоянная Планка.**

Иногда удобно измерять энергию и постоянную Планка в электронвольтах.

Тогда **h=4,136·10^{-15} эВ·с**. В атомной физике употребляется также величина

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1{,}055 \cdot 10^{-34}\ \text{Дж} \cdot \text{с} = 6{,}59 \cdot 10^{-16}\ \text{эВ} \cdot \text{с}$$

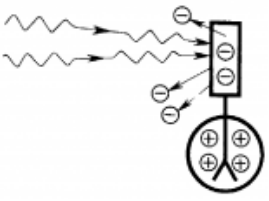
(1 эВ – энергия, которую приобретает элементарный заряд, проходя ускоряющую разность потенциалов 1 В. 1 эВ=1,6·10^{-19} Дж).

Таким образом, М. Планк указал путь выхода из трудностей, с которыми столкнулась теория теплового излучения, после чего начала развиваться современная физическая теория, называемая ***квантовой физикой.***

Фотоэффект

Фотоэффектом называется испускание электронов с поверхности металла под действием света.

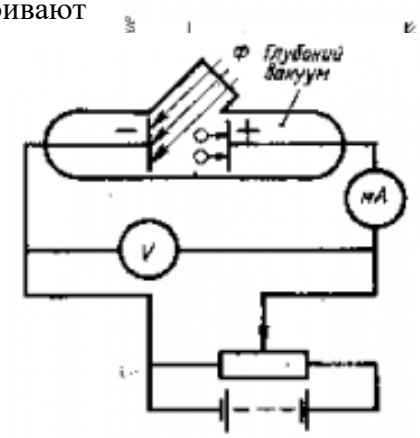
В 1888 г. Г. Герц обнаружил, что при облучении ультрафиолетовыми лучами электродов, находящихся под высоким напряжением, разряд возникает при большем расстоянии между электродами, чем без облучения.



Фотоэффект можно наблюдать в следующих случаях:

Цинковую пластину, соединенную с электроскопом, заряжают отрицательно и облучают ультрафиолетовым светом. Она быстро разряжается. Если же ее зарядить положительно, то заряд пластины не изменится.

Ультрафиолетовые лучи, проходящие через сетчатый положительный электрод, попадают на отрицательно заряженную цинковую пластину и выбивают из нее электроны, которые устремляются к сетке, создавая фототек, регистрируемый чувствительным гальванометром.



Законы фотоэффекта. Количественные закономерности фотоэффекта (1888—1889) были установлены А. Г. Столетовым.

Он использовал вакуумный стеклянный баллон с двумя электродами. Через кварцевое стекло на катод попадает свет (в

том числе ультрафиолетовое излучение). С помощью потенциометра можно регулировать напряжение между электродами. Ток в цепи измерялся миллиамперметром.

В результате облучения электроны, выбитые из электрода, могут достигнуть противоположного электрода и создать некоторый начальный ток.

При увеличении напряжения, поле разгоняет электроны, и ток увеличивается, достигая насыщения, при котором все выбитые электроны достигают анода.

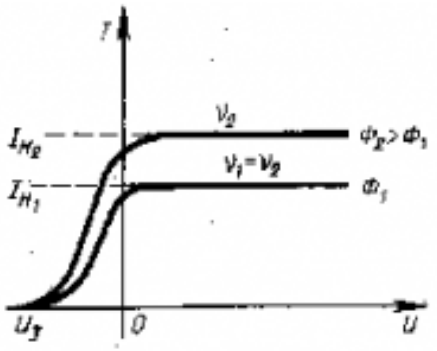
Если приложить обратное напряжение, то электроны тормозятся и ток уменьшается. При так называемом *запирающем напряжении* фототок прекращается. Согласно закону сохранения энергии , где m – масса электрона, а υ_{max} – максимальная скорость фотоэлектрона.

$$eU_з = \frac{m\upsilon_{max}^2}{2}$$

Важнейшим свойством фотоэффекта является его *безинерционность,* которая не может быть объяснена с точки зрения волновой теории.

Законы фотоэффекта.

Первый закон



Исследуя зависимость силы тока в баллоне от напряжения между электродами при постоянном световом потоке на один из них, он установил *первый закон фотоэффекта.*

Фототок насыщения пропорционален световому потоку, падающему на металл.

Т.к. сила тока определяется величиной заряда, а световой поток – энергией светового пучка, то можно сказать:

<u>число электронов, выбиваемых за 1 с из вещества, пропорционально интенсивности света, падающего на это вещество.</u>

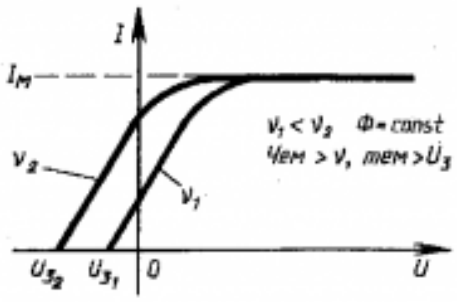
Второй закон

Изменяя условия освещения на этой же установке, А. Г. Столетов открыл второй закон фотоэффекта:

<u>*кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а зависит от его частоты.*</u>

Из опыта следовало, что если частоту света увеличить, то при неизменном световом потоке запирающее напряжение увеличивается, а, следовательно, увеличивается и кинетическая энергия фотоэлектронов. Таким образом, *кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света.*

Третий закон



Заменяя в приборе материал фотокатода, Столетов установил третий закон фотоэффекта:

<u>*для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т. е. существует наименьшая частота ν_{min}, при которой еще возможен фотоэффект.*</u>

При $\nu<\nu_{min}$ ни при какой интенсивности волны падающего на фотокатод света фотоэффект не произойдет. *Минимальной частоте* света $\lambda = \frac{c}{\nu}$ соответствует *максимальная длина волны*.

Теория фотоэффекта

А. Эйнштейн, развив идею М. Планка (1905), показал, что законы фотоэффекта могут быть объяснены при помощи квантовой теории. Явление фотоэффекта экспериментально доказывает: *свет имеет прерывистую структуру.*

Излученная порция $E=h\nu$ сохраняет свою индивидуальность и поглощается веществом только целиком.

Эйнштейн предположил:

1. Один фотон может выбить только один электрон (это верно для всех процессов с небольшой интенсивностью излучения).
2. На основании закона сохранения энергии:

$$h\nu = A + \frac{m\upsilon^2}{2}$$

уравнение Эйнштейна.

Его смысл: энергия кванта тратится на работу выхода электрона из металла и сообщение электрону кинетической энергии.

В этом уравнении: ν – частота падающего света, m – масса электрона (фотоэлектрона), υ – скорость электрона, h – постоянная Планка, A – работа выхода электронов из металла.

Работа выхода – это характеристика материала (табличная величина). Она показывает, какую работу должен совершить электрон, чтобы преодолеть поверхностную разность потенциалов и выйти за пределы металла. Работа выхода обычно измеряется в электронвольтах (эВ).

Фотон и его свойства

Фотон **–** материальная, электрически нейтральная частица, квант электромагнитного поля (переносчик электромагнитного взаимодействия).

Основные свойства фотона

1. Является частицей электромагнитного поля.
2. Движется со скоростью света.
3. Существует только в движении.
4. Остановить фотон нельзя: он либо движется со скоростью, равной скорости света, либо не существует; следовательно, масса покоя фотона равна нулю.

Энергия фотона: $\boxed{E = h\nu \text{ или } E = \hbar\omega}$.

Согласно теории относительности энергия всегда может быть вычислена как $\boxed{E = mc^2}$,отсюда – *масса фотона*. $\boxed{m = \frac{h\nu}{c^2}}$

Импульс фотона. Импульс фотона направлен по световому пучку. $\boxed{p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}}$

$$E = h\nu \qquad m = \frac{h\nu}{c^2} \qquad p = \frac{h}{\lambda}$$

Наличие импульса подтверждается экспериментально: существованием светового давления.

Фотоэлементы и их применение .

Приборы, в основе принципа действия которых лежит явление фотоэффекта, называют фотоэлементами**.**

Применение в технике

1. Кино: воспроизведение звука.
2. Фототелеграф, фототелефон.
3. Фотометрия: для измерения силы света, яркости, освещенности.

Фоторезистор **–** устройство, сопротивление которого зависит от освещенности.

Используется при автоматическом управлении электрическими цепями с помощью световых сигналов и в цепях переменного тока

Вопросы для закрепления:

1. В чем заключается гипотеза Планка
2. Кем и когда открыто явление фотоэффекта?
3. Что показывает работа выхода?
4. Каким образом объяснил фотоэффект Эйнштейн?
5. Основные свойства фотона?

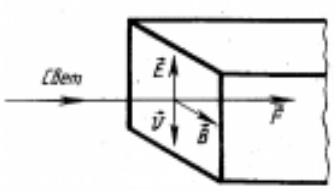
53. Внутренний фотоэффект, его особенность. Применение фотоэффекта в технике. Давление света.

Внутренний фотоэффект представляет собой процесс образования свободных носителей заряда внутри вещества при воздействии излучения. Взаимодействие излучения с веществом (далее будем рассматривать только полупроводники) может происходить без изменения или с изменением энергии падающего кванта. В этом случае лишь поглощение фотонов представляет интерес. При этом, однако, возможно такое поглощение, при котором энергия фотона переходит в упругие колебания кристаллической решетки, иными словами, в энергию фононов, в результате поглощение излучения вызывает повышение температуры тела.

Этот эффект находит и практическое применение в одной из разновидностей фотоприемников – болометрах, но из-за невысокой чувствительности и низкого быстродействия болометры в оптоэлектронике не применяются. Лишь непосредственное возбуждение атомов, заключающееся в появлении дополнительных носителей заряда (фотоносителей), относится к фотоэффекту. Фотоэффект проявляется в электронных переходах двух типов: собственных (фундаментальных) и примесных.

Давление света

В 1873 г. Дж. Максвелл, исходя из представлений об электромагнитной природе света, пришел к выводу: *свет должен оказывать давление на препятствие* (благодаря действию силы Лоренца; на рисунке v – направление скорости электронов под действием электрической составляющей электромагнитной волны).



Квантовая теория света объясняет световое давление как результат передачи фотонами своего импульса атомам или молекулам вещества. Пусть на поверхность абсолютно черного тела площадью S перпендикулярно к ней ежесекундно падает N фотонов: $N = \frac{\Delta N}{\Delta t}$. Каждый фотон обладает импульсом $\frac{h\nu}{c}$. Полный импульс, получаемый поверхностью тела, равен $\frac{h\nu}{c}N$ Световое давление:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{p \cdot \Delta t}{S} = \frac{h\nu N}{Sc}$$

При падении света на зеркальную поверхность, это давление оказалось ~$4 \cdot 10^{-6}$ Па.

Предсказание Дж. Максвеллом существования светового давления было экспериментально подтверждено П. Н. Лебедевым, который в 1900 г. измерил давление света на твердые тела, используя чувствительные крутильные весы. Теория и эксперимент совпали.



Опыты П. Н. Лебедева – экспериментальное доказательство факта: *фотоны обладают импульсом.*

Эффект Комптона (1923)

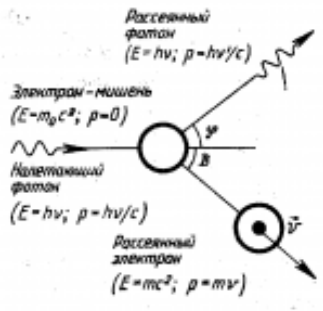
А. Комптон на опыте подтвердил квантовую теорию света. С точки зрения волновой теории световые волны должны рассеиваться на малых частицах без какого-либо изменения частоты излучения, что опытом не подтверждается.

При исследовании законов рассеяния рентгеновских лучей А. Комптон установил, что при прохождении рентгеновских лучей через вещество происходит увеличение длины волны рассеянного излучения по сравнению с длиной волны падающего излучения. Чем больше угол рассеяния, тем больше потери энергии, а следовательно, и уменьшение частоты (увеличение длины волны). Если считать, что пучок рентгеновских лучей состоит из фотонов, которые летят со скоростью света, то результаты опытов А. Комптона можно объяснить следующим образом.

Законы сохранения энергии и импульса для системы фотон-электрон:

$$h\nu + m_0c^2 = h\nu' + mc^2$$

$$\vec{p} = \vec{p}' + m\vec{v}$$



где m_0c^2 – энергия неподвижного электрона; $h\nu$ –энергия фотона до столкновения; $h\nu'$ – энергия фотона после столкновения , P и p' – импульсы фотона до и после столкновения; mv – импульс электрона после столкновения с фотоном.

Химическое действие света

Под действием света могут происходить следующие процессы: присоединение атомов к молекулам, диссоциация, фотохимическая реакция, реакция синтеза.

Фотосинтез – процесс образования углеводов под действием света с выделением кислорода растениями и некоторыми микроорганизмами. Обеспечивает круговорот кислорода в природе.

Фотохимическая реакция разложения бромистого серебра AgBr составляет основу фотографии.

Процесс получения фотографии

Процесс получения фотоснимка состоит из четырех операций: фотосъемки, проявления фотопленки, ее закрепления (фиксирования) и фотопечати.

Фотосъемка **–** получение действительного изображения объекта в светочувствительном слое (эмульсия) фотопленки.

Фотоэмульсия: желатин, мелкие зерна AgBr. Квант энергии hν отрывает электроны от некоторых ионов брома, которые захватываются ионами серебра. В зернах AgBr образуются нейтральные атомы, количество которых пропорционально освещенности пленки. Эти атомы образуют скрытое изображение объекта съемки.

Проявление фотопленки: проявитель гидрохинон или метон восстанавливает бромистое серебро в свободное металлическое серебро.

В *процессе* ***закрепления*** в растворе тиосульфата натрия $Na_2S_2O_3$ происходит удаление из фотослоя всех светочувствительных зерен солей серебра, не успевших разложиться. Закрепление завершается промывкой в воде.

Фотопечать **–** перенос изображения с фотопленки на светочувствительную фотобумагу. Негативное изображение с фотопленки проецируют на фотобумагу, где

образуется скрытое позитивное изображение. Фотобумагу проявляют, фиксируют, промывают, сушат и получают фотографии.

Вопросы для закрепления:

1. Кто и когда сделал предположение о давлении света?
2. В чем заключались опыты Лебедева?
3. Эффект Комптона, доказывающий квантовую природу света?
4. Применение химическое действия света?
5. Что такое фотосинтез?
6. Описать процесс получения фотографии?

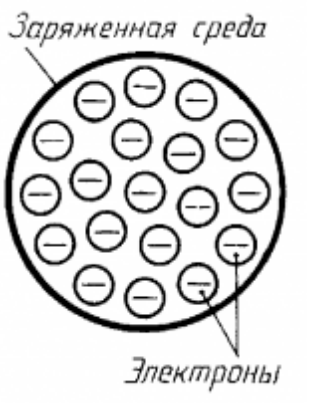
Раздел 6. Физика атома и атомного ядра

54. Строение атома. Опыт Резерфорда по рассеиванию α-частиц. Модель атома по Резерфорду. Постулаты Бора.

Строение атома.

Толчком к подробному изучению строения атома послужили:

- открытие рентгеновского излучения (1895 г., В. К. Рентген);
- открытие радиоактивности и новых радиоактивных элементов (1896 г., А. Беккерель, М. и П. Кюри);
- открытие электрона (1896 г., Дж. Дж. Томсон).

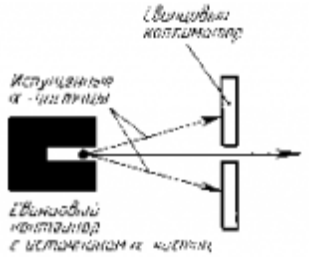


Мысль об электронном строении атома, впервые высказанную В. Вебером в 1896 г., развил Х. Лоренц: *электроны входят в состав атома.* Опираясь на эти открытия, Дж. Томсон в 1898 г. предложил модель атома в виде положительно заряженного шара радиусом 10^{-10} м. в котором плавают электроны, нейтрализующие положительный заряд.

Ядерная модель атома

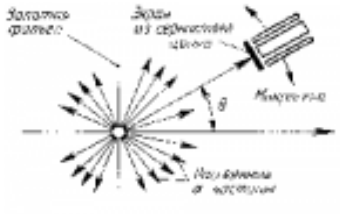
Экспериментальная проверка модели Томсона была осуществлена в 1911 г. английским физиком Э. Резерфордом.

Идея опыта заключалась в изучении рассеяния α-частиц (заряд +2e, масса $6{,}64 \cdot 10^{-27}$ кг) на атомах. α-частицы были выбраны, т.к. их кинетическая энергия много больше кинетической энергии электронов (β-лучи) и, в отличие от γ-лучей они имеют электрический заряд.



Пучок α-частиц пропускался через тонкую золотую фольгу. Золото было выбрано как очень пластичный материал, из которого можно получить фольгу толщиной практически в один атомный слой. Опыты были повторены и на других материалах

Э. Резерфорд и его помощники Г. Гейгер и Э. Марсден обнаружили, что какая-то часть α-частиц отклоняется на довольно значительный угол от своего первоначального направления, а небольшая часть отражается от фольги. Но согласно модели атома Томсона эти α-частицы при взаимодействии с атомами фольги отклоняются на малые углы, порядка 2°.

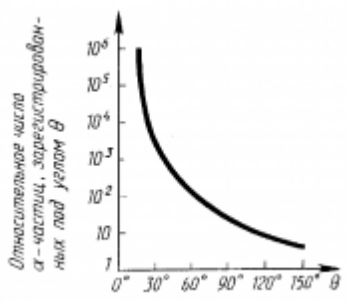


Резерфорд показал, что модель Томсона находится в противоречии с его опытами. Обобщая результаты своих опытов, Резерфорд предложил ***ядерную (планетарную) модель строения атома:***

1. Атом имеет ядро, размеры которого малы по сравнению с размерами самого атома (~10^{-15} м).
2. В ядре сконцентрирована почти вся масса атома.

Отрицательный заряд всех электронов распределен по всему объему атома и компенсирует положительный заряд ядра.

Расчеты показали, что α-частицы, которые взаимодействуют с электронами в веществе, почти не отклоняются. Только некоторые α-частицы проходят вблизи ядра и испытывают резкие отклонения. Если между зарядами действует кулоновская сила $F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$ или потенциальная энергия системы α-частица – ядро $W = -\frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r}$ и $\frac{m_\alpha v_\alpha^2}{2} \le \frac{q_\alpha q_я}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$,



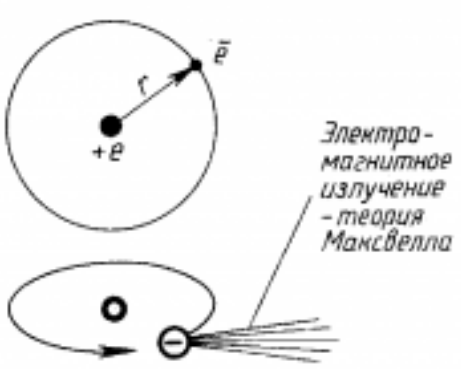
то α-частица будет отброшена назад.

При расчете учитывают, что $q_{e} = 2e$, где e – заряд электрона; $q_{я} = Ze$, где Z – зарядовое число, равное количеству электронов в атоме; диаметр ядра 10^{-15}-10^{-14} м, атома 10^{-10} м.

Противоречия с моделью строения атома Резерфорда.

Однако предложенная модель строения атома не позволила объяснить устойчивость атома:

- ускоренное движение электрона согласно теории Максвелла сопровождается электромагнитным излучением, поэтому энергия электрона уменьшается, и он движется по спирали, приближаясь к ядру. Казалось бы, электрон должен упасть на ядро (расчет показывает, что это должно произойти за 10^{-8} с), так как при движении по спирали уменьшается энергия электрона, в действительности атомы являются устойчивыми системами;
- спектр излучения при этом должен быть непрерывным (должны присутствовать все длины волн). На опыте спектр получается линейчатым;
- нет ответа на вопрос о строении ядра. Если в него входят только положительные частицы, то почему они не отталкиваются?



Постулаты Бора – основные допущения, сформулированные Нильсом Бором в 1913 году для объяснения закономерности линейчатого спектра атома водорода и водородоподобных ионов (формула Бальмера-Ридберга) и квантового характера испускания и поглощения света. Бор исходил из планетарной модели атома Резерфорда.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний) гласит: **атомная система может находиться только в особых *стационарных* или *квантовых* состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n. в стационарных состояниях атом не излучает.**

Этот постулат находится в явном противоречии с классической механикой, согласно которой энергия движущегося электрона может быть любой. Он находится в противоречии и с электродинамикой, так как допускает возможность ускоренного движения электронов без излучения электромагнитных волн. Согласно первому постулату Бора, атом характеризуется системой ***энергетических уровней***, каждый из которых соответствует определенному стационарному состоянию (рис. 6.2.2). Механическая энергия электрона, движущегося по замкнутой траектории вокруг положительно заряженного ядра, отрицательна. Поэтому всем стационарным состояниям соответствуют значения энергии $E_n<0$. При $E_n \geq 0$ электрон удаляется от ядра, т. е. происходит ионизация. Величина $|E_1|$ называется ***энергией ионизации***. Состояние с энергией E_1 называется ***основным состоянием*** атома.

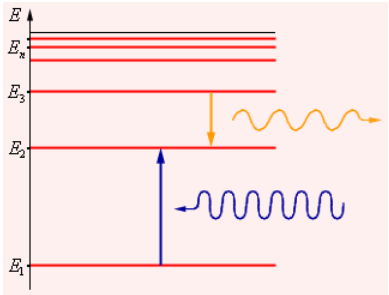


Рисунок 6.2.2.
Энергетические уровни атома и условное изображение процессов поглощения и испускания фотонов

Второй постулат Бора (***правило частот***) формулируется следующим образом: **при переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_n в другое стационарное**

состояние с энергией E_m излучается или поглощается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний: $h\nu_{nm}=E_n-E_m$,

где h – постоянная Планка. Отсюда можно выразить частоту излучения:

$$\nu_{nm}=\frac{E_n-E_m}{h}.$$

Второй постулат Бора также противоречит электродинамике Максвелла, так как частота излучения определяется только изменением энергии атома и никак не зависит от характера движения электрона.

Вопросы для закрепления:

1. Какие открытия в области физики привели к необходимости более подробно изучить строение атома?
2. В чем противоречие модели строения атома Томсона?
3. Модель атома Резерфорда и в чем её противоречие?
4. Как устроен атом в ядерной модели?
5. Какое условие выполняется для стационарной орбиты?
6. Определите значения энергий атома.

55. Открытие волновых свойств частиц. Волны Луи де Бройля. Спонтанное и вынужденное излучение. Квантовые источники света. Лазер.

Волновые свойства микрочастиц. Волны де Бройля.

Французский физик Луи де Бройль – потомок королей и будущий Нобелевский лауреат, родился в 1892 году.

Как и многие во время I Мировой войны воевал, а после войны стал работать в лаборатории своего старшего брата Мориса. Его занимал всё тот же вопрос: “Почему атомы устойчивы? Почему на стационарных орбитах электроны не излучают?”

Третий постулат Бора выделял эти орбиты из набора всех мыслимых орбит правилом квантования:

$$L_n = m_{эл} v_n r_n = n\,;\ h=\frac{nh}{2\pi}$$

Де Бройль хотел найти разумные основания для этого условия, то есть пытался понять физический смысл правила квантования.

В 1923 году де Бройль выдвинул гипотезу: не только свет, но и все тела в природе должны обладать и волновыми, и корпускулярными свойствами одновременно.

Чтобы понять это, нужно иметь непредвзятый ум. Природа не создала зримых образов, которые помогли бы наглядно представить это.

Длина волны λ, присущая частицам вещества, получила название длины волны де Бройля, а сами такие волны – волны де Бройля.

Волны де Бройля для электрона.

Движение электрона вокруг ядра в атоме будет устойчивым тогда, когда на длине орбиты укладывается целое число n длин волн электрона.

$2\pi r_n = n\lambda_n$, откуда $\frac{r_n}{\lambda_n}=\frac{n}{2\pi}$.

Домножим на h, имеем $\frac{h\,r_n}{\lambda_n}=\frac{n\,h}{2\pi}$, $p_n\,r_n=\frac{nh}{2\pi}$; $m_{эл}\,v_n\,r_n=\frac{nh}{2\pi}$

Получили третий постулат Бора.

Н*овое понятие стационарной орбиты:* это такая орбита, на которой укладывается целое число длин волн электрона.

Определим длину волны электрона.

$$\lambda_n=\frac{2\pi\cdot r_n}{n};\ (*)$$

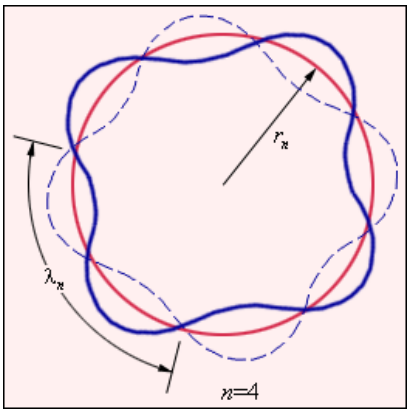


Рис. 1 Иллюстрация теории де Бройля

Выразим n из третьего постулата и подставим в (*). Получим:

$$n=\frac{m_{эл}v_n r_n\cdot 2\pi\cdot h}{h};\Rightarrow \lambda_n=\frac{2\pi\cdot r_n h}{m_{эл}v_n r_n 2\pi}=\frac{h}{m_{эл}v_n};$$

$\lambda_n=\frac{h}{m_{эл}v_n}=\frac{h}{p_{эл.n}}$ – “длина волны” электрона на n орбите.

Пример: электрон в атоме движется со средней скоростью $v=10^6$ м/с, тогда длина волны электрона в атоме $\lambda=7{,}3\cdot10^{-10}$ м $=7{,}3$ А°.

Волны де Бройля для частиц вещества.

Если частица релятивистская $\lambda=\frac{h}{p}=\frac{h\cdot\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}{m_0 v}$.

Если частица нерелятивистская, то есть v << c, имеем $\lambda=\frac{h}{mv}$.

Пример. Для тела массой m=1 кг при v=1 м/с имеем $\lambda=6{,}63\cdot10^{-34}$ м.

Волновые эффекты такой малости обнаружить невозможно.

Атом, находясь в возбужденном состоянии *a*, может через некоторый промежуток времени спонтанно, без каких-либо внешних воздействий, перейти в состояние с низшей энергией (в нашем случае в основное), отдавая избыточную энергию в виде электромагнитного излучения (испуская фотон с энергией $h\nu=E_2-E_1$). Процесс испускания фотона возбужденным атомом (возбужденной микросистемой) без каких-либо внешних воздействий называется **спонтанным** (или **самопроизвольным**) **излучением**. Чем больше вероятность спонтанных переходов, тем меньше среднее время жизни атома в возбужденном

состоянии. Так как спонтанные переходы взаимно не связаны, то спонтанное излучение некогерентно.

В 1916 г. А. Эйнштейн для объяснения наблюдавшегося на опыте термодинамического равновесия между веществом и испускаемым и поглощаемым им излучением постулировал, что помимо поглощения и спонтанного излучения должен существовать третий, качественно иной тип взаимодействия. Если на атом, находящийся в возбужденном состоянии *2*, действует внешнее излучение с частотой, удовлетворяющей условию $h\nu=E_2-E_1$, то возникает **вынужденный (индуцированный) переход** в основное состояние *1* с излучением фотона той же энергии $h\nu=E_2-E_1$. При подобном переходе происходит излучение атомом *фотона, дополнительно* к тому фотону, под действием которого произошел переход. Возникающее в результате таких переходов излучение называется **вынужденным (индуцированным) излучением.** Таким образом, в процесс вынужденного излучения вовлечены два фотона: первичный фотон, вызывающий испускание излучения возбужденным атомом, и вторичный фотон, испущенный атомом. Существенно, что вторичные фотоны *неотличимы* от первичных, являясь *точной их копией.*

Лазеры или **оптические квантовые генераторы** – это современные источники когерентного излучения, обладающие целым рядом уникальных свойств. Создание лазеров явилось одним из самых замечательных достижений физики второй половины XX века, которое привело к революционным изменениям во многих областях науки и техники. К настоящему времени создано большое количество лазеров с различными характеристиками – газовых, твердотельных, полупроводниковых, излучающих свет в различных оптических диапазонах. Лазеры могут работать в импульсном и непрерывном режимах. Мощность излучения лазеров может изменяться в пределах от долей милливатта до 10^{12}-10^{13} Вт (в импульсном режиме).

Лазеры находят широкое применение в военной технике, в технологии обработки материалов, в медицине, оптических системах навигации, связи и локации, в прецизионных интерференционных экспериментах, в химии, просто в быту и т. д. Хотя первый оптический квантовый генератор был построен сравнительно недавно (1960 г.), современную жизнь уже невозможно представить без лазеров.

Одним из важнейших свойств лазерного излучения является чрезвычайно высокая степень его монохроматичности, недостижимая в излучении нелазерных источников. Это и все другие уникальные свойства лазерного излучения возникают в результате согласованного, кооперативного испускания световых квантов многими атомами рабочего вещества.

Чтобы понять принцип работы лазера, нужно более внимательно изучить процессы поглощения и излучения атомами квантов света. Атом может находиться в различных энергетических состояниях с энергиями E_1, E_2 и т. д. В теории Бора эти состояния называются стабильными. На самом деле стабильным состоянием, в котором атом в отсутствие внешних возмущений может находиться бесконечно долго, является только состояние с наименьшей энергией. Это состояние называют основным. Все другие состояния нестабильны. Возбужденный атом может пребывать в этих состояниях лишь очень короткое время, порядка 10^{-8} с, после этого он самопроизвольно переходит в одно из низших состояний, испуская квант света, частоту которого можно определить из второго постулата Бора. Излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из одного состояния в другое, называют ***спонтанным***. На некоторых энергетических уровнях атом может пребывать значительно большее время, порядка 10^{-3} с. Такие уровни называются ***метастабильными***.

Переход атома в более высокое энергетическое состояние может происходить при резонансном поглощении фотона, энергия которого равна разности энергий атома в конечном и начальном состояниях.

Переходы между энергетическими уровнями атома не обязательно связаны с поглощением или испусканием фотонов. Атом может приобрести или отдать часть своей энергии и перейти в другое квантовое состояние в результате взаимодействия с другими атомами или столкновений с электронами. Такие переходы называются ***безизлучательными***.

Теперь самое главное. В 1916 году А. Эйнштейн предсказал, что переход электрона в атоме с верхнего энергетического уровня на нижний может происходить под влиянием внешнего электромагнитного поля, частота которого равна собственной частоте перехода. Возникающее при этом излучение называют ***вынужденным*** или ***индуцированным***. Вынужденное излучение обладает удивительным свойством. Оно резко отличается от спонтанного излучения. В результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном атом испускает еще один фотон той же самой частоты, распространяющийся в том же направлении. На языке волновой теории это означает, что атом излучает электромагнитную волну, у которой частота, фаза, поляризация и направление распространения точно такие же, как и у первоначальной волны. В результате вынужденного испускания фотонов амплитуда волны, распространяющейся в среде, возрастает. С точки зрения квантовой теории, в результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном, частота которого равна частоте перехода, появляются два совершенно одинаковых фотона-близнеца.

Именно индуцированное излучение является физической основой работы лазеров.

На рис. 6.4.1 схематически представлены возможные механизмы переходов между двумя энергетическими состояниями атома с поглощением или испусканием кванта света.

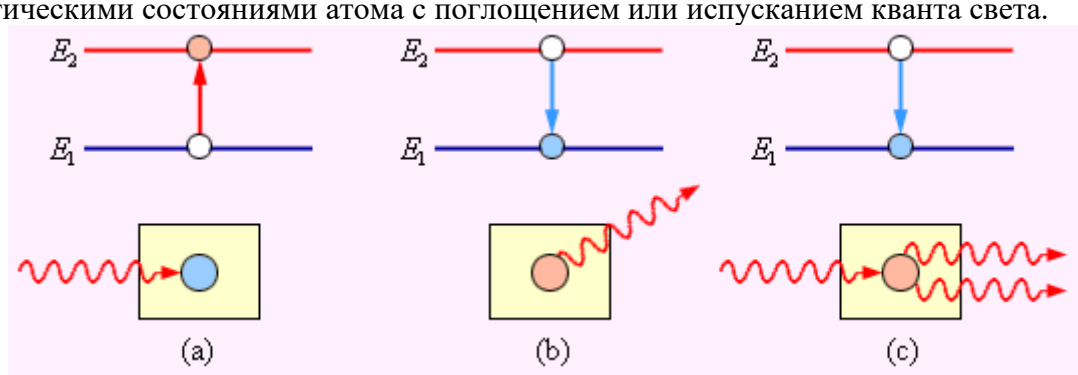


Рисунок 6.4.1.
Условное изображение процессов (a) поглощения, (b) спонтанного испускания и (c) индуцированного испускания кванта

Рассмотрим слой прозрачного вещества, атомы которого могут находиться в состояниях с энергиями E_1 и $E_2>E_1$. Пусть в этом слое распространяется излучение резонансной частоты перехода $\nu=\Delta E/h$. Согласно распределению Больцмана, при термодинамическом равновесии большее количество атомов вещества будет находиться в нижнем энергетическом состоянии. Некоторая часть атомов будет находиться и в верхнем энергетическом состоянии, получая необходимую энергию при столкновениях с другими атомами. Обозначим населенности нижнего и верхнего уровней соответственно через n_1 и $n_2<n_1$. При распространении резонансного излучения в такой среде будут происходить все три процесса, изображенные на рис. 6.4.1. Эйнштейн показал, что процесс (a) поглощения фотона невозбужденным атомом и процесс (c) индуцированного испускания кванта возбужденным атомом имеют одинаковые вероятности. Так как $n_2<n_1$ поглощение фотонов будет происходить чаще, чем индуцированное испускание. В результате прошедшее через слой вещества излучение будет ослабляться. Это напоминает появление темных ***фраунгоферовских линий*** в спектре солнечного излучения. Излучение, возникающее в результате спонтанных переходов, некогерентно, распространяется во всевозможных направлениях и не дает вклада в проходящую волну.

Чтобы проходящая через слой вещества волна усиливалась, нужно искусственно создать условия, при которых $n_2>n_1$, т. е. создать ***инверсную населенность уровней***. Такая среда

является термодинамически неравновесной. Идея использования неравновесных сред для получения оптического усиления впервые была высказана В. А. Фабрикантом в 1940 году. В 1954 году русские физики Н. Г. Басов и А. М. Прохоров и независимо от них американский ученый Ч. Таунс использовали явление индуцированного испускания для создания микроволнового генератора радиоволн с длиной волны λ=1,27 см. За разработку нового принципа усиления и генерации радиоволн в 1964 году все трое были удостоены Нобелевской премии.

Среда, в которой создана инверсная населенность уровней, называется ***активной***. Она может служить резонансным усилителем светового сигнала. Для того, чтобы возникала генерация света, необходимо использовать ***обратную связь***. Для этого активную среду нужно расположить между двумя высококачественными зеркалами, отражающими свет строго назад так, чтобы он многократно прошел через активную среду, вызывая лавинообразный процесс индуцированной эмиссии когерентных фотонов. При этом в среде должна поддерживаться инверсная населенность уровней. Этот процесс в лазерной физике принято называть ***накачкой***.

Начало лавинообразному процессу в такой системе при определенных условиях может положить случайный спонтанный акт, при котором возникает излучение, направленное вдоль оси системы. Через некоторое время в такой системе возникает стационарный режим генерации. Это и есть лазер. Лазерное излучение выводится наружу через одно (или оба) из зеркал, обладающее частичной прозрачностью. На рис. 6.4.2 схематически представлено развитие лавинообразного процесса в лазере.

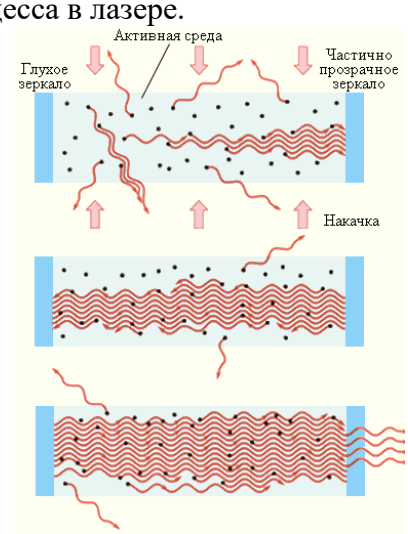


Рисунок 6.4.2.
Развитие лавинообразного процесса генерации в лазере

Существуют различные способы получения среды с инверсной населенностью уровней. В рубиновом лазере используется оптическая накачка, атомы возбуждаются за счет поглощения света. Но для этого недостаточно только двух уровней. Каким бы мощным не был свет лампы-накачки, число возбужденных атомов не будет больше числа невозбужденных. В рубиновом лазере накачка производится через выше расположенный третий уровень (рис. 6.4.3).

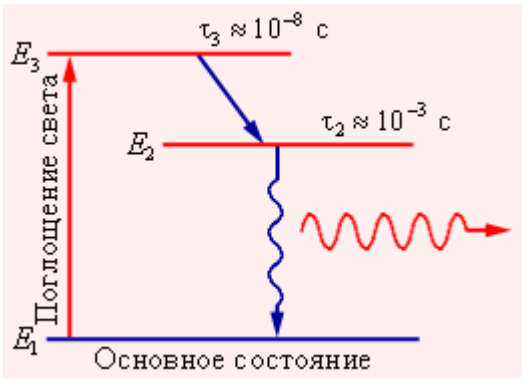


Рисунок 6.4.3.

Трехуровневая схема оптической накачки. Указаны «времена жизни» уровней Е2 и Е3. Уровень Е2 – метастабильный. Переход между уровнями Е3 и Е2 безызлучательный. Лазерный переход осуществляется между уровнями Е2 и Е1. В кристалле рубина уровни Е1, Е2 и Е3 принадлежат примесным атомам хрома

После вспышки мощной лампы, расположенной рядом с рубиновым стержнем, многие атомы хрома, входящего в виде примеси в кристалл рубина (около 0,05 %), переходят в состояние с энергией E_3, а через промежуток $\tau \approx 10^{-8}$ с они переходят в состояние с энергией E_2. Перенаселенность возбужденного уровня E_2 по сравнению с невозбужденным уровнем E_1 возникает из-за относительно большого времени жизни уровня E_2.

Лазер на рубине работает в импульсном режиме на длине волны 694 мм (темно-вишневый свет), мощность излучения может достигать 10^6-10^9 Вт в импульсе. Исторически это был первый действующий лазер, построенный американским физиком Т. Майманом в 1960 г.

Высокая монохроматичность и когерентность лазерного излучения обеспечивают успешное применение лазеров в спектроскопии, инициировании химических реакций, в разделении изотопов, в системах измерения линейных и угловых скоростей, во всех приложениях, основанных на использовании интерференции, в системах связи и светолокации. Особо следует, очевидно, выделить применение лазеров в голографии.

Высокая плотность энергии и мощность лазерных пучков, возможность фокусировки лазерного излучения в пятно малых размеров используются в лазерных системах термоядерного синтеза, в таких технологических процессах, как лазерная резка, сварка, сверление, поверхностное закаливание и размерная обработка различных деталей. Эти же свойства и направленность лазерного излучения обеспечивают успешное применение лазеров в военной технике.

Направленность лазерного излучения, его малая расходимость применяются при провешивании направлений (в строительстве, геодезии, картографии), для целенаведения и целеуказания, в локации, в том числе и для измерения расстояний до искусственных спутников Земли, в системах связи через космос и подводной связи.

С созданием лазеров произошел колоссальный прогресс в развитии нелинейной оптики, исследовании и использовании таких явлений, как генерация гармоник, самофокусировка световых пучков, многофотонного поглощения, различных типов рассеивания света, вызванных полем лазерного излучения.

Лазеры успешно используются в медицине: в хирургии (в том числе хирургии глаза) и терапии различных заболеваний, в биологии, где фокусировка в малое пятно позволяет действовать на отдельные клетки или даже на их части.

Вопросы для закрепления:

1. Дайте подробное описание опыта Франка и Герца
2. Чему равна длина волны де-Бройля?
3. Каким образом обнаруживаются волновые свойства частиц?
4. Что такое лазер?

5. Расскажите о самопроизвольном и вынужденном излучении атомов
6. Объясните принцип действия рубинового лазера.

56. Атомное ядро. Нуклонная модель ядра. Энергия связи нуклонов в ядре. Удельная энергия связи.

Сразу же после того, как в опытах Чедвика был открыт нейтрон, советский физик Д. Д. Иваненко и немецкий ученый В. Гейзенберг в 1932 г. предложили протонно-нейтронную модель ядра. Она была подтверждена последующими исследованиями ядерных превращений и в настоящее время является общепризнанной.

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: $\boxed{A=Z+N.}$ (1)

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

Изотопы представляют собой ядра с одним и тем же значением но с различными массовыми числами A, т. е. с различными числами нейтронов N.

Ядерные силы.

Так как ядра весьма устойчивы, то протоны и нейтроны должны удерживаться внутри ядра какими-то силами, причем очень большими. 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 короткодействие. 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 α-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.

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 частии.

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 удается. Выполнить соответствующие расчеты можно, лишь применяя соотношение Эйнштейна между массой и энергией:

$$E = mc^2. \qquad (2)$$

Точнейшие измерения масс ядер показывают, что масса покоя ядра М21 всегда меньше суммы масс входящих в его состав протонов и нейтронов:

$$M_я < Zm_p + Nm_n. \qquad (3)$$

Существует, как говорят, дефект масс:

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_я. \quad (4)$$

разность масс положительна. 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 Есв:

$$E_{св} = \Delta M c^2 = (Zm_p + Nm_n - M_я)c^2. \quad (5)$$

При образовании ядра из частиц последние за счет действия ядерных сил на малых расстояниях устремляются с огромным ускорением друг к другу. Излучаемые при этом γ-кванты как раз обладают энергией $E_{св}$ и массой $\Delta M = \frac{E_{св}}{c^2}$.

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.

Удельной энергией связи называют энергию связи, приходящуюся на один нуклон ядра. Ее определяют экспериментально. Из рисунка 13.11 хорошо видно, что, не считая самых легких ядер, удельная энергия связи примерно постоянна и равна 8 МэВ/нуклон. Отметим, что энергия связи электрона и ядра в атоме водорода, равная энергии ионизации, почти в миллион раз меньше этого значения. Кривая на рисунке 13.11 имеет слабо выраженный максимум.

Максимальную удельную энергию связи (8,6 МэВ/нуклон) имеют элементы с массовыми числами от 50 до 60, т. е. железо и близкие к нему но порядковому номеру элементы. Ядра этих элементов наиболее устойчивы.

У тяжелых ядер удельная энергия связи уменьшается за счет возрастающей с увеличением Z кулоновской энергии отталкивания протонов. Кулоновские силы стремятся разорвать ядро.

Частицы в ядре сильно связаны друг с другом. Энергия связи частиц определяется по дефекту масс.

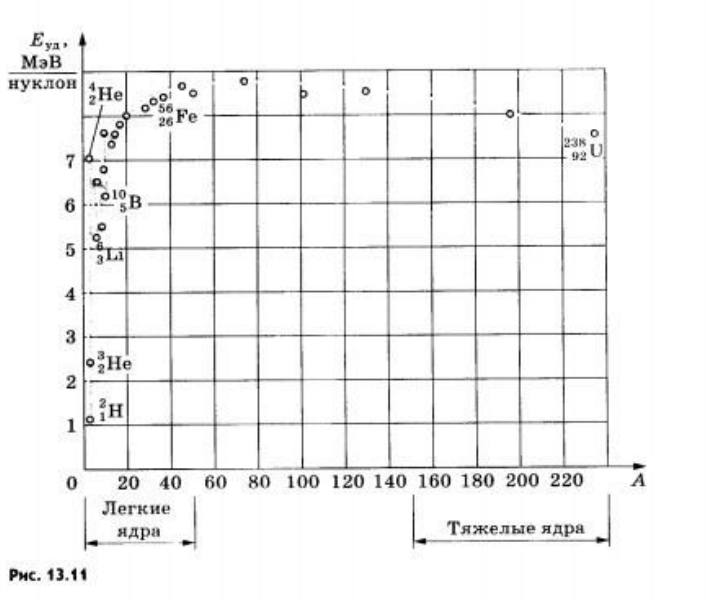


Рис. 13.11

Вопросы для закрепления:

1. Как связан в периодической системе Д. И. Менделеева порядковый номер элемента с зарядом его ядра?
2. Что называется массовым числом?
3. Как был открыт протон?
4. Каковы цели экспериментов Чедвика?
5. Что называют нуклонам и нуклидами?
6. Какие силы удерживают нуклоны в ядре?
7. Что называют дефектом массы?
8. Что характеризует энергия связи ядра?
9. Что называется удельной энергией связи?

57. Открытие явления естественной радиоактивности. Закон радиоактивного распада.

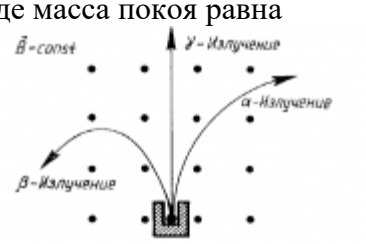
Радиоактивность.

1896 г. Французский физик А. Беккерель, изучая явление люминесценции солей урана, установил, что урановая соль испускает лучи неизвестного типа, которые проходят через бумагу, тонкие металлические пластины, ионизируют воздух.

1897-98 г. Мария Склодовская-Кюри и Пьер Кюри, исследуя урановые руды, обнаружили новые химические элементы: полоний, радий. Явление самопроизвольного превращения неустойчивых изотопов в устойчивые, сопровождающееся испусканием частиц и излучением энергии, называется естественной *радиоактивностью*. Все химические элементы, начиная с порядкового номера 83, являются радиоактивными.

1898 г. подвергая радиоактивное излучение действию магнитного поля, Э. Резерфорд выделил два вида лучей: α-лучи – тяжелые положительно заряженные частицы (ядра атомов гелия) и b-лучи – легкие отрицательно заряженные частицы (тождественны электронам).

В 1900 г. П. Виллард открыл гамма-лучи – нейтральное излучение, где масса покоя равна нулю (аналогично свойствам света, но $\nu_\gamma >> \nu_\alpha$). После установления Резерфордом структуры атома стало ясно, что радиоактивность



представляет собой ядерный процесс.1902 г. Э. Резерфорд и Ф. Содди доказали, что в результате радиоактивного распада происходит превращение атомов одного химического элемента в атомы другого химического элемента, сопровождаемое испусканием различных частиц и сформулировали правила смещения.

Закон радиоактивного распада.

Закон радиоактивного распада установлен Ф. Содди.

Опытным путем Э. Резерфорд установил, что активность радиоактивного распада убывает с течением времени. Для каждого радиоактивного вещества существует интервал времени, на протяжении которого активность убывает в 2 раза, т. е. *период полураспада T* данного вещества. Например, для ядра $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ период T=1600 лет. Следовательно, если взять 1г Ra, через 1600 лет его будет ½ г, а через 3200 лет – ¼ г. Таким образом, исходное количество радия должно обратится в нуль спустя бесконечный промежуток времени.

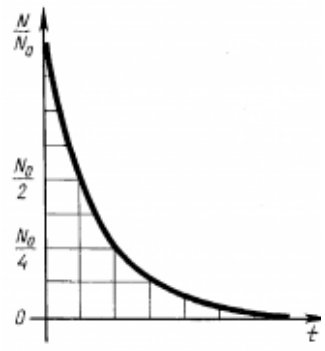
Математическое выражение

Пусть число радиоактивных атомов N_0, время $t=0$.

Через $t_2=T$ число нераспавшихся ядер $N=N_0/2$

Через $t_2=2T$ останется $N=N_0/2^2$,

Через $t_3=3T$ таких ядер окажется $N=N_0/2^3$ и т. д.



Следовательно, в конце промежутка времени $t=nT$ нераспавшихся ядер останется $N=N_0/2^n$. Так как $n=t/T$, то $\mathbf{N = N_0 \cdot 2^{\frac{t}{T}}}$. Это закон, которому подчиняется распад большого количества радиоактивных ядер.

У радиоактивных элементов T имеет различную величину, например, $^{232}_{90}\mathrm{Th}$ имеет период полураспада T=1,4.10^{10} лет, а у криптона $^{94}_{36}\mathbf{Kr}$ период полураспада $T=1,4$ с. У искусственно созданных элементов с Z>100 период полураспада составляет сотые и тысячные доли секунды.

$$\mathbf{N = N_0 \cdot 2^{\frac{t}{T}}}$$

Вопросы для закрепления:

1. В чем важность эксперимента Беккереля?
2. Каков состав радиоактивного излучения?
3. Что такое α-распад?
4. Как понимают β-распад?
5. Каков механизм γ-распада?
6. Какому закону подчиняется радиоактивный распад атомных ядер?
7. В чем смысл закона радиоактивного распада?

58. Искусственная радиоактивность. Деление тяжелых ядер. Ядерная энергетика. Термоядерные реакции.

В 1934 г. Ирен Жолио-Кюри и Фредерик Жолио-Кюри обнаружили, что некоторые легкие элементы – бор, магний, алюминий – при бомбардировке их α-частицами полония испускают позитроны. Эмиссия начиналась не сразу же после сближения источника α-частиц

и испытываемых образцов легких металлов, а увеличивалась постепенно по мере облучения и достигала некоторой предельной величины. После удаления источника α-частиц эмиссия позитронов не прекращалась, а начинала спадать экспоненциально во времени, как это происходит с активностью радиоактивного вещества. Период полураспада составил для бора 14 мин., для алюминия – 3 мин. 15 с, для магния – 2,5 мин. Выделив радиоактивные продукты из облучаемого вещества, И. Жолио-Кюри и Ф. Жолио-Кюри исследовали их химическую природу.

О результатах исследований они сообщили в заметке, представленной в «Comptes Rendus» Парижской академии наук и лондонский журнал «Nature» в январе 1934 г.

Наблюдаемое явление Ирен и Фредерик Жолио-Кюри объяснили тем, что под влиянием бомбардировки ядер легких элементов α-частицами вначале образуются новые искусственные ядра, которые затем распадаются с испусканием позитрона. В случае алюминия процесс протекает в два этапа. На первом этапе образуется радиофосфор ${}^{30}_{15}\mathrm{P}$:

$$ {}^{27}_{13}\mathrm{A}\ell + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}. $$

Искусственно полученный изотоп фосфора – радиофосфор ${}^{30}_{15}\mathrm{P}$ – неустойчив (период полураспада 3 мин. 15 с) и распадается с образованием стабильного ядра атома ${}^{30}_{14}\mathrm{Si}$, испуская позитрон:

$$ {}^{30}_{15}\mathrm{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\mathrm{Si} + \mathrm{e}^{-}. $$

Аналогичные процессы происходят при облучении α-частицами ядер бора и магния с образованием в первом случае радиоазота ${}^{13}_{7}\mathrm{N}$, а во втором – радиокремния ${}^{27}_{14}\mathrm{Si}$.

Результаты, полученные И. и Ф. Жолио-Кюри, открыли новую обширную область для исследований. Их эксперименты показали путь превращения стабильных элементов в радиоактивные, излучающие энергию.

В течение нескольких месяцев были получены более пятидесяти новых радиоактивных элементов, дополнительно к тем тридцати, которые существуют в земной коре.

Ф. Жолио-Кюри предсказал процессы, способные привести к выделению громадных запасов атомной энергии. 12 декабря 1935 г. в своем выступлении при вручении ему Нобелевской премии он сказал: «Если заглянем в прошлое, и охватим взглядом прогресс науки, который продолжается все более и более нарастающими темпами, мы получим право думать, что исследователи, которые создают или разрушают элементы по своему желанию, сумеют добиться превращений, имеющих характер взрыва, добиться настоящих цепных реакций. Если мы сможем осуществить подобные превращения, то удастся высвободить огромное количество энергии, которую можно будет использовать. Если цепная реакция распространится на все элементы нашей планеты, мы должны предвидеть последствия подобного катаклизма. Астрономы иногда отмечают, что яркость какой-нибудь звезды незначительной величины внезапно возрастает, что звезда, ранее невидимая невооруженным глазом, вдруг начинает ярко сверкать на небе, такое появление новой звезды, такое внезапное увеличение ее энергии является, возможно, следствием превращений, имеющих характер взрыва. Исследователи, бесспорно, попытаются воспроизвести этот процесс, приняв, мы надеемся, необходимые меры предосторожности».

До открытия Отто Ганом и Фрицем Штрассманом искусственного распада (деления) урана оставалось три года.

Естественный уран состоит в основном из двух изотопов: ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ и ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$. Но изотоп ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ составляет всего 1/140 долю от более распространенного изотопа ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$.

Ядра ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ и делятся под влиянием как быстрых, так и медленных нейтронов. Ядра же ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$ могут делиться лишь под влиянием нейтронов с энергией более 1 МэВ. Такую энергию имеют примерно 60% нейтронов, появляющихся при делении. Однако примерно лишь один

нейтрон из пяти производит деление $^{238}_{92}U$. Остальные нейтроны захватываются этим изотопом, не производя деления. В результате цепная реакция с использованием чистого изотопа $^{238}_{92}U$ невозможна.

Образование плутония. Важное значение имеет не вызывающий деления захват нейтронов ядрами изотопа урана $^{238}_{92}U$. После захвата образуется радиоактивный изотоп $^{239}_{92}U$ с периодом полураспада 23 мин. Распад происходит с испусканием электрона и антинейтрино и возникновением первого трансуранового элемента – нептуния:

$$^{239}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{93}Np + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\tilde{\nu}_e .$$

Нептуний β-радиоактивен с периодом полураспада около двух дней. В процессе распада нептуния образуется следующий трансурановый элемент – плутоний:

$$^{239}_{93}Np \rightarrow {}^{239}_{94}Pu + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\tilde{\nu}_e .$$

Плутоний относительно стабилен, так как его период полураспада велик – порядка 24 000 лет. Важнейшее свойство плутония состоит в том, что он делится под влиянием медленных нейтронов, так же как и изотоп $^{235}_{92}U$. Поэтому с помощью плутония также может быть осуществлена цепная реакция, которая сопровождается выделением громадной энергии.

Цепная реакция деления возможна благодаря тому, что при делении ядер испускается два-три нейтрона. Большая часть выделяемой энергии приходится на кинетическую энергию осколков делящихся ядер.

Ядерный реактор – устройство, предназначенное для организации управляемой самоподдерживающейся цепной реакции деления, которая всегда сопровождается выделением энергии.

Первый ядерный реактор построен и запущен в декабре 1942 года в США под руководством Э. Ферми. Первым реактором, построенным за пределами США, стал ZEEP, запущенный в Канаде 5 сентября 1945 года. В Европе первым ядерным реактором стала установка Ф-1, заработавшая 25 декабря 1946 года в Москве под руководством И. В. Курчатова.

Схема ядерного реактора приведена на рис. 1. Основная часть – активная зона, где сосредоточено ядерное горючее, протекает цепная реакция деления и выделяется энергия. Активная зона имеет обычно цилиндрическую конфигурацию, объём её в зависимости от назначения и возможностей конструктивного воплощения – от долей литра до многих кубометров. Количество горючего, необходимое для поддержания управляемой цепной реакции, – критическая масса – от сотен грамм до нескольких тонн. При загрузке ядерного реактора ядерное горючее превышает критическую массу на величину, соответствующую запасу на выгорание. Ядерное горючее размещается, как правило, внутри тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов),количество которых в активной зоне может достигать многих десятков тысяч.

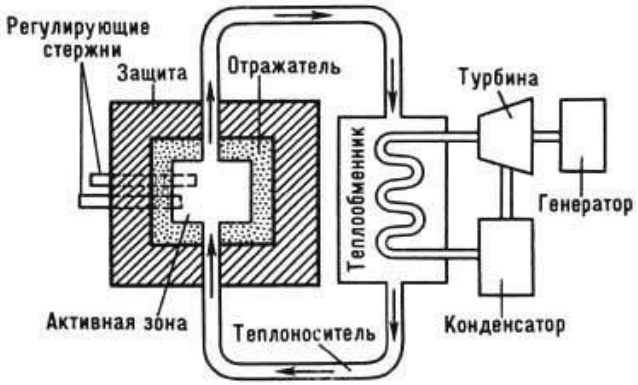


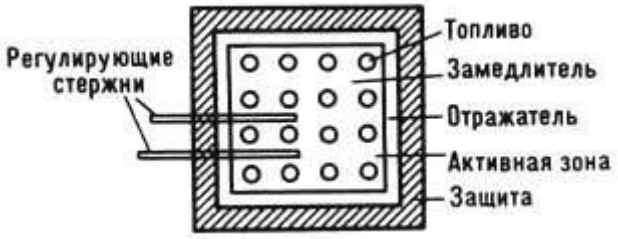
Рис. 1. Схема ядерного реактора.

Через активную зону прокачивается теплоноситель, который омывает ТВЭЛы и уносит выделяющееся в них тепло. Наличие теплоносителя в активной зоне, а также большого количества конструкционных материалов в условиях разветвлённой теплопередающей поверхности не препятствует протеканию цепной реакции. Это существенно облегчает технические проблемы теплосъёма по сравнению, например, с реакторами синтеза, где внесение посторонних веществ в зону протекания ядерной реакции недопустимо.

В состав активной зоны многих ядерных реакторов входит ***замедлитель*** – вещество с малым атомным весом, которое служит для снижения первоначальной энергии нейтронов деления (быстрых нейтронов) за счёт их упругого рассеяния. В результате многократных соударений с ядрами замедлителя нейтроны теряют свою энергию, пока не войдут в тепловое равновесие со средой. Энергетическое распределение таких нейтронов (т. н. тепловых) близко к максвелловскому с максимумом при комнатной температуре около 0,025 эВ. В активной зоне ядерного реактора размещаются также подвижные стержни или кассеты с интенсивно поглощающим нейтроны веществом (B, Cd, Eu), предназначенные для регулирования цепной реакции деления.

Активная зона окружена отражателем, снижающим утечку нейтронов наружу и соответственно позволяющим уменьшить величину критической массы. Материал отражателя обычно тот же самый замедлитель. В случае реактора-размножителя в отражателе помещается обеднённый или природный уран и, как и в активной зоне, происходит накопление ^{239}Pu.

Вокруг отражателя размещается радиационно-биологическая защита, состоящая из бетона и др. материалов, предназначенная для снижения интенсивности ядерного излучения снаружи до допустимого уровня. Радиоактивный первичный контур теплоносителя также размещается внутри бетонной защиты.



Термоядерная реакция

Реакция слияния легких ядер при очень высокой температуре, сопровождающаяся выделением энергии, называется термоядерной реакцией.

Для слияния необходимо, чтобы расстояние между ядрами приблизительно было равно 10-12 см. Однако этому препятствуют кулоновские силы. Они могут быть преодолены при большой кинетической энергии. Особенно большое практическое значение имеет тот факт, что при этой реакции на каждый нуклон выделяется намного больше энергии, чем при

ядерной реакции, например, при синтезе ядра гелия из ядер водорода выделяется энергия, равная 6 МэВ, а при делении ядра урана $^{235}_{92}U$ на один нуклон приходится ≈0,9 МэВ.
Пример термоядерной реакции:

$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \longrightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n .$$

В этом случае выделяется энергия, равная 17,6 МэВ.
Управляемая термоядерная реакция – энергетически выгодная реакция. Может идти при больших температурах (порядка несколько сотен млн. градусов). При большой плотности вещества такая температура может быть достигнута путем создания в плазме мощных электронных разрядов. ***Проблема:*** *трудно удержать плазму.*
Самоподдерживающиеся термоядерные реакции происходят в звездах. В настоящее время в ряде стран ведутся работы по осуществлению управляемой термоядерной реакции.

Вопросы для закрепления:

1. Каковы главные особенности ядерных сил?
2. Что называют энергией связи ядра?
3. Почему ядро меди более устойчиво, чем ядро урана?
4. От чего зависит коэффициент размножения нейтронов?
5. Какие изотопы урана используются для осуществления цепной ядерной

59. Вглубь материи: от атома к кваркам. Современная научная картина мира. Проблемы элементарных частиц.

Кварки появились в 1964 году как чисто математические объекты, которые помогали систематизировать известные элементарные частицы и даже предсказывать новые. Например, кварковая модель предсказала существование омега-гиперона, который и был обнаружен. Это открытие сильно укрепило доверие к кварковой модели. Затем началась охота за самими кварками. В 1969 году в Стэнфорде (США) был поставлен эксперимент, удивительно напоминавший классический эксперимент Резерфорда, выполненный еще в начале века. Резерфорд, изучая закономерность рассеяния альфа-частиц, проходящих через вещество, установил, что внутри атома находится ядро, содержащее почти всю атомную массу. Аналогичный эксперимент стэнфордской группы, изучавшей рассеяние высокоэнергичных электронов на протоне, привел их к выводу, что внутри протона содержатся объекты намного меньшего размера. Так впервые была показана реальность существования кварков. В последующих более тонких экспериментах удалось поближе познакомиться с этой новой матрешкой микромира. Некоторые ее свойства оказались очень и очень необычными.

Необычные свойства обычных кварков.

Сейчас нам известны кварки пяти видов. Их обозначают буквами u, d, s, c, b (от английских up – вверх, down – вниз, strange – странность, charm – очарование, beauty – красота). Есть основания полагать, что существует шестой кварк t (от truth – истина). Отличаются кварки друг от друга тем же, чем и обычные частицы, – зарядом и массой.

Первая необычность кварков как раз связана с их электрическим зарядом. У всех наблюдавшихся частиц заряды кратны заряду протона (хотя мы и не знаем, почему это так). У кварков же заряды оказались дробными: заряд u-, c- и t-кварков равен + 2/3, а заряд d-, s- и b-кварков равен -1/3 протонного заряда.

Вторая необычность состоит в том, что кварки не наблюдаются в свободном виде. Сейчас хорошо известно, что каждый барион состоит из трех кварков, а мезон – из двух (точнее, из кварка и антикварка). Однако все попытки экспериментаторов разбить хотя бы одну частицу на составляющие ее кварки до сих пор остаются безуспешными. Такое сильно развитое чувство коллективизма у кварков доставило немало хлопот теоретикам.

Действительно, создать теорию, в которой элементарная частица построена из кварков, но при этом исключается сама возможность отделить один кварк от остальных, совсем непросто. Эти трудности теоретиков получили даже свое название – проблемы конфайнмента (confinement означает по-английски заключение в тюрьму, заточение). И сказать, что физикам удалось разумно объяснить причину вечного заточения кварков внутри элементарных частиц, было бы большим преувеличением.

Научная картина мира это – множество теорий в совокупности описывающих известный человеку природный мир, целостная система представлений об общих принципах и законах устройства мироздания. Поскольку картина мира это системное образование, ее изменение нельзя свести ни к какому единичному, пусть и самому крупному и радикальному открытию. Как правило, речь идет о целой серии взаимосвязанных открытий, в главных фундаментальных науках. Эти открытия почти всегда сопровождаются радикальной перестройкой метода исследования, а так же значительными изменениями в самих нормах и идеалах научности.

Таких четко и однозначно фиксируемых радикальных смен научной картины мира, научных революций в истории развития науки можно выделить три, обычно их принято персонифицировать по именам трех ученых сыгравших наибольшую роль в происходивших изменениях.

Аристотелевская (VI-IV века до нашей эры) в результате этой научной революции возникла сама наука, произошло отделение науки от других форм познания и освоения мира, созданы определенные нормы и образцы научного знания. Наиболее полно эта революция отражена в трудах Аристотеля. Он создал формальную логику, т.е. учение о доказательстве, главный инструмент выведения и систематизации знания, разработал категориально понятийный аппарат. Он утвердил своеобразный канон организации научного исследования (история вопроса, постановка проблемы, аргументы за и против, обоснование решения), дифференцировал само знание, отделив науки о природе от математики и метафизики

Ньютоновская научная революция (XVI-XVIII века), Ее исходным пунктом считается переход от геоцентрической модели мира к гелиоцентрической, этот переход был обусловлен серией открытий, связанных с именами Н. Коперника, Г. Галилея, И. Кеплера, Р. Декарта, И. Ньютон, подвел итог их исследованиям и сформулировал базовые принципы новой научной картины мира в общем виде. Это основные изменения:

Классическое естествознание заговорило языком математики, сумело выделить строго объективные количественные характеристики земных тел (форма величина, масса, движение) и выразить их в строгих математических закономерностях.

Наука Нового времени нашла мощную опору в методах экспериментального исследования, явлений в строго контролируемых условиях.

Естествознания этого времени отказалось от концепции гармоничного, завершенного, целесообразно организованного космоса, по их представления Вселенная бесконечна и объединена только действием идентичных законов.

Доминантой классического естествознания, становится механика, все соображения, основанные на понятиях ценности, совершенства, целеполагания, были исключены из сферы научного поиска.

В познавательной деятельности подразумевалась четкая оппозиция субъекта и объекта исследования. Итогом всех этих изменений явилась механистическая научная картина мира на базе экспериментально математического естествознания.

Эйнштейновская революция (рубеж XIX-XX веков). Ее обусловила сери открытий (открытие сложной структуры атома, явление радиоактивности, дискретного характера электромагнитного излучения и т.д.). В итоге была подорвана, важнейшая предпосылка механистической картины мира – убежденность в том, что с помощью простых сил действующих между неизменными объектами можно объяснить все явления природы.

Фундаментальные основы новой картины мира:

- Общая и специальная теория относительности (новая теория пространства и времени привела к тому, что все системы отсчета стали равноправными, поэтому все наши представления имеют смысл только в определенной системе отсчета. Картина мира приобрела релятивный, относительный характер, видоизменились ключевые представления о пространстве, времени, причинности, непрерывности, отвергнуто однозначное противопоставление субъекта и объекта, восприятие оказалось зависимым от системы отсчета, в которую входят и субъект и объект, способа наблюдения и т.д.).
- Квантовая механика (она выявила вероятностный характер законов микромира и неустранимый корпускулярно-волновой дуализм в самых основах материи). Стало ясно, что абсолютно полную и достоверную научную картину мира не удастся создать никогда, любая из них обладает лишь относительной истинностью.

Позднее в рамках новой картины мира произошли революции в частных науках в в космологии (концепция не стационарной Вселенной), в биологии (развитие генетики), и т.д. Таким образом, на протяжении XX века естествознание очень сильно изменило свой облик, во всех своих разделах.

Три глобальных революции предопределили три длительных периода развития науки, они являются ключевыми этапами в развитии естествознания. Это не означает, что лежащие между ними периоды эволюционного развития науки были периодами застоя. В это время тоже совершались важнейшие открытия, создаются новые теории и методы, именно в ходе эволюционного развития накапливается материал, делающий неизбежной революцию. Кроме того, между двумя периодами развития науки разделенными научной революцией, как правило, нет неустранимых противоречий, согласно сформулированному Н. Бором, принципу соответствия, новая научная теория не отвергает полностью предшествующую, а включает ее в себя в качестве частного случая, то есть устанавливает для нее ограниченную область применения. Уже сейчас, когда с момента возникновения новой парадигмы не прошло и ста лет многие ученые высказывают предположения о близости новых глобальных революционных изменений в научной картине мира.

В современной физике элементарных частиц специалисты выделяют ряд нерешённых проблем.

Экспериментально установленное явление нейтринных осцилляций указывает на неполноту Стандартной модели. Кроме того, имеются отдельные экспериментальные свидетельства того, что имеется разница в амплитуде осцилляций нейтрино и антинейтрино.

Астрофизические и космологические исследования указывают на существование физики за пределами Стандартной модели. Так, наблюдательным фактом является барионная асимметрия Вселенной, в то время как в Стандартной модели барионное число является константой. Другим фактом является наличие в космосе так называемой скрытой массы, которая обычно объясняется существованием тёмной материи неизвестной современной физике природы. И наконец, необъяснимым в рамках современной физики является факт ускоренного расширения Вселенной, который обычно связывают с так называемой тёмной энергией.

Отдельно стоит так называемая проблема калибровочной иерархии, заключающаяся в том, что характерные энергетические масштабы сильного (200 МэВ) и электрослабого (256 ГэВ) взаимодействий на много порядков ниже масштаба гравитационного взаимодействия (1019 ГэВ), а также предполагаемых масштаба Большого объединения взаимодействий (1016 ГэВ) и масштаба, связанного с CP-сохранением в сильных взаимодействиях (1014 ГэВ). Актуальными являются вопросы природы такой иерархии, причин её устойчивости и наличия большой «пустыни» между двумя группами масштабов.

Ещё одна иерархическая проблема связана с фермионными массами. В рамках Стандартной модели все фермионные поля (лептоны и кварки) образуют три поколения. При этом массы поколений отличаются во много раз, хотя остальные свойства частиц разных

поколений не отличаются. Объяснение такой иерархии и составляет одну из проблем современной физики.

Имеются также теоретические трудности в описании адронов. В частности для понимания природы конфайнмента требуется привлечение непертурбативных методов квантовой хромодинамики.

Вопросы для закрепления:

1. Что называется элементарной частицей?
2. Можно ли считать, что нейтрон состоит из протона, электрона и нейтрино?
3. В чем заключается явление аннигиляции пары частица-античастица?
4. Какой смысл вкладывается в понятие обменное взаимодействие?
5. Как из кварков строятся адроны?
6. Какие частицы служат переносчиками сильного взаимодействия между кварками?

60. Звезды и Солнце. Планеты и малые тела солнечной системы.

Звезды.



Как определяют размер звезды?

Даже невооруженным глазом можно увидеть, что звезды разного цвета. По цвету можно определить их температуру. Красный – это цвет наиболее холодных звезд, затем идут желтые и белые, а самые горячие голубоватого цвета. Температура красных звезд «всего» 3000 градусов, а голубых достигает 35 000 градусов. При температуре поверхности 5800 градусов наше солнце является желтой звездой. Что бы определить размер звезды, астрономы сравнивают ее цвет и силу излучения. Если красная звезда кажется очень яркой, значит у нее очень большой диаметр поверхности. И наоборот, если голубая звезда имеет такую же мощность излучения как красная, то ее размер должен быть гораздо меньше, чем красной.

Что такое звезды-гиганты и звезды-карлики?

Астрономы установи, что среди звезд встречаются гиганты и карлики. Самые большие из них – красные гиганты, которые несмотря на свое слабое излучение с квадратного метра поверхности, светят в 50 000 раз мощнее солнца. Но существует огромное количество звезд карликов. Это в основном красные карлики с диаметром в половину или даже одну пятую диаметра нашего солнца. Особое место среди звезд занимают белые карлики. Вещество, из которого они состоят, такое плотное, что вся солнечная масса могла бы вместиться в объем земного шара. Это, конечно, особое вещество. Спичечный коробок из него весил бы три тонны. Так как белые карлики очень горячие, то несмотря на свою маленькую поверхность, они чрезвычайно яркие. Только поэтому нам удалось их обнаружить.

Звездные скопления.

Звезды в пространстве галактики распределяются довольно равномерно. Но некоторые из них скапливаются в определенных местах. Самым известным из звездных скоплений являются плеяды в созвездии тельца. Невооруженным глазом можно различить семь звезд, однако в телескоп мы видим 230. в окрестностях солнца известно около 1500 звездных скоплений, а во всей галактике их, вероятно, десятки тысяч. Конечно, звезды не стоят на одном месте: они движутся в пространстве со скоростями от 10 до 500 километров в секунду. Например, солнце движется со скоростью 20 км/с по направлению к Веге. Однако, взаимных столкновений звезд можно не опасаться. Даже за миллиарды лет звезды вряд ли так приблизятся друг к другу чтобы столкнуться.

Двойные звезды.

Солнце является одиночной звездой. Но иногда две или несколько звезд расположены близко друг к другу и обращаются одна вокруг другой. Их называют двойными или кратными звездами. Их в галактике очень много. Так, у звезды Мицар в созвездии Большой Медведицы есть спутник – Алькор. Некоторые двойные звезды повернуты к Земле ребром плоскости своей орбиты и одна звезда регулярно затмевает другую. При этом общая яркость звезд ослабевает. Мы воспринимаем это как перемену блеска звезды. Например, «дьявольская звезда» Алголь в созвездии Персея с древних времен известна как переменная звезда. Каждые 69 часов, – таков период обращения этих звезд, – происходит затмение яркой звезды ее более холодным и менее ярким соседом. С земли это смотрится как уменьшение ее блеска. Через десять часов звезды расходятся и яркость системы снова становится максимальной.

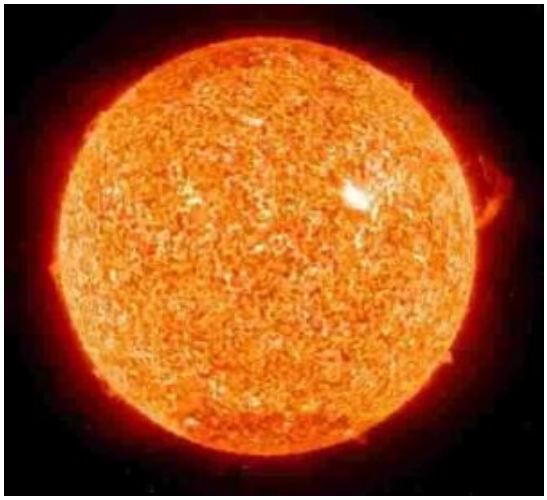
Сверхновая.

Каждая крупная звезда в конце своего существования переживает катастрофу. Когда запас ее ядерного топлива подходит к концу, перестает гореть ядерная «печь» в центре звезды давление, которое поддерживала равновесие в огромном газовом шаре, уменьшается. Тогда ядро звезды буквально в считанные секунды сжимается и превращается в нейтронную звезду. При этом мгновенно освобождается огромный поток энергии, он срывает внешнюю газовую оболочку звезды, которая, ярко вспыхнув, исчезает в глубинах Вселенной. В момент вспышки звезда на несколько дней становится ярче сотен миллиардов обычных звезд целой галактики. С Земли кажется, что загорается новая звезда, которая в течении нескольких недель может быть настолько яркой, что ее видно и днем. Это раньше принимали за рождение новой звезды, поэтому назвали его по-латински «Nova» («новая»). При взрыве гигантских звезд говорят о «сверхновой». За один день сверхновая излучает энергию, равную излучению солнца за 1 миллиард лет, а вещество ее оболочки выбрасывается в пространство с огромной скоростью – до 10 000 км/с.

Как часто вспыхивают сверхновые?

Поскольку гигантских звезд в нашей галактике мало, за всю историю человечества наблюдалось только несколько вспышек сверхновых: в 185, 394, 1006, 1054, 1181, 1572 и 1604 годах. В нашей галактике вспышка сверхновой происходит в среднем раз в 300 лет. Последнюю наблюдал и подробно описал немецкий астроном Иоганн Кеплер в 1604 году. Это был почти 400 лет назад, так что, возможно, скоро появится еще одна сверхновая.

Солнце.



Диаметр: 1 390 000 км (в 109 раз больше диаметра Земли!)
Период вращения вокруг своей оси: около 26 дней
Удаленность от Земли: 150 миллионов километров
Свет Солнца доходит до нас: за 8 минут 20 секунд
Температура на поверхности: +6000 С

Из чего состоит Солнце?

Солнце на 72% состоит из водорода, а остальное – гелий. Эти газы очень легкие, но если вспомнить, что солнце весит столько же, сколько 333 000 наших планет, то можно себе представить какова их концентрация. Рассмотрим газовую оболочку солнца. Она очень разрежена и имеет толщину не более 100 км. Она давит на лежащий под ней слой. Раз она не падает, то есть сила, которая уравновешивает это давление. Астрофизики полагают, что лежащий под внешним слой настолько горячий, что может выдержать давление внешней оболочки. Аналогично, что третий слой еще горячее. Температура внешнего слоя солнца составляет 5 900 градусов, значит температура ядра солнца достигает 15 000 000 градусов.

Почему солнце не охлаждается?

На протяжении последних 5 миллионов лет солнце не изменило ни свой размер ни мощность излучения. Почему так? А потому, что внутри солнца находится огромная печка, постоянно вырабатывающая энергию. При гигантских температурах солнца, движение ядер водорода становится очень интенсивным, они ударяются друг о друга и сливаются в более тяжелые ядра. В результате этой термоядерной реакции водород превращается в гелий и выделяется огромное количество энергии. Физики во многих лабораториях мира уже давно работают над мирной, управляемой термоядерной реакцией, такой же безопасной, как на солнце. Когда нам удастся «усмирить» реакции, мы получим неисчерпаемый и экологически чистый источник энергии, который может удовлетворить постоянно растущие потребности человечества в энергии.

Как возникает солнечный свет?

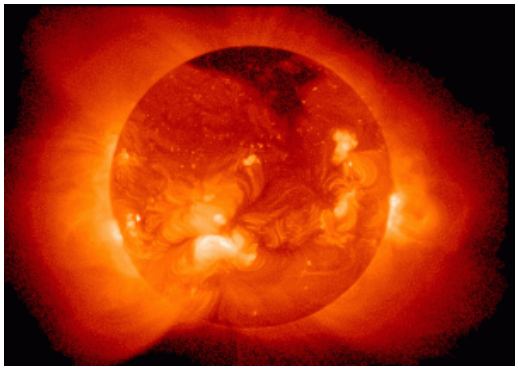
Когда энергия солнца выходит на поверхность, она, при температуре в 5 800 градусов, излучается в космическое пространство в виде света. К счастью, мы находимся на расстоянии 150 миллионов километров от солнца – этой гигантской печки. Поэтому лишь малая часть ее энергии в виде умеренного солнечного излучения согревает нашу планету и поддерживает на ней жизнь, давая свет и тепло.

Протуберанцы.

Протуберанцы – это огромные пылающие образования из водорода, которые взметаются высоко над поверхностью, образуя гигантские дуги. Высота этих дуг порой сопоставима с диаметром самого солнца. Протуберанцы поддерживаются на высоте благодаря световому давлению и электромагнитному полю. Их температура может достигать 25 000 градусов, а

протяженность до сотен тысяч километров. Название их произошло от греческого «protubero» – вздуваюсь.

Звезда смерти.



Сейчас Солнце – звезда, дающая жизнь, но придет день, и оно станет звездой, несущей смерть. Достигнув окончания срока своего существования, Солнце увеличится в размерах, что приведет к гибели вето живого на Земле. Однако это произойдет не раньше, чем через 5,5 миллиардов лет!

Общая характеристика планет-гигантов.

Среди 5 внешних планет планет-гигантов – 4.

Планеты-гиганты имеют много общего:

- основные химические элементы – водород и гелий (отличаются от планет земной группы);
- нет твердой поверхности (рыхлые);
- все они очень быстро вращаются вокруг своей оси и из-за быстрого вращения сильно сплюснуты;
- все имеют кольца и много спутников;
- на них всегда господствуют низкие температуры;
- все имеют значительные магнитные поля.

Из планет-гигантов лучше исследованы Юпитер и Сатурн.

Юпитер и Сатурн.

Юпитер – самая крупная планета Солнечной системы (Король планет). У нее 61 спутник, наиболее крупные из них Ганимед, Каллисто, Ио и Европа (Галилеевские спутники). В атмосфере наблюдаются устойчивые вихри огромного размера (Красное пятно). Энергия, излучаемая Юпитером, превосходит энергию, получаемую им от Солнца. Существуют гипотезы, что внутри планеты происходят термоядерные реакции. На Юпитере наблюдаются полярные сияния и грозы. На поверхности спутников Юпитера обнаружены кратеры диаметром до 400 км.

Сатурн имеет 32 спутника, самый крупный и примечательный из них Титан. Это самый крупный спутник планет в Солнечной системе, имеет атмосферу. Атмосфера Сатурна состоит почти полностью из водорода, гелия и азота. У Сатурна самые выразительные кольца, они были открыты первыми.

Уран, Нептун и Плутон.

Уран называют голубой планетой. Спутники Урана названы в честь героев шекспировских пьес. Один из интереснейших – Миранда. Ось вращения лежит в плоскости орбиты (Прилег отдохнуть). Вращение вокруг оси происходит в направлении обратном направлению вращения других планет (кроме Венеры).

Наиболее крупные спутники Нептуна – Тритон и Нереида. Нептун открыт на «кончике пера» в 1846 г. На Нептуне самые сильные ветры, чем на других планетах.

Плутон имеет спутник Харон, сравнимый с планетой по массе, поэтому вращение происходит вокруг общего центра масс, как в двойной системе. Плутон открыт «на кончике

пера». Орбита расположена так, что в перигелии Плутон подходит ближе к Солнцу, чем Нептун.

Меркурий. Самая близкая к Солнцу планета. Она вращается вокруг Солнца быстрее, чем вокруг своей оси. В связи с этим на Меркурии наблюдается интересный эффект – Солнце на небосклоне на некоторое время замирает. Астрономы называют это эффектом Иисуса Навина. Поверхность Меркурия покрыта кратерами, атмосферы как таковой нет, лишь остатки газовой оболочки говорят о том, что молекулы газов имели достаточную скорость и когда-то покинули планету. Температура на поверхности Меркурия колеблется от 400 °С днем до -150 °С ночью.

Венера. Её часто путают на небосклоне со звездами, так как это самое яркое светило после Солнца. Утренняя звезда – напоминание о том, что Венеру можно наблюдать только утром или только вечером в лучах Солнца (как и Меркурий). Атмосфера содержит преимущественно CO2. Из-за непрозрачности атмосферы для теплового излучения наблюдается сильный парниковый эффект. Давление атмосферы примерно в 100 раз больше, чем на Земле. Температура около 500 °С. Венера вращается вокруг своей оси под углом ≈ 90° к плоскости своей орбиты, поэтому смены времен года там нет. Вращение вокруг оси происходит в обратном направлении, так что Солнце восходит на западе, а заходит на востоке.

Марс. Имеет два спутника – Фобос и Деймос. Поверхность планеты представляет собой безжизненную пустыню с многочисленными кратерами метеоритного происхождения. На Марсе находится самая высокая гора среди гор планет Солнечной системы – это гора Олимп, ее высота около 27 км. Состав атмосферы: преобладание CO2 над другими газами. Атмосферное давление примерно в 100 раз меньше земного. Суточные колебания температуры – от 10 °С (летом в экваториальных областях) до -100 °С. Ни растительной, ни животной жизни на Марсе пока не обнаружено. Все новые данные, поступающие по этому вопросу, обязательно обсуждаются.

Вопросы для закрепления:

1. Чем отличаются планеты-гиганты от планет земной группы?
2. Укажите причины, по которым в атмосферах планет-гигантов бушуют сильные ветры?
3. Чем обусловлен голубой цвет Урана?
4. К чему относятся образования, сфотографированные АМС «Вояджер-1» и «Вояджер-2», у планет-гигантов: к их поверхностям или атмосферам? Ответ обоснуйте.
5. Есть ли смена времен года на Венере?
6. Почему на Земле трудно найти следы от ударов метеоритов?

61. Наша Галактика. Открытие других галактик. Строение звезд. Необратимость развития материального мира.

Млечный Путь – полоса туманного света, опоясывающая небо, которая образуется светом огромного количества звезд нашей Галактики.

В мифах и легендах многих народов мира его называли Дорогой Богов, таинственным Звездным Мостом, ведущим в райские кущи, волшебной Небесной Рекой, наполненной божественным молоком. Полагают, что именно он имелся в виду, когда старинные русские сказки говорили о молочной речке с кисельными берегами. А жители древней Эллады звали его Galaxias kuklos, что означает «молочный круг». Отсюда и происходит привычное сегодня



слово Галактика. Название «Галактика» (то же что и «Млечный Путь») происходит от греческого Γαλαξ?ας. Согласно древнегреческой легенде, Зевс решил сделать своего сына от смертной женщины Геракла бессмертным, и для этого подложил его спящей жене Гере, чтобы Геракл выпил божественного молока. Гера, проснувшись, увидела, что кормит не своего ребёнка, и оттолкнула его от себя. Брызнувшая из груди богини струя молока превратилась в Млечный Путь.

Млечный Путь – одна из многочисленных галактик Вселенной. Является спиральной галактикой с перемычкой типа SBbc по классификации Хаббла, и вместе с галактикой Андромеды (M31) и галактикой Треугольника (M33), а также несколькими меньшими галактиками-спутниками образует Местную группу, которая, в свою очередь, входит в Сверхскопление Девы.

Видимая полоса представляет собой рассматриваемый "изнутри" диск Галактики. Солнце в Галактике располагается ближе к краю, на расстоянии двух третей расстояния от центра галактического диска. Поэтому Млечный Путь кажется наиболее ярким в направлении балджа вокруг галактического центра, который лежит в созвездии Стрельца. Облака пыли затеняющей свет звезд, придавая Млечному Пути пятнистый вид.

В северном полушарии Млечный Путь пересекает созвездия Орла, Стрелы, Лисички, Лебедя, Цефея, Кассиопеи, Персея, Возничего, Тельца и Близнецов; в южном – Единорога, Кормы, Парусов, Южного Креста, Циркуля, Южного Треугольника, Скорпиона и Стрельца. В Стрельце находится галактический центр.

Предположение, что Млечный Путь скопище слабо светящих звезд, впервые высказал Демокрит (460-370, Др.Греция). Доказал это в декабре 1609 г Галилео Галилей (1564-1642, Италия), направив свой 32-х кратный телескоп на небо. В 2004 году группа астрономов, работающих на телескопе VLT в Чили, пришла к заключению, что наша Галактика имеет возраст 13 миллиардов 700 миллионов лет, плюс-минус 800 миллионов лет.

Открытие других галактик. В начале XX в. было доказано, что некоторые туманные пятна, видимые в телескоп в разных участках неба, находятся вне нашей Галактики и представляют собой *другие галактики,* каждая из которых, подобно нашей, состоит из многих миллиардов звезд. Огромные расстояния, отделяющие Солнечную систему от этих миров, почти лишают нас возможности видеть их невооруженным глазом. Зато телескоп раскрывает перед человеком поистине глубины Вселенной: крупнейшим современным телескопам доступна область Вселенной, в которой находятся *миллиарды галактик.* Исследованием мира галактик занимается *внегалактическая астрономия.* Подобно физике элементарных частиц, проникающей в тайны невидимого микромира, внегалактическая астрономия изучает разнообразные, очень далекие от нас, невидимые невооруженным глазом космические объекты безграничного мегамира, непрерывно расширяя наши представления о Вселенной.

Мы рассматриваем звезду как тело, подверженное действию разных сил. Сила тяготения стремится стягивать вещество звезды к центру, газовое же и световое давления, направленные изнутри, стремятся оттолкнуть его от центра. Так как звезда, как мы видим, существует как устойчивое тело, не сжимается заметно и не распухает, то, следовательно, между борющимися силами есть какое-то равновесие. Для этого температура разных слоев в звезде должна установиться такая, – и ее рассчитали, – чтобы в каждом слое поток энергии наружу уводил к поверхности всю энергию, возникающую под ним. При этом рассматривали два случая:

1) вся энергия производится в точечном центре звезды

2) энергия производится всей массой звезды, но меняется определенным образом от слоя к слою, в зависимости от его плотности и температуры.

Так нашли, что в центре Солнца температура составляет около 13 000 000, а плотность в 76 раз больше плотности воды. Вычислили и изменение этих величин по мере приближения к поверхности, а другие ученые проверили и подтвердили эти выводы.

В 1926 г., не имея еще никаких опытных данных, допускали два источника питания звезд – выделение всей энергии, связанной с массой при соединении протона с электроном, и образование гелия из водорода. Последнее считали более вероятным, хотя в то время о возможности этого ничего не было известно.

Прошло всего два десятка лет с тех пор, и мы узнали, что истина лежит посредине между двумя упомянутыми выше звездными моделями и что в них заложено даже не зерно истины, а нечто большее.

Гелий из атомов водорода действительно образуется и в самом деле не простым их слиянием. При этом действительно происходит уменьшение массы образующегося вещества, так как часть ее, вместе с присущей ей энергией, переходит в массу и энергию γ-квантов; это и есть источник энергии, питающий звезды. Наконец, энергия образуется действительно в центре звезды, но не в точке, а в небольшом центральном ядре.

Пересмотр теории внутреннего строения звезд на основе установленного источника питания их энергией очень мало изменил описанные выводы. На истории этого вопроса мы еще раз убеждаемся в том, как развитие науки уточняет картину мира и как из «устаревших» теорий сохраняются те зерна истины, без которых подъем на следующую ступеньку знания был бы невозможен. В этом смысле прав оказался и Гельмгольц, предполагавший в прошлом столетии, что сжатие звезды есть источник ее энергии. Теперь мы согласны и с ним, но только для начального периода жизни звезды, когда вследствие сжатия температура ее недр повышается настолько, что становятся возможными ядерные реакции. Начавшись, они уже очень долгий срок (пока хватит запасов водорода в звезде) снабжают ее энергией. В Солнце сейчас около 50% водорода (по массе), а раньше его было еще больше. Этого запаса Солнцу не только «на наш век хватит», но и хватит еще на много миллиардов лет.

Развитие как необратимое, направленное и закономерное изменение материальных и идеальных объектов в результате чего возникает их новое качественное состояние, основанное на возникновении, трансформации или исчезновении элементов и связей объектов; процесс, идущий на основе объективных закономерностей. Развитие представляет собой самодвижение объекта – имманентный процесс, источник которого заключён в самом развивающемся объекте.

Изменение материи и сознания, их универсальное свойство, всеобщий принцип объяснения истории природы, общества и познания. Если необходимо подчеркнуть скорость и характер изменений, то говорят об:

- эволюции (от лат. evolutio – развёртывание) – относительно постепенных большей частью количественных изменениях;
- революции (от поздн. лат. revolutio – поворот, переворот, превращение) – относительно быстрых в основном качественных и кардинальных изменениях.

Вопросы для закрепления:

1. За счет каких источников энергии светятся звезды?
2. Что остается после звезды после ее вспышки, как сверхновой?
3. За счет каких реакций в звездах образуются химические элементы легче железа?
4. Из-за чего происходит изменение блеска сверхновой звезды?
5. Можно ли по цефеидам определить массу звезды?
6. Кто разделил звездное небо на участки – созвездия – и дал им имена?
7. Почему для ориентирования на Земле выбрали Полярную звезду?

Практикум

Лабораторная работа №1

Определение ускорения тела при равноускоренном движении.

Цель: измерить ускорение шарика, скатывающегося по наклонному желобу.

Оборудование: металлический желоб, штатив с муфтой и зажимом, стальной шарик, металлический цилиндр, измерительная лента, секундомер или часы с секундной стрелкой.

Описание работы:

Движение шарика, скатывающегося по желобу, приближенно можно считать равноускоренным. При равноускоренном движении без начальной скорости модуль перемещения **s** , модуль ускорения ***a*** и время движения ***t*** связаны соотношением

$$s=\frac{at}{2}$$

Поэтому, измерив **s** и ***t***, мы можем найти ускорение ***a***. Чтобы повысить точность измерения, ставят опыт несколько раз, а затем вычисляют средние значения измеряемых величин и оценивают погрешность измерения. В данном опыте основная погрешность связана с измерением времени движения.

Ход работы:

1. Соберите установку, изображенную на рисунке (верхний конец желоба должен быть на несколько сантиметров выше нижнего). Положите в желоб у его нижнего конца металлический цилиндр. Когда шарик, скатившись, ударится о цилиндр, звук удара поможет точнее определить время движения шарика.



2. Отметьте на желобе начальное положение шарика, а также его конечное положение – верхний торец металлического цилиндра.

3. Измерьте расстояние между верхней и нижней отметками на желобе (модуль **s** перемещения шарика) и результат измерения запишите в таблицу.

№ опыта	S, М	*t*, с	*a*, м/с^2
1			
2			
3			
4			
5			

4. Выбрав момент, когда секундная стрелка находится на делении, кратном 10-ти, отпустите шарик без толчка у верхней отметки и измерьте время ***t*** до удара шарика о цилиндр. Повторите опыт 5 раз, записывая в таблицу результаты измерений. При проведении каждого опыта пускайте шарик из одного и того же начального

положения, а также следите за тем, чтобы верхний торец цилиндра находился у соответствующей отметки.

5. По данным опыта вычислите ускорение и, продолжив таблицу, рассчитайте погрешность измерения ускорения.

6. Сделайте вывод.

7. Для сдачи работы повторите тему равноускоренное движение и оценка погрешностей измерений.

Контрольные вопросы:

1. Что такое ускорение? Ускорение при равноускоренном движении.
2. Какую скорость приобретет велосипедист через 5 с после начала торможения, если его начальная скорость равна 10 м/с, а ускорение при торможении составляет 1,2 м/с^2?
3. Как найти ускорение при равноускоренном движении? Единица ускорения в СИ?
4. При вычислении ускорения пользуются формулами, в которые входят не векторы, а проекции этих величин на координатную ось. Почему?
5. Каков знак проекции ускорения на ось **X** по отношению к проекции скорости тела на эту же ось, если модуль его скорости увеличивается; уменьшается?

Лабораторная работа №2

Определение коэффициента жесткости пружины

Цель: найти коэффициент жесткости пружины из измерений удлинения пружины при различных значениях силы тяжести $F_m=mg$, уравновешивающей силу упругости $F_{упр}$, на основе закона Гука

Оборудование: набор грузов, масса каждого равна 0,100 кг, а погрешность 0,002 кг; линейка с миллиметровыми делениями, штатив с муфтами и лапкой; спиральная пружина.

Описание работы:

В каждом из опытов жесткость определяется при разных значениях силы упругости и удлинения, т. е. условия опыта меняются. Поэтому для нахождения среднего значения жесткости нельзя вычислить среднее арифметическое результатов измерений. Воспользуемся графическим способом нахождения среднего значения, который может быть применен в таких случаях. По результатам нескольких опытов построим график зависимости модуля силы упругости $F_{упр}$ от модуля удлинения $|x|$. При построении графика по результатам опыта экспериментальные точки могут не оказаться на прямой, которая соответствует формуле $F_{упр}=k|x|$. Это связано с погрешностями измерений. В этом случае график надо проводить так, чтобы примерно одинаковое число точек, оказалось, по разные стороны от прямой. После построения графика возьмите точку на прямой (в средней части графика) определите по нему соответствующие этой точке значения силы упругости и удлинения, и вычислит коэффициент жесткости k. Это и будет искомым средним значением коэффициента жесткости пружины $k_{ср}$.

Результат измерения обычно записывается в виде выражения $k=k+\Delta k$, где – Δk наибольшая абсолютная погрешность измерения. Из курса алгебры (VII класс) известно, что относительная погрешность ($\varepsilon_{k)}$) равна отношению абсолютной погрешности Δk к значению величины k.

Существует правило для расчета относительной погрешности: если определяемая в опыте величина находится в результате умножения и деления приближенных величин, входящих в расчетную формулу, то относительные погрешности складываются. В данной работе $k=\frac{mg}{x}$. Поэтому $\varepsilon_k=\varepsilon_m+\varepsilon_g+\varepsilon_{x...}$ (1)

Ход работы

1. Закрепите на штативе конец спиральной пружины (другой конец пружины снабжен стрелкой-указателем и крючком).
2. Рядом с пружиной или за ней установите и закрепите линейку с миллиметровыми делениями.
3. Отметьте и запишите то деление линейки, против которого приходится стрелка-указатель пружины.
4. Подвесьте к пружине груз известной массы и измерьте вызванное им удлинение пружины.
5. К первому грузу добавьте второй, третий и т. д. грузы, записывая каждый раз удлинение $|x|$ пружины. По результатам измерений заполните таблицу.

Номер опыта.	М, кг	mg, Н	x, м
1			
2			
3			

6. По результатам измерений постройте график зависимости силы упругости от удлинения и, пользуясь им, определите среднее значение жесткости пружины $\mathbf{k_{ср}}$.

7. Рассчитайте наибольшую относительную погрешность, с которой найдено значение $\mathbf{k_{ср}}$ (из опыта с одним грузом). В формуле (1)

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta m}{m} = \frac{0.002кг}{0{,}1кг} = 0{,}02 \quad \varepsilon_g = \frac{\Delta g}{g} = \frac{0{,}02м/с}{10м/с} = 0{,}002$$

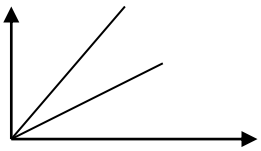
Так как погрешность при измерении удлинения Δx=1 мм, то $\varepsilon_x = \frac{\Delta X}{X} = \frac{1мм}{25мм} = 0{,}04$

8. Найдите $\Delta \mathbf{k} = \varepsilon_{\mathbf{k}} * \mathbf{k_{ср}}$ и запишите ответ в виде $\mathbf{k = k_{ср} +/- \Delta k}$.

9. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы:

1. Какая деформация называется упругой?
2. Запишите закон Гука для деформации растяжения и поясните физический смысл входящих в него величин.
3. Что называется упругим напряжением и относительной деформацией?
4. Как называются силы, вызывающие деформацию растяжения и сдвига?
5. Пояснить физический смысл модуля Юнга.
6. Чем отличается упругая и неупругая деформация?
7. Поясните физический смысл коэффициента жесткости пружины.
8. Что понимают под нормальным и тангенциальным напряжениями?
9. Поясните физический смысл коэффициента пропорциональности в законах упругой деформации растяжения и сдвига.
10. Объяснить механизм деформации изгиба и кручения. Выполняется ли закон Гука для этих деформаций?
11. Существует ли абсолютно упругая деформация? Когда деформацию твердого тела можно считать практически упругой?
12. Поясните диаграмму растяжения металлических твердых тел.
13. На рисунке изображены графики зависимостей относительного изменения от небольшого напряжения для медной и стальной проволоки. Какой из графиков относится к меди?



Лабораторная работа № 3

Измерение коэффициента трения скольжения

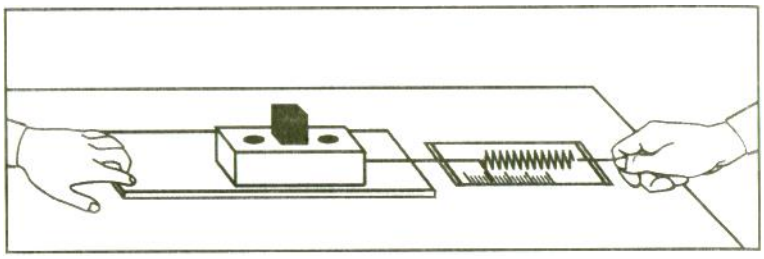
Цель: определить коэффициент трения деревянного бруска, скользящего по деревянной линейке.

Оборудование: динамометр, деревянный брусок, набор грузов, линейка.

Описание работы

С помощью динамометра измеряют силу, с которой нужно тянуть брусок с грузами по горизонтальной поверхности так, чтобы он двигался равномерно. Эта сила равна по модулю силе трения действующей на брусок. С помощью этого же динамометра можно найти вес бруска с грузом. Этот вес по модулю равен силе нормального давления **N** бруска на поверхность, по которой он скользит. Определив таким образом значения силы трения при различных значениях силы нормального давления, необходимо построить график зависимости $\mathbf{F_{тр}}$ от ***P*** и найти среднее значение коэффициента трения.

Основным измерительным прибором в этой работе является динамометр. Динамометр имеет погрешность Δ**=0,05 Н**. Она и равна погрешности измерения, если указатель, совпадает со штрихом шкалы. Если же указатель в процессе измерения не совпадает со штрихом шкалы (или колеблется), то погрешность измерения силы равна Δ**F=0,1 Н**.



Ход работы

1. Положите брусок на горизонтально расположенную деревянную линейку. На брусок поставьте груз.

2. Прикрепив к бруску динамометр, как можно более равномерно тяните его вдоль линейки. Заметьте показание динамометра.

3. Взвесьте брусок и груз.

4. К первому грузу добавьте второй, третий грузы, каждый раз взвешивая брусок и грузы и измеряя силу трения. По результатам измерений заполните таблицу.

5. По результатам измерений постройте график зависимости силы трения от силы давления и, пользуясь им, определите среднее значение коэффициента трения $\mu_{ср}$.

6. Рассчитайте максимальную относительную погрешность измерения коэффициента трения. Так как

$$\mu = \frac{Fmm}{P}, \text{ то } \varepsilon_{\mu} = \varepsilon_{F} + \varepsilon_{p} = \frac{\Delta Fmm}{Fmm} + \frac{\Delta P}{P} \quad (1)$$

то, из формулы (I) следует, что наибольшей погрешностью измерен коэффициент трения в опыте с одним грузом (так как в этом случае; знаменатели имеют наименьшее значение).

7. Найдите абсолютную погрешность $\Delta\mu = \varepsilon_{\mu_{ср}}$ и запишите ответ в виде $\mu = \mu_{ср} \pm \Delta\mu$.

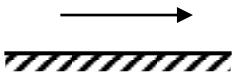
8. Запишите вывод.

Номер опыта.	P, H	ΔP, H	$F_{тр}$, H	$\Delta F_{тр}$, H

1				
2				
3				

Контрольные вопросы:

1. Что называется силой трения? В чем причина возникновения этой силы?
2. На примере катящегося колеса покажите направление силы трения качения и силы трения скольжения.



3. К чему приводит действие сил трения?
4. От чего зависит величина силы трения качения?
5. Напишите выражения моментов сил трения качения и трения скольжения. На примере катящегося шарика покажите направления моментов сил трения скольжения и трения качения.
6. Какие изменения происходят с силой реакции поверхности R при качении шарика?
7. Какой физический смысл имеет коэффициент силы трения качения? Почему он имеет размерность длины? Каков он для металлов?
8. Почему в данной лабораторной работе при качении шарика, совершающего одновременно и колебательное движение, уменьшается амплитуда колебаний?
9. Примените основное уравнение динамики вращательного движения к написанию соответствующего уравнения движения катящегося шарика.

Лабораторная работа № 4

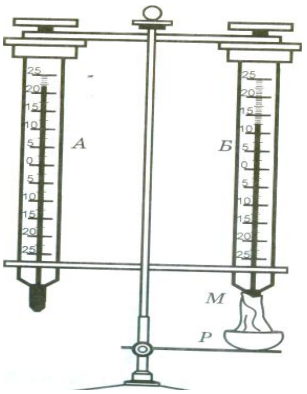
Определение относительной влажности воздуха

Цель: научиться определять влажность воздуха
Оборудование: два термометра, марля, резервуар с холодной водой, штатив.

Описание работы:

Психрометр состоит из двух одинаковых термометров, как показано на рисунке, один из которых обмотан марлей (или батистом). Если водяной пар в воздухе не насыщен, то вода из ткани будет испаряться и показания «влажного» термометра будут меньше, чем сухого.

Чем интенсивнее испаряется вода (т.е. чем менее насыщен воздух водяным паром), тем ниже показания «влажного термометра». По разнице показаний двух термометров можно характеризовать влажность воздуха. С этой целью составляются так называемые психрометрические таблицы, с помощью которых находят конкретные значения относительной влажности воздуха.



Ход работы:

1. В начале урока наливают воду в резервуар термометра, предварительно обернув его марлей. Выждав 20-25 минут (пока показания влажного термометра перестанут изменяться) записывают показания сухого и влажного термометра в таблицу.
2. С помощью психрометрической таблицы определяют относительную влажность воздуха.
3. Оценить погрешность измерения влажности.
4. Сделать расчеты и заполнить таблицу.
5. Вывод.

сухой термометр, (^{0}C)	влажный термометр, (^{0}C)	относительная влажность воздуха	погрешность измерения

Контрольные вопросы:

1. Что такое абсолютная и относительная влажность? Единицы измерения.
2. Сформулируйте закон Дальтона.
3. Точка росы и принцип измерения влажности конденсационным гигрометром.
4. Испарение с точки зрения молекулярно-кинетической теории.
5. Значение влажности воздуха для жизнедеятельности организма.

6. Решите задачу: термометр зеркального гигрометра показывает температуру 8,4° С в тот момент, когда он запотевает. Определите относительную влажность воздуха, если температура воздуха 16,6° С.

Лабораторная работа № 5

Исследование смешанного соединения проводников

Цель работы: экспериментально изучить характеристики смешанного соединения проводников.

Оборудование: источник питания, ключ, реостат, амперметр, вольтметр, соединительные провода, три проволочных резистора сопротивлениями 1 Ом, 2 Ом и 4 Ом.

Описание работы:

Во многих электрических цепях используется смешанное соединение проводников, являющееся комбинацией последовательного и параллельного соединений. Простейшее смешанное соединение сопротивлений **R1=1 Ом, R2=2 Ом, R3=4 Ом** приведено на рисунке 1, а.

Резисторы **R2** и **R3** соединены между собой параллельно, поэтому сопротивление между точками 2 и 3

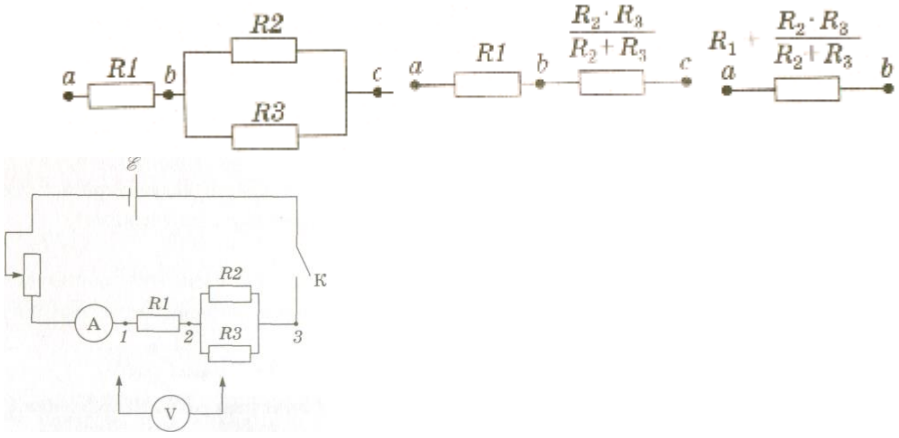
$$R2.3= \frac{R2R3}{R2+R3}$$

Кроме того, при параллельном соединении суммарная сила тока I1 втекающего в узел 2, равна сумме сил токов, вытекающих из него. I1=I2+I3 (2)

Учитывая, что сопротивления R1 и эквивалентное сопротивление R23 соединены последовательно (рис. 1б) , U13=U12+U23 (3),

а общее сопротивление цепи между точками 1 и 3 (рис. 1, в)

$$R13=R1+R23=R1+\frac{R2R3}{R2+R3}$$



а) б) в)

Рис. 1.

Рис.2.

Электрическая цепь для изучения характеристик смешанного соединения проводников состоит из источника питания 1 (рис. 2), к которому через ключ 2 подключены реостат 3, амперметр 4 и смешанное соединение трех проволочных резисторов R1, R2 и R3. Вольтметром 5 измеряют напряжение между различными парами точек цепи. Последующие измерения силы тока и напряжения в электрической цепи позволят проверить соотношения.

Измерение силы тока I, протекающего через резистор R1 , и разности потенциалов на нем U12 позволяет определить сопротивление R1 и сравнить его с заданным значением.

$$R1= \frac{U12}{I1}$$

Сопротивление R23 можно найти из закона Ома, измерив вольтметром разность потенциалов U23. .

$$R23 = \frac{U23}{I1}$$

Этот результат можно сравнить со значением R23, полученным из формулы (1). Справедливость формулы (3) проверяется дополнительным измерением с помощью вольтметра напряжения U13 (между точками 1 и 3). Это измерение позволит также оценить сопротивление R13 (между точками 1 и 3).

$$R13 = \frac{U13}{I1}$$

Экспериментальные значения сопротивлений, полученных по формулам должны удовлетворять соотношению для данного смешанного соединения проводников.

Ход работы:

1. Соберите электрическую цепь.
2. При помощи реостата установите в цепи определенную силу тока I1 измеряемую амперметром.
3. Запишите класс точности амперметра, указанный на шкале прибора, и предел измерения силы тока.
4. Найдите абсолютную погрешность измерения силы тока
5. Подключите вольтметр к точкам 1 и 2 и измерьте напряжение U12 между этими точками.
6. Запишите класс точности вольтметра указанный на шкале прибора, и предел измерения напряжения.
7. Найдите абсолютную погрешность измерения напряжения.
8. Рассчитайте R1.
9. Подключите вольтметр к точкам 2 и 3 и измерьте напряжение между этими точками.
10. Рассчитайте сопротивление R23.
11. Подключите вольтметр к точкам 1 и 3 и измерьте напряжение между этими точками.
12. Рассчитайте сопротивление R13.
13. Проверьте справедливость формул.
14. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы:

1. Что такое смешанное соединение проводников?
2. Начертите схему последовательного соединения 2 резисторов 1 Ом и 2 Ом. В каком из них сила тока больше.
3. Сколько одинаковых резисторов было соединено параллельно, если каждый из них имеет сопротивление 600 Ом, а их общее сопротивление составило 50 Ом?
4. Проводники сопротивлением 15 Ом и 20 Ом соединили последовательно. Чему равно их общее сопротивление?
5. Опираясь на решение задачи № 3, определить напряжение цепи при силе тока 2 А.
6. Вычислить сопротивление цепи, если $R_1 = R_2 = R_3 = 1$ Ом, $R_4 = 3$ Ом.

Лабораторная работа № 6

Измерение мощности электрической лампы

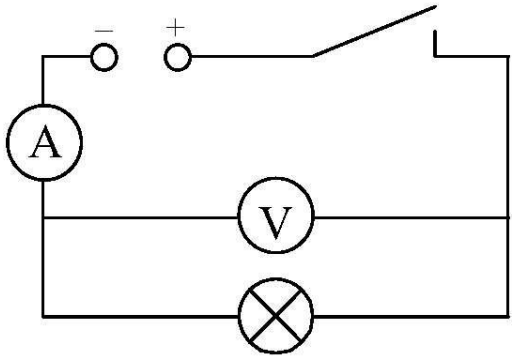
Цель работы: изучение метода измерения мощности и работы тока в электрической лампе с помощью амперметра, вольтметра и секундомера

Оборудование: источник электропитания, лампа, переменный резистор, амперметр, вольтметр, ключ, часы с секундной стрелкой, соединительные провода, металлический планшет.

Описание работы:

Для определения мощности лампы надо собрать цепь. Измеряя силу тока I в лампе и напряжение на ней, мощность можно вычислить по формуле: **P=UI**. Для вычисления работы тока в лампе надо засечь время, в течение которого лампа горела. Работа тока вычисляется по формуле:

A = Pt



Ход работы

1. Нарисуйте в тетради схему электрической цепи, изображенной на рисунке.
2. Соберите электрическую цепь, проверьте правильность сборки и включите источник питания.
3. Замкните ключ, одновременно с этим заметьте и запишите показания часов.
4. С помощью амперметра и вольтметра измерьте силу тока и напряжение на лампе. Показания приборов запишите в тетрадь.
5. Разомкните ключ, одновременно еще раз заметьте и запишите показания часов.
6. Вычислите, сколько секунд горела лампа.
7. Вычислите мощность и работу тока в лампе.
8. Результаты измерений занесите в таблицу
9. Опыт можно повторить, изменив реостатом силу тока в цепи и время работы лампы

Номер опыта	I	U	t	P	A
1					
2					

Контрольные вопросы:

1. Как вычислить работу тока?
2. Что показывает мощность? Каков ее физический смысл? Почему, приобретая, какой либо потребитель электрической энергии мы, грамотные покупатели, прежде всего, стараемся выяснить какова его мощность?
3. Какие приборы необходимы для определения мощности тока? Что они измеряют?

4. Какие величины надо измерить, чтобы рассчитать мощность тока в лампе? Работу тока в лампе за 1 минуту?
5. Назовите единицы мощности.

Лабораторная работа № 7

Измерение электродвижущей силы и внутреннего сопротивления источника тока

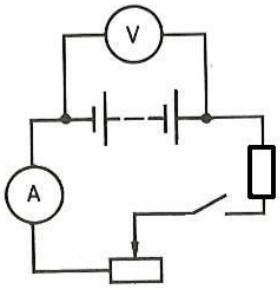
Цель работы:

1. Показать, что ЭДС источника тока отличается от напряжения во внешней цепи на величину падения напряжения во внутренней цепи источника тока.
2. Вычислить величину внутреннего сопротивления **r** источника тока, исходя из закона Ома для замкнутой цепи и убедиться, что **r** – величина, не зависящая от нагрузки внешней цепи.

Оборудование: Источник тока, вольтметр, амперметр, переменное сопротивление (реостат), постоянное сопротивление, ключ.

Описание работы:

Из закона Ома $\mathcal{E}$**=U+Ir** следует, что при разомкнутом ключе ЭДС источника равна напряжению на внешней цепи $\mathcal{E}$**=U**. В эксперименте мы замыкаем источник тока на вольтметр, который имеет сопротивление намного больше, чем внутренне сопротивлении источника тока **r**. Ток в цепи очень мал и поэтому $\mathcal{E}$**>>U**, с точностью до измерения напряжения. При замыкании ключа в цепи возникает электрический ток, и вольтметр показывает нам падение напряжения во внешней цепи. Имея амперметр и вольтметр можно провести косвенное измерение сопротивления источника тока, по формуле: **r=(**$\mathcal{E}$**-U)/I**. Меняя внешнее сопротивление, мы должны убедиться, что внутреннее сопротивление источника тока в пределах погрешности измерений есть величина постоянная для данного источника.



Ход работы:

1. Собрать цепь изображенную на рисунке
2. Измерить ЭДС источника пока по показаниям вольтметра при разомкнутой цепи и занести в Таблицу 1 значение $\mathcal{E}$.
3. Замкнуть ключ и вращением ручки реостата найти диапазон изменения тока в цепи.
4. Выбрать три значения тока I_1, I_2, I_3 из найденного диапазона в начале, середине и конце, и занести в Таблицу 1.
5. Выставить реостатом первое значение тока I_1. Снять значение вольтметра U_1 и занести в Таблицу 1.

Таблица 1

№ опыта	$\mathcal{E}$, Вольт	I, Ампер	U, Вольт	r, Ом	e_r, %	Δr, Ом
1	$\mathcal{E}$=	I_1=	U_1=	r_1=	e_{r1}=	Δr_1=
2		I_2=	U_2=	r_2=	e_{r2}=	Δr_1=
3		I_3=	U_3=	r_3=	e_{r3}=	Δr_1=

6. Проделать аналогичные операции со вторым и третьим значением тока.
8. Рассчитать значения $\mathbf{r_1}$, $\mathbf{r_2}$ и $\mathbf{r_3}$ по формуле: **r=(**$\mathcal{E}$**-U)/I** и занести в Таблицу 1.
9. Рассчитать значения $\mathbf{e_r}$ относительной погрешности внутреннего сопротивления источника **r** по формуле: $\varepsilon_r = \frac{\Delta E + \Delta U}{E - U} + \frac{\Delta I}{I}$, а **Δr** – абсолютной погрешности внутреннего сопротивления по формуле $\mathbf{\Delta r = re_r}$. Данные занести в Таблицу 1.
10. Занести в Таблицу 2 абсолютные погрешности **Δ**$\mathcal{E}$**, ΔU** и **ΔI**, исходя из точности шкалы приборов.

Таблица 2.

$\Delta\mathcal{E}$= _____ В	ΔI= _____ А	ΔU= _____ В

11. Найти среднее значение $\mathbf{r_{ср}=(r_1+r_2+r_3)/3}$. $\mathbf{r_{ср}}$=_____ **Ом**

12. Записать окончательные результаты измерений ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока в виде: $\mathcal{E}\pm\Delta\mathcal{E}$, $\mathbf{r_{ср}\pm\Delta r_{max}}$. $\mathbf{\Delta r_{max}}$ – наибольшее из найденных значений абсолютной погрешности **r**.

$\mathcal{E}$= ____ ±____ **В**	**r**= _____ ± ___ **Ом**

13. Отложить на шкале значения **r** и **±Δr**, и сделать выводы по результатам работы.

r_1_____

r_2_____

r_3_____

Контрольные вопросы:

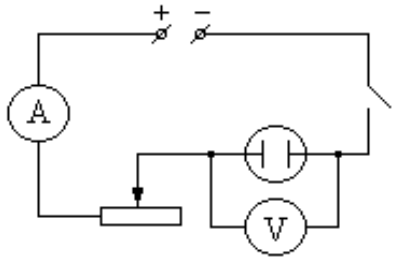
1. Почему показания вольтметра при разомкнутом и замкнутом ключе различны?
2. Как повысить точность измерения ЭДС источника тока?
3. Можете ли вы предложить другие способы измерения ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока?
4. Какую физическую величину называют ЭДС источника тока?
5. Как устроен гальванический элемент?

Лабораторная работа № 8

Определение электрохимического эквивалента меди

Цель: по результатам эксперимента определить электрохимический эквивалент меди.

Оборудование: весы учебные, разновес, амперметр школьный, часы, выпрямитель на 6В 2А, реостат 6 Ом 2А, ключ, вольтметр 6В, электролитическая ванна, раствор медного купороса, рукосушитель.



Ход работы:

Одну из пластин, которая будет катодом, (если пластина мокрая, ее надо подсушить) тщательно взвесить с точностью до 10мг и записать результат в таблицу.

Вставить электрод в электролитическую ванну и составить электрическую цепь согласно схеме.

Отрегулировать реостатом ток, чтобы величина его не превышала 1А на 50 $см^2$ погруженной части катодной пластины.

Замкнуть цепь на 15-20 минут.

Разомкнуть цепь, вынуть катодную пластинку, смыть с нее остатка раствора и высушить под рукосушителем.

Взвесить высушенную пластину с точностью до 10мг.

Значение тока, время опыта, увеличение в массе катодной пластину записать в таблицу и определить электрохимический эквивалент.

№ опыта	I, А	Масса катода		Масса отлож. вещества	Время	Электрохим. эквивалент
		до опыта	после опыта			

Оценка погрешностей:

$$k = \frac{m}{I \cdot t}$$

Относительная погрешность: $\delta k = \delta m + \delta I + \delta t = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta t}{t}$

Оцените в процессе проведения работы наибольшие допустимые ошибки при измерении массы, тока и времени. Вычислите относительную погрешность, найдите максимальную допустимую погрешность при определении **k**.

$\delta k = \frac{\Delta k}{k}$, следовательно $\Delta k = \delta k \cdot k$

После этого дается результат в виде: $k = k_{опыта} + \Delta k$

Сравните полученный результат с табличным.

Контрольные вопросы:

1. Что такое электролитическая диссоциация, электролиз?

2. До каких пор будет происходить электролиз медного купороса, если оба электрода медные? Оба электрода угольные?
3. Быстрее или медленнее пойдет электролиз, если один из медных электродов заменить цинковым?
4. При проведении опыта по определению электрохимического эквивалента меди были получены следующие данные: время прохождения тока t**=10 мин**, сила тока I**=1,0А**. Масса катода до опыта m_1**=82,4 г**, масса катода после опыта m_2**=82,58 г**. Какое значение электрохимического эквивалента меди (в мг/Кл) было получено в этом опыте?

Лабораторная работа № 9

Определение показателя преломления стекла

Цель: определить показатель преломления стекла с помощью плоскопараллельных пластин.
Оборудование: стеклянная плоскопараллельная пластинка, английская булавка – 6шт., линейка измерительная, белая бумага, лампочка на подставке, батарея аккумуляторов, ключ, соединительные провода, экран с щелью, транспортир.

Описание работы.

Явление преломления света наблюдается при переходе света из одной среды в другую. Происходит это потому, что в разных средах скорость света разная. Согласно закону преломления, имеем:

$$n=\frac{sin\alpha}{sin\beta},$$

n – относительный показатель преломления второй среды относительно первой. Если первой средой является воздух, для которого абсолютный показатель преломления равен 1, то относительный показатель преломления второй среды будет равен абсолютному показателю.

Ход работы

1. Соберите электрическую цепь, присоединив электрическую лампочку к батарее через ключ.
2. Установите перед лампочкой экран с щелью, а за ним положите лист белой бумаги.
3. Замкните цепь с помощью ключа и получите тонкую полоску света на бумаге.
4. Положите поперек полоски света стеклянную пластинку под произвольным углом.
5. Очертите контур пластинки и отметьте начало **A** и конец **B** падающего луча и точку **C** – выход луча света из пластинки.
6. Разомкните цепь и снимите с листа бумаги стеклянную пластинку.
7. Начертите падающий и преломленный лучи, соединив точки **A** и **B**, **C** и **A**. Восстановите перпендикуляр к пластинке в точке **A** падения луча света.
8. Измерьте углы падения и преломления с помощью транспортира.
9. Вычислите показатель преломления стекла по формуле.
10. Повторите опыт при других углах падения и сопоставьте результаты (три опыта)
11. Попробуйте провести опыты без источников света, используя английские булавки.
12. Попробуйте определить показатель преломления стекла, пользуясь не транспортиром, а измерительной линейкой.

Контрольные вопросы:

1. Запишите формулу для вычисления скорости света в веществе с показателем преломления **n**
2. От чего зависит показатель преломления вещества?
3. В чем заключается явление полного отражения света на границе раздела двух сред?

Лабораторная работа № 10

Изучение формулы тонкой линзы

Цель работы: сформулировать гипотезу изучения на разных уровнях сложности, изучить некоторые методы определения фокусного расстояния тонких линз.

Оборудование: оптическая скамья с набором рейтеров, осветитель с источником питания, экран, собирающая и рассеивающая линзы.

Описание работы:

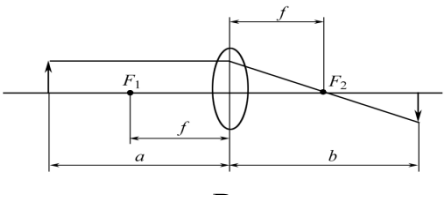
Главное фокусное расстояние тонких линз можно измерить различными способами. Для этой цели используется установка, которая состоит из оптической скамьи, на которой с помощью рейтеров располагаются: осветитель, исследуемая линза или система линз и экран. Оптическая скамья снабжена шкалой для измерения положения осветителя, линз и экрана. В качестве предмета, изображение которого проектируется линзой на экран, используется сетка, расположенная в передней части осветителя.

Располагая на оптической скамье собирающую линзу, получим на экране действительное изображение предмета (сетки). При этом ход лучей в линзе имеет вид, представленный на рисунке.

Запишем формулы тонкой линзы $$\frac{1}{f}=\frac{1}{a}\pm\frac{1}{b} \quad (1)$$

где **f** – главное фокусное расстояние линзы; **a** – расстояние от предмета до оптического центра линзы; **b** – расстояние от изображения до оптического центра линзы.

Из этого следует, что $$f=\frac{ab}{a+b} \quad (2)$$



Очевидно, что формула (2) может быть использована как рабочая для определения главного фокусного расстояния собирающей тонкой линзы, для чего достаточно измерить лишь расстояния **a** и **b**. Следует, однако, иметь в виду, что измеряя расстояния от предмета и изображения до оптического центра линзы, мы допускаем ошибку порядка толщины линзы. Поэтому измерение главного фокусного расстояния тонкой линзы имеет смысл только с точностью до ее толщины.

В практике научного эксперимента часто используется иной метод определения главного фокусного расстояния собирающих тонких линз, разработанный Бесселем и получивший название метода Бесселя. Рассмотрим этот метод.

$$f=\frac{L^2-l^2}{4L}.$$

Формула является рабочей для определения главного фокусного расстояния собирающей линзы методом Бесселя.

Суть этого метода состоит в том, что с помощью собирающей линзы, с оптической силой большей, чем у рассеивающей, получают на экране четкое изображение предмета. Затем между экраном и собирающей линзой располагают рассеивающую линзу на расстоянии **b** от экрана. При этом резкое изображение на экране исчезает.

Ход работы:

Установите экран на оптической скамье так, чтобы расстояние между ним и предметом (сеткой) было больше чем **4f** (ориентировочно).

Расположите собирающую линзу между предметом и экраном так, чтобы на экране появилось резкое увеличенное изображение предмета (сетки). Запишите деление шкалы **a1**, соответствующее положению линзы на оптической скамье.

Переместите, не изменяя расстояния между осветителем и экраном, линзу вдоль оптической скамьи так, чтобы на экране появилось уменьшенное изображение предмета (сетки). Запишите деление шкалы **a2**, соответствующее новому положению линзы на оптической скамье.

Определите расстояние **l** как разность между двумя положениями линзы, т.е. **l=a2–a1**.

Измерьте расстояние между предметом и экраном (однако оно должно оставаться больше чем **4f**) и повторите опыт. Опыт повторить не менее трех раз. Результаты измерений занесите в таблицу.

Рассчитайте фокусное расстояние собирающей линзы по методу Бесселя для всех трех опытов и найдите среднее значение. Результаты занесите в таблицу.

№	L, см	a1, см	a2, см	l, см	f, см	$\widetilde{f}$, см
1						
2						
3						

Контрольные вопросы:

1. Сформулируйте законы отражения и преломления света.
2. Что такое линза? Что такое оптический центр и оптическая ось линзы? Как различают линзы по форме? По оптическим свойствам?
3. Назовите основные характеристики линзы: фокусное расстояние, оптическая сила.
4. Поясните, как производится построение изображение в линзах.
5. Для каких целей используется микроскоп и зрительная труба?
6. Какой раздел физики называется "Геометрическая оптика"? Сформулируйте основные законы геометрической оптики.
7. Что такое линза? Запишите формулу тонкой линзы и поясните ее.
8. Постройте изображение предмета в тонкой линзе и определите величину и знак линейного увеличения (расположения предмета и вид линзы задает преподаватель).
9. Поясните ход лучей в микроскопе. От чего зависит его увеличение?
10. Пояснить оптическую схему зрительной трубы. От чего зависит увеличение зрительной трубы?
11. Постройте ход лучей, если свет переходит из оптически более плотной среды в менее плотную.
12. Можно ли применять формулу тонкой линзы для собирающей линзы? Ответ пояснить.

Лабораторная работа № 11

Наблюдение интерференции и дифракции света

Цель работы: экспериментально изучить явление интерференции и дифракции.

Оборудование: электрическая лампа с прямой нитью накала (одна на класс), две стеклянные пластинки, стеклянная трубка, мыльная вода, компакт-диск, капроновая ткань.

Описание работы:

Обычно интерференция наблюдается при наложении волн, испущенных одним и тем же источником света, пришедших в данную точку разными путями.

Вследствие дифракции свет отклоняется от прямолинейного распространения (например, близи краев препятствий).



Ход работы:

1. С помощью стеклянной трубки выдуйте мыльный пузырь и внимательно рассмотрите его. При освещении его белым светом наблюдайте образование цветных интерференционных колец. По мере уменьшения толщины пленки кольца, расширяясь, перемещаются вниз.

2. Тщательно протрите две стеклянные пластинки, сложите вместе и сожмите пальцами. Из-за неидеальности формы соприкасающихся поверхностей между пластинками образуются тончайшие воздушные пустоты. При отражении света от поверхностей пластин, образующих зазор, возникают яркие радужные полосы – кольцеобразные или неправильной формы. При изменении силы, сжимающей пластинки, изменяются расположение и форма полос.

3. Рассмотрите внимательно под разными углами поверхность компакт-диска (на которую производится запись). Что вы наблюдаете? Объясните наблюдаемые явления. Опишите интерференционную картину.

4. Посмотрите сквозь капроновую ткань на нить горящей лампы. Поворачивая ткань вокруг оси, добейтесь четкой дифракционной картины в виде двух скрещенных под прямым углом дифракционных полос. Зарисуйте наблюдаемый дифракционный крест. Объясните наблюдаемые явления.

5. Запишите выводы. Укажите, в каких из проделанных вами опытов наблюдалось явление интерференции, а в каких дифракции.

Контрольные вопросы:

1. Что такое дифракция света? В чем отличие дифракции от интерференции света?
2. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля.
3. Поясните основные идеи метода зон Френеля.
4. Какой вид имеют зоны Френеля при рассмотрении дифракции света на щели?
5. Запишите условие дифракционного минимума в случае дифракции волны на одной щели.
6. Вывести формулы, используя метод зон Френеля.
7. Как зависит интенсивность дифракционного максимума от номера этого максимума?
8. Как зависит интенсивность дифракционного максимума от ширины щели?
9. Получить выражение для ширины центрального дифракционного максимума.
10. Почему центральный дифракционный максимум имеет наибольшую интенсивность?
11. Получить формулу для определения расстояния между дифракционными максимумами.

12. Получить расчетную формулу (9) или (10) для ширины щели.
13. На щель шириной **b=6λ** падает нормально параллельный пучок света с длиной **λ**. Под каким углом будет наблюдаться третий дифракционный минимум.

Лабораторная работа № 12

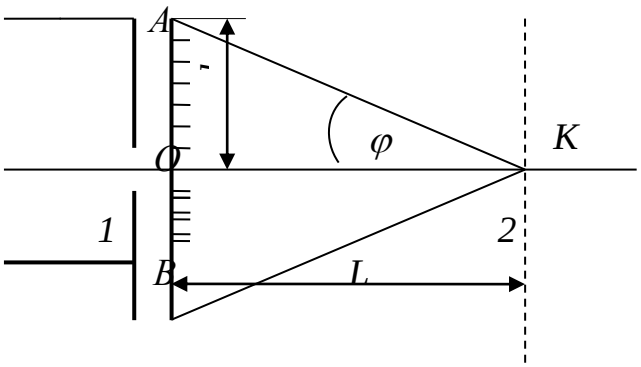
Измерение длины световой волны с помощью дифракционной решетки

Цель работы: ознакомление с прозрачной дифракционной решеткой, определение длины волны монохроматического света.

Оборудование: дифракционная решетка, светофильтры, оптическая скамья, осветитель и щель со шкалой.

Описание работы.

На оптической скамье с линейкой располагается осветитель 1, щель со шкалой АВ, дифракционная решетка.



Если смотреть на освещенную монохроматическим светом щель через дифракционную решетку, то кроме изображения щели по бокам видны еще ее симметричные изображения (дифракционные максимумы). Каждая полоса видна на определенном расстоянии ***AO=OB=l***, которое можно замерять по шкале. ***OK=L*** – расстояние от изображения до решетки. Измеряя расстояние ***OA=OB***, ***OK***, можно определить угол φ:

$$tg\varphi = \frac{l}{L} = \frac{OA}{OK}.$$

Так как угол φ мал, то $tg\varphi$ можно с достаточной степенью точности заменить на $\sin\varphi$. Угол φ и есть угол дифракции. Для дифракционной решетки $d \cdot \sin\varphi = k\lambda$.

Получим: $\sin\varphi \cong tg\varphi = \frac{l}{L}, \quad d \cdot \frac{l}{L} = k\lambda,$

откуда $\lambda = \frac{d \cdot l}{k \cdot L}$, где: ***d*** – постоянная решетки, ***k*** – порядковый номер максимума.

Ход работы.

1. Установить расстояние ***L*** между дифракционной решеткой и щелью равным 0,20 м, 0,25 м и 0,30 м поочередно.
2. Поместить светофильтр (красный, синий) перед щелью в корпусе осветителя.
3. Посмотрев через дифракционную решетку, измерить по шкале ***AO=l*** расстояния от нулевого максимума до максимума ***k*** – того порядка (***k*=1, 2, 3**). Данные внести в таблицу.

Постоянная решетки $d = 10^{-5}$ м	
Красный светофильтр	Синий светофильтр

k	L, м	l,м	λ, м	k	L, м	l,м	λ, м
1	0,20			1	0,20		
2				2			
3				3			
1	0,25			1	0,25		
2				2			
3				3			
1	0,30			1	0,30		
2				2			
3				3			
Среднее значение				Среднее значение			

4. По формуле вычислить длину волны монохроматического света. Данные вычислений также занести в таблицу.

5. Посчитать среднее значение длины волны как среднее арифметическое из всех вычисленных длин волн для данного монохроматического света:

$$\lambda_{ср} = \frac{\Sigma \lambda_i}{n}.$$

Контрольные вопросы:

1. Что называется интерференцией, дифракцией?
2. В чем состоит принцип Гюйгенса-Френеля?
3. Какие волны называются когерентными? Какие способы получения когерентных волн Вы знаете?
4. Что из себя представляет дифракционная решетка, отражательная дифракционная решетка?
5. Запишите условие максимума для дифракционной решетки. Поясните его смысл.
6. Что называется оптической разностью хода лучей?
7. Выведите условие максимума для дифракционной решетки.
8. Что называется порядком дифракционного максимума, чем определяется его наибольшее значение?
9. От чего зависит разрешающая способность дифракционной решетки?
10. Для чего применяется дифракционная решетка в спектральных приборах?
11. При каком соотношении между длиной волны и размерами преграды проявляется дифракция?
12. Когда наблюдается дифракция Френеля? Дифракция Фраунгофера?

Тестовые задания

1 вариант

1) Сила трения скольжения определяется по формуле:

А) $F = \mu N$

Б) $F = mg$

С) $F = k\frac{q^2}{r^2}$

Д) $F = -kx$

Е) $F = ma$

2) Теорема Гюйгенса-Штейнера позволяет определить:

А) Момент инерции относительно любой оси, перпендикулярной оси, проходящей через центр масс

Б) Собственный момент импульса

С) Собственный момент инерции

Д) Момент инерции относительно любой оси, параллельной оси, проходящей через центр масс

Е) Момент импульса твердого тела

3) Какой удар неупругий?

А) Удар пластилиновых шариков друг о друга

Б) Удар молекул о стенку сосуда

С) Соударение атомов

Д) Удар резиновых шариков о стенку

Е) Удар атомов о мишень

4) Под действием силы 2Н пружина удлинилась на 4см. Чему равна жесткость пружины?

А) 2 Н/м

Б) 50 Н/м

С) 0,5 Н/м

Д) 0,08 Н/м

Е) 0,02 Н/м

5) На рисунке представлена траектория движения камня, брошенного под углом к горизонту. Как направлено ускорение камня в точке А траектории, если сопротивлением воздуха пренебречь.

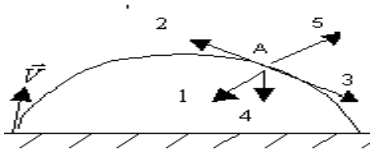
А) 3

Б) 4

С) 1

Д) 5

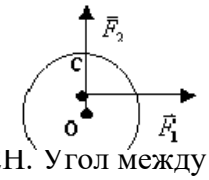
Е) 2



6) К диску радиусом R приложены две одинаковые по величине силы...Чему равен результирующий момент сил относительно оси О, перпендикулярной плоскости диска (ОС=R/2).

А) 2F
Б) 2R/F
С) 2F/R
Д) FR/2
Е) FR

$|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| = F$



7) Две силы, приложенные к одной точке тела, равны F1=5Н, F2=12Н. Угол между векторами F1 и F2 составляет 900.Модуль равнодействующей этих сил равна...
А) 13 Н
Б) 7 Н
С) 17 Н
Д) 11 Н
Е) 20 Н

8) Движение называется финитным
А) Если тело движется поступательно
Б) Если тело при своем движении может удалиться на бесконечность
С) Если тело при своем движении не может удалиться на бесконечность
Д) Если тело покоится
Е) Если $E = \frac{m v^2}{2} = 0$

9) Какая из величин в специальной теории относительности является абсолютно
А) Все величины относительны
Б) Линейный размер
С) Масс
Д) Скорость света
Е) Время

10) Брусок движется по наклонно плоскости с углом наклона α=300. Коэффициент трения бруска о плоскость μ=0,2. Ускорение броска равно g=10м/с^2
А) $3{,}3 м/с^2$
Б) $3 м/с^2$
С) $6{,}7 м/с^2$
Д) $8 м/с^2$
Е) $4{,}27 м/с^2$

11) Как направлен вектор импульса тела?
А) Совпадает с направлением силы
Б) Противоположно вектору перемещения
С) Совпадает с направлением ускорения свободного падения
Д) По направлению вектора скорости
Е) Совпадает с направлением силы трения

12) Диск массой 0,2кг катится без проскальзывания со скоростью 4м/с. Его кинетическая энергия равна:
А) 1,6 Дж

Б) 2,4 Дж
С) 0,8 Дж
Д) 1,2 Дж
Е) 3,2 Дж

13) Какое из приведенных уравнений справедливо при упругом ударе двух тел:

А) $m_1\vec{V}_1 + m_2\vec{V}_2 = m_1\vec{U}_1 + m_2\vec{U}_2$

Б) $m_1\vec{V}_1 = (m_1 + m_2)\vec{U}_2$

С) $\frac{m_1V_1^2}{2} + \frac{m_2V_2^2}{2} = \frac{(m_1+m_2)U}{2}$

Д) $\frac{m_1V_1^2}{2} + \frac{m_2V_2^2}{2} = \frac{(m_1+m_2)U^2}{2} + \Delta W$

Е) $m_1\vec{V}_1 + m_2\vec{V}_2 = (m_{11} + m_2)\vec{U}$

14) В каких единицах измеряется момент сил:
А) Н*м
Б) Дж
С) Вт
Д) кг*м
Е) Н

15) Основное уравнение динамики вращательного движения в угловых характеристиках, записывается в виде:

А) $\vec{M} = \vec{L}\vec{\omega}$

Б) $\vec{M} = I\vec{\varepsilon}$

С) $\vec{M} = \vec{L}\vec{E}$

Д) $\vec{L} = I\vec{E}$

Е) $\vec{F} = m\vec{a}$

16) Как выражается связь между полной энергией и массой тела в специальной теории относительности?

А) $E = mc^2$

Б) $E = mc^2/2$

С) $E_0 = m_0c^2$

Д) $E = mc^2/\upsilon^2$

Е) $E_0 = m_0c^2/2$

17) Какая из величин является инвариантом в классической механике:
А) Перемещение
Б) Скорость
С) Координата

Д) Масса
Е) Ускорение

18) Какой вид имеет зависимость силы тяготения двух тел от расстояния между ними? Тела считать материальными точками.
А) Сила тяготения обратно пропорциональна расстоянию
Б) Линейная зависимость
С) Сила тяготения обратно пропорциональна квадрату расстояния
Д) Прямая пропорциональная зависимость
Е) Сила тяготения не зависит от расстояния

19) Тело движется под действием силы, направленной вдоль оси x и изменяющейся по закону $F = (5x^2 + 3)$

Работа этой силы на пути 3м равна:
А) 90 Дж
Б) 144 Дж
С) 48 Дж
Д) 135 Дж
Е) 54 Дж

20) Какой вид имеет зависимость силы тяготения двух тел от расстояния между ними? Тела считать материальными точками.
А) Линейная зависимость
Б) Сила тяготения обратно пропорционально расстоянию
С) Сила тяготения не зависит от расстояния
Д) Прямая пропорциональная зависимость
Е) Сила тяготения обратно пропорционально квадрату расстояния

21) Если $Re < Re_{кр}$, то течение жидкости:
А) Турбулентное
Б) Ламинарное
С) Жидкость покоится
Д) Ламинарное и турбулентное
Е) Стационарное

22) Момент инерции тела, вращающегося вокруг неподвижной оси, зависит от ...
А) массы тела и ее распределения относительно оси вращения
Б) ускорения тела
С) вращающего момента
Д) силы, действующего на тело
Е) скорости вращения тела

23) Пуля массой m, летевшая горизонтально со скоростью $\upsilon 0$, пробивает тонкую доску. На вылете из доски скорость пули $\upsilon 1$. Работа силы трения, возникающей при прохождении пули в доске, равна:
А) $\left(\frac{m\vartheta_0^2}{2}\right) - \left(\frac{m\vartheta_1^2}{2}\right)$
Б) $\frac{m\vartheta_1^2}{2}$

C) $m(\vartheta_0 - \vartheta_1)$

Д) $\frac{m\vartheta_0^2}{2}$

E) $\frac{m(\vartheta_0 - \vartheta_1)}{2}$

24) Сила 10Н сообщает телу ускорение 3м/с^2.Какая сила сообщает этому телу ускорение 1,5м/с^2

А) 12 Н
Б) 10 Н
С) 5 Н
Д) 2 Н
Е) 1 Н

25) Частица массы m движется равномерно вдоль оси X. Как направлен вектор момента импульса $\vec{L}$ частицы относительно точки О?

А) $Никуда, \vec{L} = 0$
Б) По оси О
С) По оси ОХ
Д) По оси -OZ
Е) По оси OY

2 вариант

1) Диск вращается с угловым ускорением -2рад/с2. Найдите время, в течении которого частота вращения изменяется от 240мин-1 до 90мин-1

А) 5 с
Б) 10,5 с
С) 12 с
Д) 7,85 с
Е) 4 с

2) Шарик массой 100г упал на горизонтальную площадку, имея в момент удара скорость 10м/с. Импульс шарика равен:

А) 1 кг*м/с
Б) 0,2 кг*м/с
С) 0,1 кг*м/с
Д) 2 кг*м/с
Е) 1,5 кг*м/с

3) Система отсчета является инерциальной, если лифт ...

А) поднимается ускоренно вверх
Б) поднимается замедленно вверх
С) поднимается равномерно вверх
Д) свободно падает
Е) опускается ускоренно вниз

4) Укажите формулу Стокса:

А) $S_1 v_1 = S_2 v_2 = const$

Б) $F = \eta \left| \frac{\Delta v}{\Delta x} \right| S$

С) $F = 6\pi\eta r v$

Д) $\frac{\rho v^2}{2} - \rho g h + p = const$

Е) $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t}$

5) Если при неупругом ударе тела одинаковой массы m двигались навстречу друг другу с одинаковой по модулю $|\vec{v}|$, то после удара:

А) Они стали двигаться в сторону первого тела со скоростью $\vec{v}$ Д
Б) Ничего не изменилось
С) Они стали двигаться в сторону второго тела со скоростью $\vec{v}$
Д) Они разлетелись в противоположные стороны со скоростью $\vec{v}$
Е) Они остановились

6) Какое из утверждений является верным для случая, когда механическая система является замкнутой?

А) Суммарный импульс системы остается постоянным
Б) Суммарный импульс системы равен нулю
С) Импульсы всех тел системы увеличиваются
Д) Импульсы всех тел системы уменьшаются
Е) Импульсы всех тел системы остаются неизменными

7) Какую мощность имеет двигатель насоса, поднимающего 20м^3 воды на высоту 6м за 10 минут:

А) 2 кВт
Б) 4 кВт
С) 200 кВт
Д) 6 кВт
Е) 8 кВт

8) Тело в поле тяготения описывает замкнутую траекторию. Какое выражение справедливо для суммарной работы А силы тяготения.

А) A>>0
Б) A=0
С) A>0
Д) A<0
Е) $A \to \infty$

9) Какова масса протона, летящего со скоростью 2,4*10^8 м/с. Массу покоя протона считать равной 1 а.е.м.

А) 2,18 а.е.м.
Б) 1,24 а.е.м.
С) 1,86 а.е.м.
Д) 1,67 а.е.м.
Е) 0,85 а.е.м.

10) Две силы F1=3 Н, F2=4 Н приложены к одной точке тела. Угол между векторами F1 и F2 равен $\frac{\pi}{2}$. Определить модуль равнодействующей этих сил.

А) $\sqrt{7}\,H$
Б) 7 Н
С) 1 Н
Д) $\sqrt{5}H$
Е) 5 Н

11) Тело движется под углом к горизонту. Какая из величин сохраняется при движении тела? Сопротивлением воздуха пренебречь.

А) Импульс тела
Б) Проекция импульса на вертикальное направление
С) Проекция импульса на горизонтальное направление
Д) Потенциальная энергия тела
Е) Кинетическая энергия тел

12) Полная энергия тела возросла на 1Дж. На сколько при этом изменится масса тела?

А) 35,5 кг
Б) 41,1 кг
С) 11,1 кг
Д) 5 кг
Е) 12,3 кг

13) Найдите неправильное утверждение силы инерции.

А) Не подчиняются второму закону Ньютона
Б) Не подчиняются третьему закону Ньютона
С) Их можно измерить динамометром
Д) Измеряются в Ньютона
Е) Действуют на систему отчета

14) Какие из ниже перечисленных свойств присущи твердым телам.

А) Постоянство объем
Б) Постоянство формы и объема
С) Постоянство объема и массы
Д) Постоянство длины и ширины
Е) Неизменность массы

15) Какая физическая величина является мерой инертности тела при вращательном движении:

А) момент импульс
Б) ускорение
С) момент инерции
Д) масс
Е) инертность отсутствует

16) Какая из формул выражает 2 закон Ньютона?

А) $a = \frac{v^2}{R}$
Б) $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$
С) $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$
Д) $\frac{\vec{a}_1}{\vec{a}_2} = \frac{m_2}{m_1}$
Е) $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$

17) Момент инерции шара, массой 2кг, относительно проходящей через центр масс равен 6кг·м2. Момент инерции этого шара относительно точки О, находящейся на расстоянии 5м от центра шара равен:

А) $56кг \cdot м^2$
Б) $34кг \cdot м^2$

С) $19кг \cdot м^2$

Д) $32кг \cdot м^2$

Е) $16кг \cdot м^2$

18) В однородном магнитном поле с индукцией B равномерно с угловой скоростью ω вращается рамка, содержащая N витков площадью S. Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции. Чему равна максимальная ЭДС индукции, возникающая в рамке?

А) $NBS\omega$

Б) NBS

С) $\frac{NDS\omega}{2}$

Д) $\frac{NDS}{2}$

Е) $NBS\cos\omega t$

19) В каких единицах измеряется момент пары сил:

А) Н

Б) Н*м

С) Вт

Д) кг

Е) Дж

20) Теорема Гюйгенса-Штейнера записывается в виде:

А) $I = I_c + ml^2$

Б) $\vec{I} = \frac{\vec{I}}{2} + mR^2$

С) $I = \frac{1}{2}mR^2 + mR^2$

Д) $\vec{I} = \vec{I}_c + m\vec{l}^2$

Е) $\vec{M} = J\vec{\varepsilon}$

21) Укажите формулу третьего закона Ньютона:

А) $\vec{F}_1 = k\frac{q^2}{r^2}$

Б) $\vec{F}_1 = \vec{F}_2$

С) $\vec{F} = m\vec{a}$

Д) $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$

Е) $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \sum \vec{F}$

22) Падающее тело отклоняется к востоку с точки зрения ИСО.

А) Потому, что действует сила Кориолиса

Б) Потому, что действует сила сопротивления воздуха

С) Потому, что действует сила Кулона

Д) Потому, что действует переносная сила инерции

Е) Потому, что вращается Земля

23) Энергия упругой деформации вычисляется по формуле:

А) $E = \kappa x^2$

Б) $E = mgh$

С) $E = \kappa x$

Д) $E = \frac{\kappa x^2}{2}$

Е) $E = \frac{mv^2}{2}$

24) Вектор нормального ускорения определяется по формуле:

А) $\vec{a}_n = \frac{\upsilon^2}{R}\vec{n}$

Б) $\vec{a}_n = \omega^2 r$

С) $\vec{a}_n = \frac{d^2 r}{dt^2}\vec{n}$

Д) $\vec{a}_n = \frac{\upsilon^2}{R}\vec{\tau}$

Е) $\vec{a}_n = \frac{d\overline{\upsilon}}{dt}$

25) Какой вид имеет зависимость силы тяготения двух тел от расстояния между ними? Тела считать материальными точками.

А) Линейная зависимость

Б) Сила тяготения обратно пропорциональна расстоянию

С) Сила тяготения обратно пропорциональна квадрату расстояния

Д) Сила тяготения не зависит от расстояния

Е) Прямая пропорциональная зависимость

3 вариант

1) На тело действует постоянный вращающий момент. Какие из перечисленных величин изменяются со временем по линейному закону?

А) Угловое ускорение
Б) Угловая скорость
С) Момент инерции
Д) Угол поворота
Е) Кинетическая энергия

2) Какой из примеров не является механической системой?

А) Солнечная система
Б) Рой комаров
С) Земля и Луна
Д) Два груза, соединенных пружиной
Е) Лошадь, тянущая телегу

3) Масса тела связана с его полной энергией соотношением:

А) $E = mc^2$

Б) $E = \frac{mv^2}{2}$

С) $\frac{mv^2}{2} + mgh$

Д) $E = \frac{p^2}{2m}$

Е) $E = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}$

4) Коэффициент трения μ

А) Это фундаментальная константа
Б) Зависит от вещества, из которого изготовлено тело и может принимать любое значение
С) Есть величина постоянная, зависящая только от угла наклонной плоскости
Д) Зависит от вещества, из которого изготовлено тело и не превышает 1.
Е) $\mu = 1$

5) Энергия упругой деформации вычисляется по формуле:

А) $E = mgh$

Б) $E = \frac{mv^2}{2}$

С) $E = \frac{Kx^2}{2}$

Д) $E = kx$

Е) $E = kx^2$

6) Какая из приведенных формул соответствует уравнению Бернулли?

А) $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t}$

Б) $S_1 v_1 = S_2 v_2 = const$

С) $\frac{\rho v^2}{2} + \rho g h + p = const$

Д) $F = \eta \left| \frac{\Delta v}{\Delta x} \right| S$

Е) $F = 6\pi\eta r v$

7) Кинетическая энергия тела массой 2 кг, движущегося со скоростью 4м/с равна:
А) 32 Дж
Б) 6,4 Дж
С) 4 Дж
Д) 8 Дж
Е) 16 Дж

8) Наиболее общее определение потенциальной энергии соответствует утверждению ...
А) энергия взаимодействия тел, зависящая от их взаимного расположения
Б) энергия упругой деформации
С) энергия гравитационного взаимодействия
Д) энергия тела, поднятого над Землей
Е) энергия консервативной системы

9) Консервативными называются силы:
А) которые не меняются при изменении состоянии систем
Б) работа которых не зависит от формы пути
С) не влияющие на состояние системы
Д) действующие в замкнутых системах
Е) работа которых зависит от формы пути

10) Угол поворота вращающегося тела задан уравнением $\phi = 0{,}5 - 2t^2$
Какому из приведенных условий соответствует движение тела?

А) $\frac{d\omega}{dt} < 0$

Б) $\omega = 0$

С) $\omega > 0$

Д) $\frac{d\omega}{dt} > 0$

Е) $\omega = const$

11) Тело массой 1000 кг движется по кругу с радиусом 75 м со скоростью 15 м/с. Сила, действующая на тело, равна:

А) 2700 Н
Б) 400 Н
С) 300 Н
Д) 3000 Н
Е) 2000 Н

12) Момент импульса материальной точки относительно некоторой неподвижной точки равен:

А) $\left[\vec{r}\vec{P}\right]$

Б) $\left[\vec{F}\vec{r}\right]$

С) $m\vec{V}$

Д) $\left[\vec{\omega}\vec{r}\right]$

Е) $\frac{m\vec{V}}{\sqrt{1-V^2/c^2}}$

13) По какой формуле определяется кинетическая энергия вращающегося тела?

А) $\vec{L} = \left[\vec{r}\vec{p}\right]$

Б) $J = J_0 + md^2$

С) $\vec{M} = \left[\vec{r}\vec{F}\right]$

Д) $\vec{M} = J\vec{\varepsilon}$

Е) $T = \frac{J\omega^2}{2}$

14) Момент силы относительно неподвижного центра вращения определяется по формуле:

А) $M = rF\cos\alpha$

Б) $\vec{M} = \left[\vec{F}, \vec{r}\right]$

С) $M = J\vec{\omega}$

Д) $\vec{M} = L\vec{\varepsilon}$

Е) $\vec{M} = \left[\vec{r}, \vec{F}\right]$

15) Кинетическую энергию поступательного движения можно вычислить по формуле:

А) $\frac{mv^2}{4}$

Б) $\frac{mp}{2v}$

С) $\frac{p^2}{2m}$

Д) $\frac{pv}{2m}$

Е) mgh

16) Найдите массу воды, поднявшейся по капиллярной трубке диаметром 0,5 мм. Поверхностное натяжение воды 73 мН/м.

А) 21,5 мг
Б) 11,7 мг
С) 5,56 мг
Д) 3 мг
Е) 15 мг

17) Прямолинейное движение материальной точки описывается уравнением $S = 2t^2 - 3t + 15, м$. Скорость точки через 2 с после начала движения равна:

А) 25 м/с
Б) 12,5 м/с
С) 21 м/с
Д) 8,5 м/с
Е) 37 м/с

18) Под действием постоянной силы F=10 Н тело движется прямолинейно так, что зависимость координаты x от времени описывается уравнением $x=At^2$. Чему равна масса тела, если постоянная $A=2м/с^2$

А) 2,5 кг
Б) 5 кг
С) 8 кг
Д) 2 кг
Е) 20 кг

19) Найдите теорему Штейнера:

А) $J = J_0 + md^2$

Б) $\vec{M} = \left[\vec{r}\vec{F}\right]$

C) $T = \frac{J\omega^2}{2}$

Д) $\vec{L} = [\vec{r}\vec{p}]$

Е) $\vec{M} = J\vec{\varepsilon}$

20) На тело массой 2 кг действуют две силы: F1=30 Н, F2=40 Н. Найти общее ускорение тела, если силы действуют под углом 90^0

А) $40м/с^2$

Б) $50м/с^2$

С) $2{,}5м/с^2$

Д) $25м/с^2$

Е) $5м/с^2$

21) Автомобиль, двигаясь равнозамедленно и имея начальную скорость υ_0=36 км/ч останавливается через время t=20 с. Найти ускорение автомобиля?

А) $a = 1{,}0м/с^2$

Б) $a = 1{,}8м/с^2$

С) $a = 0{,}5м/с^2$

Д) $a = -1{,}8м/с^2$

Е) $a = -0{,}5м/с^2$

22) Принцип эквивалентности утверждает, что ...

А) силы энерции компенсируют силы гравитации

Б) $m_{in} = m_{gr}$

С) вес тела равен нулю

Д) $m = const$

Е) силы энерции эквивалентны силам гравитации

23) Уравнение равноускоренного движения это:

А) $\vec{S} = \vec{v}_0 t + S_0 + \frac{\vec{a}t^2}{2}$

Б) $S = v_0 t$

С) $S = v_0 t + \frac{gt^2}{2}$

Д) $\vec{S} = \vec{S}_0 + \vec{v}_0 t - \frac{\vec{a}t^2}{2}$

Е) $\vec{S} = S + v_0 t - \frac{at^2}{2}$

24) Известна зависимость модуля скорости v частицы массы m от времени: $V = at + bt^2$ (А и Б – постоянные величины). Чему равна сила, действующая на частицу?

А) ma

Б) $m(a + 2bt)$

С) $2mbt$

Д) $m(at + bt^2)/2$

Е) $m(at + bt^2)$

25) Какая величина является мерой инерции при вращении твердого тела вокруг закрепленной оси.

А) Угловое ускорение

Б) Момент силы

С) Масса

Д) Момент инерции

Е) Импульс тела

4 вариант

1) Пуля массы m, летевшая горизонтально и имевшая скорость V_0 , пробивает тонкую доску. На вылете из доски скорость пули V. Чему равна работа A_{mp} силы трения, возникающая при прохождении пули в доске:

А) $\frac{mV^2}{2} - \frac{mV_0^2}{2}$

Б) $\frac{mV^2}{2} + \frac{mV_0^2}{2}$

С) $\frac{mV^2}{2}$

Д) $\frac{mV_0^2}{2}$

Е) 0

2) Тело массой $m_1 = 3кг$ движется со скоростью $\vartheta_1 = 2м/с$ и ударяется о неподвижное тело такой же массы. Количество теплоты, выделившееся при центральном и неупругом ударе, равно:

А) 1 Дж
Б) 3 Дж
С) 0,6 Дж
Д) 4 Дж
Е) 0,4 Дж

3) Какое соотношение определяет эквипотенциональную поверхность:

А) $\left|\vec{E}\right| = const$

Б) $\varphi = const$

С) $\vec{E} \cdot \Delta\vec{r} = const$

Д) $\frac{d\varphi}{dz} = const$

Е) $\vec{E} = const$

4) Во сколько раз изменится мощность, выделяемая на сопротивлении R, при постоянном напряжении на нем, если сопротивление увеличить от 10 до 20 Ом:

А) Увеличится в 4 раз
Б) Увеличится в 2 раз
С) Уменьшится в 2 раза
Д) Уменьшится в 4 раз
Е) Не изменится

5) Напряженность электростатического поля выражается в единицах:

А) $Н/Кл$

Б) $В/м^2$

С) $Н \cdot Кл$

Д) $В \cdot м$

Е) $Кл/м$

6) Расстояние между двумя точечными зарядами $q_1 = +8нКл$ и $q_2 = -6нКл$ равно 40 см. Напряженность поля в точке, лежащей посредине между зарядами равна:

А) 3600 В/м

Б) 2050 В/м

С) 4200 В/м

Д) 3150 В/м

Е) 1600 В/м

7) Емкость и индуктивность контура заменили другими, вдвое большими. Как изменится период колебаний контура?

А) Увеличится в 4 раз

Б) Уменьшится в 4 раз

С) Уменьшится в 2 раз

Д) Увеличится в 2 раз

Е) Не изменится

8) Три конденсатора одинаковой емкости соединены последовательно. Как изменится емкость батареи при параллельном соединении этих конденсаторов?

А) Увеличится в 3 раз

Б) Увеличится в 9 раз

С) Уменьшится в 9 раз

Д) Уменьшится в 3 раз

Е) Не изменится

9) Заряды $q_1 = 8Кл$ и $q_2 = -3Кл$.Находятся внутри замкнутой поверхности площадью 8 м^2. Поток вектора электрической индукции через эту поверхность равен:

А) 6 Кл

Б) 8 Кл

С) 12 Кл

Д) 16 Кл

Е) 10 Кл

10) Как изменится энергия плоского конденсатора, подключенного к источнику постоянного напряжения, при увеличении расстояния между пластинами в 2 раза?

А) Увеличится в 4 раз

Б) Увеличится в 2 раз

С) Не изменится

Д) Уменьшится в 4 раз

Е) Уменьшится в 2 раз

11) Как изменится потенциал, создаваемый зарядом в точке, если заряд увеличили в 2 раз?

А) Увеличится в 2 раз

Б) Уменьшится в 4 раз

С) Уменьшится в 2 раза

Д) Увеличится в 4 раз
Е) Не изменится

12) Конденсатор емкостью 0,02 мкФ соединили с источником тока, в результате чего он приобрел заряд $3*10^{-8}$ Кл. Определить значение напряженности поля между пластинами конденсатора, если расстояние между ними 5м.
А) 0,3 В/м
Б) 100В/м
С) 400В/м
Д) 50В/м
Е) 300В/м

13) Как и в какую сторону начнет двигаться протон, помещенный в вакууме в однородное электрическое поле?
А) Равномерно, против направления вектора напряженности
Б) Равномерно, по направлению вектора напряженности
С) Равноускоренно, против направления вектора напряженности
Д) Равноускоренно, по направлению вектора напряженности
Е) Перпендикулярно плоскости лист

14) В каких единицах выражается напряженность электростатического поля?
А) Н*Кл
Б) В*м
С) Н/Кл
Д) $В/м^2$
Е) Кл/м

15) В стеклянной пластинке (ε=7) площадью S=200 $см^2$ и толщиной Д=1 см создано однородное электрическое поле напряженностью Е=1000 В/м. определите объемную плотность энергии поля в пластинке.
А) $\approx 31 мкДж/м^3$
Б) $\approx 4,43 мкДж/м^3$
С) $\approx 62 мкДж/м^3$
Д) $\approx 21 мкДж/м^3$
Е) $\approx 8,86 мкДж/м^3$

16) Плоский конденсатор емкостью 0,02 мкФ соединили с источником тока, в результате чего он приобрел заряд 10^{-8} Кл. Определить расстояние между пластинами конденсатора, если напряженность поля между ними 100 В/м.
А) 0,02 м
Б) 5 м
С) 50 м
Д) 2,5 м
Е) 2000 мм

17) Какую кинетическую энергию приобретет электрон при перемещении между точками с разностью потенциалов 10 кВ. $e = -1{,}6 \cdot 10^{-19} Кл$

А) $3{,}2 \cdot 10^{-19} Дж$

Б) $1{,}6 \cdot 10^{-15} Дж$

С) $3{,}2 \cdot 10^{-15} Дж$

Д) $1{,}6 \cdot 10^{-17} Дж$

Е) $2 \cdot 10^{-20} Дж$

18) Найдите формулу закона Джоуля-Ленца?

А) $\vec{j} = \sigma \vec{E}$

Б) $IR = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{12}$

С) $I = \frac{U}{R}$

Д) $\varpi = \sigma E^2$

Е) $\varpi = \frac{ED}{2}$

19) С какой силой надо действовать на тело массой 1 кг, чтобы за 1 с увеличить его скорость в два раза при начальной скорости 1 м/с.

А) 1Н
Б) 0,1Н
С) 0,5Н
Д) 10Н
Е) 2Н

20) Провод сопротивлением 2 Ом сложили вдвое и включили в ту же цепь. Чему равно сопротивление этого участка?

А) 1 Ом
Б) 0,5 Ом
С) 2 Ом
Д) 4 Ом
Е) 0,25 Ом

21) Укажите закон Кулона в дифференциальной форме:

А) $div\vec{B} = 0$

Б) $\frac{\partial \rho}{\partial t} + div\vec{j} = 0$

С) $\vec{j} = \sigma \vec{E}$

Д) $J = \frac{U}{R}$

Е) $div\vec{E} - \frac{\rho}{\varepsilon_0} = 0$

22) Электрический момент диполя, заряды которого соответственно равны $\pm 2*10^{-15} Кл$ и удалены друг от друга на расстояние $2,5*10^{-3} м$, равен:

А) $2,2 \cdot 10^{-22} Кл \cdot м$

Б) $1,25 \cdot 10^{-17} Кл \cdot м$

С) $5 \cdot 10^{-18} Кл \cdot м$

Д) $10^{-17} Кл \cdot м$

Е) $0,8 \cdot 10^{-12} Кл / м$

23) Как изменится энергия конденсатора, если удвоить расстояние между его пластинами? Конденсатор был заряжен и отключен от источника напряжения.

А) Увеличится в 2 раза
Б) Увеличится в 4 раза
С) Уменьшится в 2 раза
Д) Уменьшится в 4 раза
Е) не изменится

24) Почему газ при нормальных условиях является хорошим изолятором?

А) Носители токов находятся в непрерывном хаотическом тепловом движении
Б) Носители токов разных знаков компенсируют друг друга
С) Скорость ионизации равна скорости рекомбинации
Д) Отсутствуют носители тока
Е) Отсутствуют носители тока

25) К проводнику с током приблизили магнитную стрелку. Как поведет она себя?

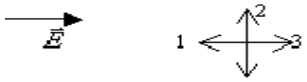
А) Повернется на некоторый угол
Б) Оттолкнется
С) Останется без изменении
Д) Оттолкнется и повернется на некоторый угол
Е) Притянется

5 вариант

1) Начальная скорость заряженной частицы составляет угол $\alpha=90^0$ с линиями индукции однородного магнитного поля. Частица движется ...

А) по эллипсу
Б) по винтовой линии
С) по прямой
Д) по параболу
Е) по окружности

2) Вектор напряженности электрического поля направлен так, как показано на рис.
В каком направлении потенциал уменьшается?



А) 1
Б) 2
С) 3
Д) 4
Е) Перпендикулярно плоскости лист

3) Два конденсатора одинаковой емкости соединены последовательно. Как изменится емкость батарей при параллельном соединении этих конденсаторов?

А) Увеличится в 4 раза
Б) Увеличится в 2 раза
С) Уменьшится в 2 раза
Д) Уменьшится в 4 раза
Е) Не изменится

4) Сопротивление внешней цепи R изменяется от 0 до ∞. Как при этом изменится полезная мощность?

А) Убывает, достигает минимума, затем возрастает
Б) Монотонно возрастает
С) Монотонно убывает
Д) Возрастает, достигает максимума, затем убывает
Е) Не изменяется

5) Вольтметр, подсоединенный к источнику тока с ЭДС E=52 В и внутренним сопротивлением r=20 Ом, показывает U=50 В. Сопротивление вольтметра равно:

А) 100 Ом
Б) 50 Ом
С) 10 Ом
Д) 500 Ом
Е) 20 Ом

6) Как и в какую сторону начнет двигаться протон, помещенный в вакууме в однородное электрическое поле?

А) Равноускоренно, по направлению вектора напряженности
Б) Равноускоренно, против направления вектора напряженности
С) Равномерно, по направлению вектора напряженности
Д) Равномерноо, против направления вектора напряженност
Е) Перпендикулярно плоскости лист

7) Энергия заряженного конденсатора определяется по формуле:

А) $\frac{U^2}{2C}$

Б) $\frac{2}{qU}$

С) $\frac{CU^2}{2}$

Д) $\frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$

Е) $\frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}$

8) При параллельном соединении двух проводников сопротивлениями R_1 и R_2 общее сопротивление равно:

А) $\frac{R_1 + R_2}{2}$

Б) $R_1 + R_2$

С) $\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$

Д) $\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

Е) $\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

9) Какая физическая величина определяется выражением $\sqrt{\frac{2W}{C}}$

(W-энергия заряженного конденсатора, С-электроемкость конденсатора).

А) Заряда
Б) Сила тока
С) Напряженности
Д) Плотность энергии
Е) Разность потенциалов

10) Сила тока в проводнике меняется по закону I=4+2t, где I выражено в Амперах и t в секундах. Заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за 4 сек, равен:

А) 16 Кл
Б) 18 Кл
С) 32 Кл
Д) 48 Кл
Е) 42 Кл

11) Электрическая лампа мощностью 36 Вт рассчитана на напряжение 12 В. Сопротивление лампы и рабочий ток равны:

А) J=3 А, R=4 Ом
Б) J=6 А, R=4 Ом
С) J=4 А, R=6 Ом
Д) J=3 А, R=6 Ом
Е) J=4 А, R=3 Ом

12) Лодка стоит неподвижно в стоячей волне. Человек, находящийся в лодке, переходит с носа на корму. На какое расстояние сдвинется лодка, если масса человека 60 кг, масса лодки 120 кг, длина лодки 3 м? Сопротивлением воды пренебречь.

А) 2 м
Б) 0,5 м
С) 1,5 м
Д) 1 м
Е) 0,8 м

13) Электрический момент диполя, заряды которого соответственно равны $\pm 2*10^{-15} Кл$ и удалены друг от друга на расстояние $2,5*10^{-3} м$ равен:

А) $2,2 \cdot 10^{-22} Кл \cdot м$
Б) $1,25 \cdot 10^{-17} Кл \cdot м$
С) $10^{-17} Кл \cdot м$
Д) $0,8 \cdot 10^{-12} Кл/м$
Е) $5 \cdot 10^{-18} Кл \cdot м$

14) Какая величина выражается формулой $\sqrt{\frac{kq}{\varepsilon E}}$ (Е – напряженность электростатического поля, создаваемого точечным зарядом q в среде с диэлектрической проницаемостью ε, к-постоянная в законе Кулона)

А) Энергия
Б) Расстояние
С) Электрическая постоянная
Д) Электроемкость
Е) Потенциал

15) Как изменится емкость металлического шара, если его радиус увеличить в 5 раз и поместить в диэлектрик с ε=2

А) Уменьшится в 2,5 раз
Б) Увеличится в 10 раз
С) Уменьшится в 10 раз
Д) Увеличится в 2,5 раз
Е) Не изменится

16) Какое из приведенных выражений определяет напряженность электростатического поля бесконечной заряженной нити в вакууме:

А) $\tau/(2\pi\varepsilon_0 r)$

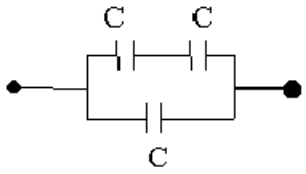
Б) $\sigma/(2\varepsilon_0)$

С) $q/(4\pi\varepsilon_0 r)$

Д) σ/ε_0

Е) $q/(4\pi\varepsilon_0 r^2)$

17) Определить общую электроемкость:



А) 4/3С
Б) 2,5С
С) 1,5С
Д) 3С
Е) 2/3С

18) Формула емкости полного конденсатора имеет вид:

А) $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$

Б) $C = \frac{\varepsilon d}{S}$

С) $C = \frac{S}{\varepsilon_0 \varepsilon d}$

Д) $C = \frac{\varepsilon_0 S}{\varepsilon d}$

Е) $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon d}{S}$

19) Укажите закон Ома в электролитах:

А) $j = \beta \vec{E}$

Б) $j = \beta(\vec{E} + \vec{E}_{стр})$

С) $j = n_0 q(b_+ + b_-)\vec{B}$

Д) $j = Ned$

Е) $j = nq\alpha(b_+ + b_-)\vec{E}$

20) Из провода изготовлена катушка длиной 6,28 см радиусом 1 см. Она содержит 200 витков и по ней проходит ток 1 А. Магнитный поток внутри катушки равен:

А) $6{,}28 \cdot 10^{-7}$ Вб

Б) $12{,}56 \cdot 10^{-6}\,Вб$

С) $3{,}14 \cdot 10^{-6}\,Вб$

Д) $12{,}56 \cdot 10^{-7}\,Вб$

Е) $125{,}6 \cdot 10^{-6}\,Вб$

21) Вращающий момент, действующий на контур с током в магнитном поле, вычисляется по формуле:

А) $M = Fr\sin\alpha$

Б) $M = p_m I \sin\alpha$

С) $M = IB\sin\alpha$

Д) $M = p_m B \sin\alpha$

Е) $M = FB\sin\alpha$

22) Прямоугольная катушка из 1000 витков со сторонами 5 и 4 находится в однородном магнитном поле индукцией 0,5 Тл. Сила тока в катушке 2 А. Максимальный вращающий момент, действующий на катушку равен:

А) $2 \cdot 10^{-3}\,Н \cdot м$

Б) $2Н \cdot м$

С) $10^{-3}\,Н \cdot м$

Д) $20Н \cdot м$

Е) $1Н \cdot м$

23) Коэффициент мощности в цепи переменного тока максимален, если

А) 3,4 1. В цепи только индуктивная нагрузка.

Б) 3 2. В цепи только емкостная нагрузка.

С) 1,2 3. Емкостное и индуктивное сопротивления равны

Д) 4 4. В цепи только активное сопротивление

Е) 1

24) Магнитный поток внутри контура площадью 30 см^2, расположенного перпендикулярно полю, равен 0,6 мВб. Индукция поля внутри контура равна ...

А) 2 Тл

Б) 0,5 Тл

С) 0,2 Тл

Д) 5 Тл

Е) 0,02 Тл

25) Прямой провод длиной 0,1 м, по которому течет ток силой 10 А, находится в однородном магнитном поле с индукцией 0,02 Тл. Найти угол между направлениями вектора магнитной индукции и тока, если на провод действует сила F=10 мН.

A) 90^0

Б) 45^0

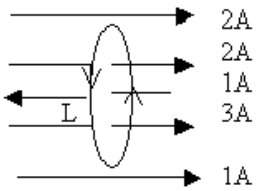
С) 60^0

Д) 0^0

Е) 30^0

6 вариант

1) Чему равна циркуляция вектора напряженности магнитного поля вдоль контура L, охватывающего 3 и 5 проводников с током? Величины и направления токов в проводниках указаны на рисунке:



А) 5А
Б) 4А
С) -7А
Д) -6А
Е) 7А

2) Чему равна ЭДС самоиндукции в катушке с индуктивностью 2 Гн, если сила тока в ней за 0,1 с равномерно уменьшилась от 5 А до 3 А.

А) 0,4 В
Б) 20 В
С) 10 В
Д) 100 В
Е) 40 В

3) Что произойдет с индуктивностью бесконечного соленоида при его заполнении однородным изотропным магнетиком с проницаемостью μ

А) Увеличится в μ раз
Б) Уменьшится в μ^2 раз
С) Уменьшится в μ раз
Д) Увеличится в μ^2 раз
Е) Не изменится

4) Как изменится радиус кривизны траектории движения заряженной частицы в масс-спектрографе при увеличении в 3 раза скорости частицы и уменьшении в 3 раза индукции магнитного поля?

А) Уменьшится в 9 раз
Б) Увеличится в 3 раз
С) Увеличится в 9 раз
Д) Уменьшится в 3 раз
Е) Не изменится

5) Определить магнитный поток через поверхность витка площадью 2 м^2, если линии индукции магнитного поля параллельны плоскости, модуль индукции 2 Тл.

А) 16 Вб
Б) 6 Вб
С) 0
Д) 4 Вб
Е) 8 Вб

6) Напряженность и индукция магнитного поля связаны соотношением:

А) $D = \frac{\vec{H}}{\mu\mu_0}$

Б) $\vec{B} = \dfrac{\vec{H}}{\mu\mu_0}$

С) $\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$

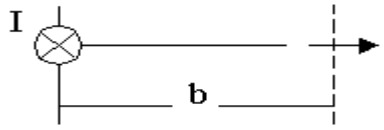
Д) $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$

Е) $\vec{D} = \dfrac{\vec{E}}{\varepsilon\varepsilon_0}$

7) Основным элементом магнитостатики является:
А) Элементарный ток
Б) Поверхностный ток
С) Элементарный заряд
Д) Линейный ток
Е) Электрический диполь

8) Укажите единицу измерения энергии:
А) А
Б) Вт
С) Гн
Д) Дж
Е) В

9) Магнитная стрелка и бесконечно длинный провод расположены перпендикулярно друг другу на расстоянии Б , значительно большем длины стрелки. Что произойдет с магнитной стрелкой, если по проводу пропустить ток I в направлении "за чертеж".
А) Останется в прежнем положении
Б) Повернется на угол π по часовой стрелке
С) Повернется на угол $\dfrac{\pi}{2}$ против часовой стрелки
Д) Повернется на угол π против часовой стрелки
Е) Повернется на угол $\dfrac{\pi}{2}$ по часовой стрелке



10) Укажите формулу закона Био-Савара-Лапласа:
А) $\vec{B} = \dfrac{\mu_0}{4\pi}\dfrac{q[\vec{v}\vec{r}]}{r^3}$

Б) $B = \mu_0\dfrac{1}{2\pi r}$

С) $B = \mu_0 nI$

Д) $B = \mu_0\dfrac{I}{2r}$

E) $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I\left|d\vec{l} \cdot \vec{r}\right|}{r^3}$

11) Какое из приведенных уравнений Максвелла отражает тот факт, что в пространстве, где изменяется магнитное поле, возникает вихревое электрическое поле:

А) $\oint_L \vec{E} d\vec{e} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$

Б) $\oint_S \vec{D} d\vec{S} = 0$

С) $\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$

Д) $\vec{j} = \gamma \vec{E}$

Е) $\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S (\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) d\vec{S}$

12) Напряженность электрического поля с ε=1,5 составляет 30 МВ/м. Индукция этого поля равна:

А) $0{,}27 мКл/м^2$

Б) $0{,}32 Кл/м^2$

С) $0{,}4 мКл/м^2$

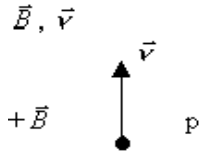
Д) $6 Кл/м^2$

Е) $0{,}4 мКл/м^2$

13) Магнитный поток через поверхность, ограниченную замкнутым проводящим контуром, увеличивается прямо пропорционально времени. Что можно сказать о силе индукционного тока, возникающего в этом контуре?

А) В контуре возникает переменный ток
Б) Сила тока равномерно убывает
С) Сила тока увеличивается прямо пропорционально времени
Д) Сила тока равна нулю
Е) Сила тока постоянна

14) В магнитном поле с индукцией движется протон со скоростью. Найдите направление силы, действующей на протон?



А) Вниз
Б) Влево
С) Вправо
Д) Вверх
Е) Перпендикулярно плоскости листа "к нам" или "от нас"

15) Двухвалентный ион движется со скоростью 480 км/ч в однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл и описывает окружность радиусом 10 см. Масса иона равна:

А) $1{,}54 \cdot 10^{-15} кг$

Б) $6{,}7 \cdot 10^{-27} кг$

С) $6{,}7 \cdot 10^{-25} кг$

Д) $7{,}7 \cdot 10^{-16} кг$

Е) $3{,}3 \cdot 10^{-27} кг$

16) Единица напряженности магнитного поля:

А) А/м
Б) Н/А
С) Тл
Д) Вб
Е) Вс/А

17) Как изменится энергия магнитного поля контура при увеличении силы тока в 4 раз?

А) Уменьшается в 4 раза
Б) Увеличивается в 4 раза
С) Уменьшается в 2 раза
Д) Увеличивается в 16 раз
Е) Увеличивается в 2 раза

18) На проводник с током 1,5 А, помещенный в однородное магнитное поле индукцией 4 Тл, действует сила 10 Н. Проводник расположен под углом 45^0 к линиям магнитной индукции. Длина активной части проводника равна:

А) 4,67 м
Б) 0,42 м
С) 2,38 м
Д) 10,7 м
Е) 5,34 м

19) Ферромагнетики – это магнетики, у которых магнитная восприимчивость ...

А) положительна и мала по величине
Б) отрицательна и мала по абсолютной величине
С) отрицательна и достигает по абсолютной величине больших значений
Д) положительна и достигает очень больших значений
Е) то положительна, то отрицательна в зависимости от молекулярного строения вещества

20) Плоский контур площадью 50 $см^2$ пронизывает поток 2 мВб при индукции поля 0,4 Тл. Угол между плоскостью контура и направлением поля равен:

А) 45^0

Б) 60^0

С) 0^0

Д) 30^0

Е) 90^0

21) Какой из перечисленных законов выражает второе уравнение Максвелла? $\oint_L \vec{H}d\vec{l} = \int_S (\vec{j} + \frac{\partial D}{\partial t})d\vec{S}$

А) Закон полного тока
Б) Закон Кулона
С) Теорему Гаусса
Д) Закон электромагнитной индукции
Е) Закон Био-Савара-Лапласа

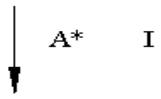
22) Линия индукции магнитного поля – это ...

А) линия, идущая от точки с меньшим значением индукции к точке с большим значением
Б) линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением вектора магнитной индукции в этой точке
С) линия, соединяющая точки магнитного поля с одинаковыми по величине значениями индукции
Д) линия, идущая от точки с большим значением к точке с меньшим значением индукции поля
Е) линия, соединяющая северный и южный полюса магнита

23) По круговому витку радиусом 40 см циркулирует ток 4 А. Магнитная индукция в центре витка равна:

А) $31{,}7 \cdot 10^{-7}\ Тл$
Б) $40 \cdot 10^{-7}\ Тл$
С) $20 \cdot 10^{-7}\ Тл$
Д) $62{,}8 \cdot 10^{-7}\ Тл$
Е) $133{,}6 \cdot 10^{-7}\ Тл$

24) По бесконечно длинному прямолинейному проводу течет ток силой I. Найдите направление вектора магнитной индукции в точке А.



А) Вектор перпендикулярен плоскости листа и направлен "к нам"
Б) Вектор перпендикулярен плоскости листа и направлен "от нас"
С) Вектор направлен вправо или влево
Д) Вектор направлен вниз
Е) Вектор направлен вверх

25) В катушке индуктивностью 0,7 Гн сила тока равна 100 А. Энергия магнитного поля катушки равна:

А) 3,5 кДж
Б) 4,9 Дж
С) 70 Дж
Д) 35 Дж
Е) 7 Дж

7 вариант

1) Специальная теория относительности основана на двух постулатах:
А) принцип относительности и постоянство скорости света в вакууме
Б) постоянство скорости света и равномерность времени
С) постоянство массы и скорости света в вакууме
Д) постоянство массы и скорости света в вакууме и полной энергии
Е) принцип относительности и равномерность времени

2) Электрические колебания в колебательном контуре заданы уравнением $Vg = 10^{-2}\cos 20t$. Чему равна амплитуда колебаний заряда?
А) $Sin20t\ Kn$
Б) $20t\ Kn$
С) $10^{-2}\ Kn$
Д) $Cos20tKF$
Е) $20Kn$

3) Колебания источника волн описывается уравнением $y = 0.08\cos \pi t, м$. Скорость распространения колебаний 3 м/с. Смещение точки среды, находящейся на расстоянии 0,75 м от источника в момент времени 0,5 с равно:
А) 0,08
Б) 0,04
С) $0{,}04\sqrt{2}$
Д) 0,24
Е) 0,06

4) Чему равен период незатухающих гармонических колебаний, если дифференциальное уравнение этих колебаний имеет вид $\ddot{x} + 0{,}25\pi^2 x = 0$
А) $0{,}25\pi^2 c$
Б) 2
С) 0,5
Д) $0{,}5\pi c$
Е) 4

5) Колебания в электромагнитном контуре не возникают, если
А) $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$
Б) $R < 2\sqrt{\frac{C}{L}}$

С) $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$

Д) $R < 2\sqrt{LC}$

Е) $R = 0$

6) Материальная точка совершает гармоническое колебание, описываемое уравнением $x = A\sin\frac{\pi}{6}t$. Чему равен период этих колебаний:

А) $T = \frac{1}{6}c.$

Б) $T = \frac{6}{\pi}c.$

С) $T = 3c.$

Д) $T = 12c.$

Е) $T = 6.$

7) От чего зависит частота собственных незатухающих колебаний?
А) От времени
Б) От амплитуды колебаний
С) От энергии, сообщенной системе
Д) От свойств (параметров) системы
Е) От фазы колебаний

8) Резонанс разряжений возникает в цепи.
А) С последовательно соединенными R,C
Б) С параллельно соединенными L,C.
С) С последовательно соединенными R,L,C
Д) С последовательно соединенными R,L
Е) С параллельно соединенными R,L,C

9) Формула циклической частоты колебаний в колебательном контуре имеет вид:

А) $\omega = \frac{2\pi}{\sqrt{LC}}$

Б) $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

С) $\omega = \sqrt{LC}$

Д) $\omega = \frac{1}{2\pi}$

Е) $\omega = 2\pi\sqrt{LC}$

10) Волны, длина которых равна 10 см, отражаясь от преграды, образуют стоячую волну. Чему равно расстояние между соседними пучностями?

А) 20 см
Б) 5см
С) 2,5 см
Д) 10 см
Е) 25 см

11) Тело массой 1 кг совершает свободные колебания по закону $x = 2\cos 3t, м$. По какому закону изменяется кинетическая энергия этого тела?

А) $18\sin^2 3t$

Б) $2\cos 3t$

С) $6\cos^2 3t$

Д) $18\cos^2 3t$

Е) $6\sin^2 3t$

12) Сила тока в проводнике меняется со временем по закону $I = I_0 \sin(\omega t)$. Заряд, протекающий через поперечное сечение проводника за половину периода T при начальной силе тока $I_0 = 10F$ и циклической частоте $\omega = 50\pi c^{-1}$ равен:

А) 0,252 Кл
Б) 0,08 Кл
С) 0,063 Кл
Д) 0,5 Кл
Е) 0,126 Кл

13) Какова связь между добротностью колебательной системы и ее логарифмическим декрементом?

А) $Q = \pi\lambda$

Б) $Q = \frac{\pi}{\lambda}$

С) $Q = \pi N$

Д) $Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$

Е) $Q = 2\pi \frac{W(t)}{W(t) - W(t+T)}$

14) Уравнение колебаний источника волн $x = 2\sin 100\pi t$.Модуль скорости распространения колебаний в среде 400 м/с. Чему равна длина волны?

А) 8 м

Б) 4 м

С) $4\pi\ м$

Д) $2\pi м$

Е) $\frac{\pi}{2} м$

15) Поперечная волна с частотой 200 Гц распространяется в среде со скоростью 400 м/с вдоль направления х. Разность фаз колебаний точек среды, расстояние между которыми $\Delta x = 1 м$ равен:

А) $\frac{\pi}{2} рад$

Б) $\frac{\pi}{4} рад$

С) $\frac{\pi}{3} рад$

Д) $\pi\ рад$

Е) 2π

16) Математический маятник имел период колебаний T_0 .Его длину увеличили в n раз. Определите период колебаний.

А) $n^2 T_0$

Б) $\frac{T_0}{\sqrt{n}}$

С) $\frac{T_0}{n}$

Д) $n T_0$

Е) $\sqrt{n} T_0$

17) Колебательный контур содержит конденсатор электроемкостью 50 нФ и катушку индуктивностью $\frac{5}{4\pi^2}\ мкГн$. Определите длину волны излучения.

А) 30 м

Б) 300 м

С) 1,5 м

Д) 843 м
Е) 150 м

18) Уравнение колебаний имеет вид: $x = 5\cos(6\pi t + 8)$. Период колебаний равен:

А) $T = 16\pi c$

Б) T=1/16

С) $T = 10\pi c$

Д) T=1/8c

Е) $T = 8\pi c$

19) Уравнение колебаний источника волн...Модуль скорости распространения колебаний в среде 400 м/с. Чему равна длина волны?

А) 8 м
Б) 4 м

С) $4\pi\ м$

Д) $\frac{\pi}{2} м$

Е) $2\pi\ м$

20) К ободу однородного диска радиусом R приложена постоянная касательная сила F. При вращении на диск действует момент сил трения $M_{тр}$. Найти массу диска, если он вращается с постоянным ускорением ε

А) $m = \frac{2F}{\varepsilon R}$

Б) $m = \frac{2(FR - M_{тр})}{\varepsilon R^2}$

С) $m = \frac{2(M_{тр})}{\varepsilon R^2}$

Д) $m = \frac{2(FR + M_{тр})}{\varepsilon R^2}$

Е) $m = \frac{2F}{\varepsilon R^2}$

21) В однородной изотропной среде с ε=2 и μ=1 распространяется плоская электромагнитная волна. Определите ее фазовую скорость.

А) $1{,}73 \cdot 10^8 м/с$

Б) $2{,}1 \cdot 10^8 м/с$

С) $3 \cdot 10^8 м/с$

Д) $1 \cdot 10^8 м/с$

Е) $3{,}46 \cdot 10^8 м/с$

22) Пружинный маятник имел период колебаний. Жесткость пружины уменьшили в n раз. Определите период колебаний. T_0

А) $\frac{T_0}{\sqrt{n}}$

Б) $\sqrt{n}T_0$

С) $n^2 T_0$

Д) $\frac{T_0}{n}$

Е) $n T_0$

23) Тело, массой 16 кг закреплено на пружине с жесткостью к=100 Н/м. Найти частоту собственных колебаний?

А) $\omega_0 = 1{,}9 c^{-1}$

Б) $\omega_0 = 0{,}9 c^{-1}$

С) $\omega_0 = 2{,}5 c^{-1}$

Д) $\omega_0 = 3{,}3 c^{-1}$

Е) $\omega_0 = 1{,}1 c^{-1}$

24) Амплитуда световой волны в произвольной точке М:

А) $A = \frac{A_1}{2} - \frac{A_м}{2}$

Б) $A = \frac{A_1}{2} + A$

С) $A = \frac{A_1}{2} + \frac{A_2}{2}$

Д) $A = A_1 - A_2 + A_3$

Е) $A = \frac{A_1}{2}$

25) При отклонении физического маятника от положения равновесия возникает вращающий момент:

А) $M = Kx\sin\varphi$

Б) $M = F \cdot r$

С) $M = -mgL\sin\varphi$

Д) $M = LJ$

Е) $M = mg$

8 вариант

1) Какие из ниже перечисленных волн являются поперечными:
А) 2 и 4 2.Волны на поверхности воды
Б) 1 и 3 и 4 1.Электромагнитные волны.
С) 2 3.Звуковые волны в газах.
Д) 1 4.Звуковые волны в жидкостях
Е) 3 и 2

2) Тело m=5 кг движется по закону $S = A\sin\omega t$, где A=5 см и $\omega = \pi\, рад/с$. Найти силу, действующая на тело через 1/6 после начала движения:
А) 0,8 Н
Б) -1,23 Н
С) 1,23 Н
Д) -1,8 Н
Е) 1,8 Н

3) Чему равен коэффициент затухания электрических колебаний, если дифференциальное уравнение этих колебаний имеет вид $\ddot{q} + 0{,}3\dot{q} + 4\pi^2 q = 0$
А) $0{,}15c^{-1}$
Б) $2\pi c^{-1}$
С) $2\pi^2 c^{-1}$
Д) $0{,}3c^{-1}$
Е) $4\pi^2 c^{-1}$

4) Колебание точки описывается уравнением $x = 1 + 2\sin(4\pi t + \varphi_0)$.Определите расстояние между двумя крайними положениями точки.
А) 6
Б) 8
С) 4
Д) 8π
Е) $2\varphi_0$

5) В опыте Юнга отверстия освещались монохроматическим светом с длиной волны $6\cdot10^{-5} см$, расстояние между отверстиями 1 мм и расстояние от отверстий до экрана 3 м. Найти положение первой светлой полосы.
А) 1,3 мм
Б) 1,6 мм
С) 2,4 мм
Д) 1,8 мм
Е) 0,8 мм

6) Показатель преломления вещества равен 2. Найдите скорость света в этом веществе?

$$c = 3\cdot10^8 м/с$$

А) $1{,}8 \cdot 10^8 м/с$

Б) $1{,}4 \cdot 10^8 м/с$

С) $1{,}2 \cdot 10^8 м/с$

Д) $1{,}6 \cdot 10^8 м/с$

Е) $1{,}5 \cdot 10^8 м/с$

7) Для перехода электрона из нижней зоны в соседнюю верхнюю зону, как известно, необходимо затратить энергию. Чему должна быть равна эта энергия?

А) Ширине и длине запрещенной зоны
Б) Длине разрешенной зоны
С) Длине запрещенной зоны
Д) Ширине разрешенной зоны
Е) Ширине запрещенной зоны

8) Условие интерференции волн.

А) Волны должны быть когерентными
Б) Волны должны иметь одинаковую частоту
С) Сложение любых волн
Д) Волны должны иметь одинаковую фазу
Е) Волны должны иметь одинаковую скорость

9) Сколько штрихов на каждый миллиметр содержит дифракционная решетка, если при наблюдении в монохроматическом свете (λ=0,6) максимум пятого порядка отклонен на угол 18^0. $\sin 18^0 = 0{,}309$

А) 11
Б) 14
С) 98
Д) 10
Е) 10

10) При падении света с длиной волны 0,5 мкм на дифракционную решетку третий дифракционный максимум наблюдается под углом 30^0. Постоянная дифракционной решетки равна:

А) 2 мк
Б) 3 мк
С) 6 мк
Д) 4 мк
Е) 5 мк

11) С помощью собирающей линзы получили изображение светящейся точки. Чему равно фокусное расстояние линзы, если Д=0,5 м, f=1 м.

А) 0,5 м
Б) 2 м
С) 1,5 м
Д) 0,33 м
Е) 3 м

12) Найти абсолютное значение оптической силы собирающей линзы, фокусное расстояние которой равно 20 см.

А) 20 дптр
Б) 5 дптр
С) 0,2 дптр
Д) 2 дптр
Е) 0,05 дптр

13) Выберите правильное утверждение.

А) Результирующая амплитуда от бесконечного числа зон Френеля равна половине амплитуды, создаваемой первой зоной Френеля
Б) Если открыты только две первые зоны Френеля, то в точке наблюдения Р будет светлое пятно
С) Если экран закрывает только две первые зоны Френеля, то в точке наблюдения Р будет темное пятно
Д) Амплитуда, создаваемая первой зоной Френеля, примерно равна результирующей амплитуде от бесконечного числа зон Френеля
Е) Если экран закрывает только первую зону Френеля, то в точке наблюдения Р будет темное пятно

14) Во сколько раз уменьшается интенсивность естественного света при прохождении через один николь?

А) в 2 раза
Б) $в\ 2\sqrt{2}\quad раз$
С) $в\ \sqrt{2}\ раз$
Д) в 3 раза
Е) в 4 раза

15) Незаряженная изолированная от других тел металлическая пластина освещается ультрафиолетовым светом. Заряд, какого знака будет иметь эта пластинка в результате фотоэффекта?

А) Отрицательный
Б) Пластина не заряжается
С) Положительный
Д) Знак заряда может быть различным
Е) Зависит от условий проведения эксперимента

16) Какая из формул определяет кинетическую энергию тела?

А) mc^2
Б) $\frac{xx^2}{2}$
С) mgh
Д) $\frac{Li^2}{2}$

E) $\frac{m\upsilon^2}{2}$

17) Волны называются когерентными, если ...
А) они имеют одинаковую скорость и частоту
Б) они имеют одинаковую частоту и одинаковую фазу
С) они имеют одинаковую частоту и постоянную разность фаз
Д) они монохроматические
Е) они продольные

18) На каком расстоянии от линзы находиться изображение, если расстояние от предмета до собирающей линзы равна А=2?
А) 2f
Б) f/3
С) f/2
Д) 3f
Е) 2/3f

19) В среде ε=2 и μ=1 вдоль оси х распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности магнитного поля волны равна 1 мА/м. Чему равна амплитуда напряженности электрического поля?
А) 0,1 В/м
Б) 1 В/м
С) 0,38 В/м
Д) 0,27 В/м
Е) 0,53 В/м

20) Вычислите световой поток, проходящий через поверхность, равную 20 $см^2$ и отстоящую на 5 м от источника света силой 100 кд при перпендикулярном падении лучей.
А) 80 лм
Б) 8000 лм
С) 200 лм
Д) 0,008 лм
Е) 2000 лм

21) Найти абсолютное значение оптической силы собирающей линзы, фокусное расстояние которой равно 20 см.
А) 5 дптр
Б) 20 дптр
С) 0,05 дптр
Д) 2 дптр
Е) 0,2 дптр

22) При падении света с длиной волны 0,5 мкм на дифракционную решетку третий дифракционный максимум наблюдается под углом 30^0. Постоянная дифракционной решетки равна:
А) 6 мк
Б) 4 мк
С) 5 мк
Д) 2 мк

Е) 3 мк

23) В опыте с зеркалами Френеля расстояние между мнимыми изображениями источника света было равно 0,5 мм. Расстояние до экрана 5 м. В зеленом свете получились интерференционные полосы на расстоянии 5 мм друг от друга. Найти длину волны зеленого света?

А) 0,7 мкм
Б) 0,75 мкм
С) 0,5 мкм
Д) 0,45 мкм
Е) 0,4 мкм

24) Разность хода двух когерентных волн, излученных когерентными источниками с одинаковой начальной фазой до данной точки равна целому числу длин волн. Чему равна амплитуда А результирующего колебания в этой точке, если амплитуда колебаний в каждой волне равна

А) A=2/3a
Б) A=2a
С) A=3a
Д) A=a/2
Е) A<A<2A

25) Каким должен быть угол падения светового луча, чтобы отраженный луч составлял с падающим лучом 50^0?

А) 40^0
Б) 25^0
С) 35^0
Д) 50^0
Е) 100^0

9 вариант

1) При изменении частоты света, падающего на фотоэлемент, задерживающая разность потенциалов увеличилась в 2 раза. Как изменилась максимальная скорость фотоэлектронов?

А) Уменьшилась в 2 раза
Б) Увеличилась в 2 раза
С) Увеличилась в $\sqrt{2}$ раз
Д) Уменьшилась в $\sqrt{2}$ раз
Е) Не изменилась

2) При какой разности фаз складываемых колебаний при интерференции будет наблюдаться минимум амплитуды (n=0,1,3...)?

А) $\Delta\varphi = \pm(2n+1)\pi$

Б) $\Delta\varphi = \pm(2n+1)\frac{\pi}{4}$

С) $\Delta\varphi = \pm 2\pi n$

Д) $\Delta\varphi = 0$

Е) $0 < \Delta\varphi < \frac{\pi}{4}$

3) Каким должен быть угол падения светового луча, чтобы отраженный луч составлял с падающим лучом 50^0?

А) 50^0
Б) 20^0
С) 100^0
Д) 40^0
Е) 25^0

4) Радиус третьей зоны Френеля для плоского волнового фронта ($\lambda = 0,6 мкм$) для точки, находящейся на расстоянии Б=1 м от фронта волны равен:

А) 1,45 мм
Б) 2,43 мм
С) 0,64 мм
Д) 1,13 мм
Е) 1,34 мм

5) Волновое поле это ...

А) электромагнитное поле
Б) среда, в которой не распространяются волны
С) твердое тело
Д) среда, в которой распространяются упругие волны
Е) жидкости

6) Световые волны в некоторой жидкости имеют длину волны 600 нм и частоту 10^{14} Гц. Определите скорость света в этой жидкости.

А) $1{,}2 \cdot 10^8\ Гц$

Б) $1{,}8 \cdot 10^8\ м/с$

С) $0{,}6 \cdot 10^8\ м/с$

Д) $1{,}4 \cdot 10^8\ м/с$

Е) $0{,}4 \cdot 10^8\ м/с$

7) На узкую щель падает нормально монохроматический свет. Направление на четвертую темную дифракционную полосу составляет...Число длин волн, укладывающихся на ширине щели равно:

А) 10
Б) 14
С) 82
Д) 68
Е) 74

8) Какое явление имеет место при работе фоторезистора?

А) Фотоионизация
Б) Внутренний фотоэффект
С) Люминесценция
Д) Термоэлектронная эмиссия
Е) Внешний фотоэффект

9) Мощность излучения абсолютно черного тела N=34 кВт. Найти температуру этого тела, если известно, что его поверхность... $S = 0{,}6м^2$

$\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ Вт / м^2 K^4$

А) 4000 К
Б) 1000 К
С) 2000 К
Д) 8000 К
Е) 10000 К

10) Коротковолновая граница сплошного спектра рентгеновского излучения для трубки, работающей под напряжением 30 кВ, равна:

А) 41 пм
Б) 30 пм
С) 62 пм
Д) 24 пм
Е) 16 пм

11) Основное уравнение динамики вращательного движения в угловых характеристиках, записывается в виде:

А) $\vec{F} = m\vec{a}$

Б) $\vec{M} = \vec{L}\vec{w}$

С) $\vec{L} = I\vec{E}$

Д) $\vec{M} = \vec{L}\vec{E}$

Е) $\vec{M} = I\vec{\varepsilon}$

12) Условие красной границы для приметной фотопроводности (ΔE_n – энергия активации приметных атомов, ΔE – ширина запрещенной зоны:

А) $\lambda < \frac{hc}{\Delta E}$

Б) $\lambda_0 < \frac{hc}{\Delta E_n}$

С) $\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$

Д) $\lambda_0 = \frac{hc}{\Delta E_n}$

Е) $\lambda_0 = \frac{h}{m\vartheta}$

13) К фермионам относятся частицы: описывающиеся волновой функцией....., имеющие спин S...,способные занимать квантовое состояние в количестве..., поведение таких частиц описывается статистикой..., привести примеры таких частиц...

$\psi...$

А) ...; s-полуцелый, квантовое состояние-1 фермион, Ферми-Дирака;...-частица, фотон, электрон

ψ_{AS}

$\alpha -$

Б) ...; s=0,1, квантовое состояние-1 фермион, Ферми-Дирака; электрон, фотон, пион

ψ_{AS}

С) ...; s=0,1, квантовое состояние-1 фермион, Ферми-Дирака; электрон, фотон, каон

ψ_S

Д) ...; s=0,1, квантовое состояние-N фермионов, Ферми-Дирака; водород, протон, фото

ψ_S

Е) ...; s=1/2, квантовое состояние-1 фермион, Ферми-Дирака; электрон, протон, нейтрон

$\psi_{AS};$

14) Положение пылинки m=0,1 г определено с точностью... Какова неопределенность ее скорости?

$\Delta x = 10^{-7} м$

А) $\Delta \upsilon_x \geq 10^{-23} м/с$

Б) $\Delta \upsilon_x \geq 10^{-7} м/с$

С) $\Delta\upsilon_x \geq 10^{-4} м/с$

Д) $\Delta\upsilon_x \geq 10^{-24} м/с$

Е) $\Delta\upsilon_x \geq 6 \cdot 10^{-34} м/с$

15) Связь между волновыми и корпускулярными характеристиками микрочастицы выражается формулами:

$1. E = mc^2$

$2. E = \hbar\omega$

$3. \vec{p} = m\vec{\vartheta}$

$4. p = \frac{2\pi\hbar}{\lambda}$ $5. E = \frac{p^2}{2m}$

А) 1 и 2
Б) 2 и 3
С) 2 и 4
Д) 3 и 5
Е) 1 и 5

16) При облучении цезия светом с частотой $0,75*10^{15} Гц$ максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов равна $1,865*10^{-19} Дж$. Работа выхода электронов для цезия равна ($h = 6,62*10^{-34} Дж \cdot с, e = 1,6*10^{-19} Кл$):

А) 4,97 эВ
Б) 6,9 эВ
С) 1,9 эВ
Д) 3,1 эВ
Е) 2,1 эВ

17) Масса тела связана с его полной энергией соотношением:

А) $E = \frac{m\upsilon^2}{2}$

Б) $E = mc^2$

С) $\frac{m\upsilon^2}{2} + mgh$

Д) $E = \frac{p^2}{2m}$

Е) $E = \frac{mv^2}{2} + \frac{j\omega^2}{2}$

18) Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов, вырываемых с поверхности некоторого металла светом с длиной волны 200 нм, равна:

$A_{вых} = 4,97эВ$

$h = 6,62 \cdot 10^{-34} Дж \cdot с$

$e = 1,6 \cdot 10^{-19} Кл$

А) 1,24 эВ
Б) 5,59 эВ
С) 4,97 эВ
Д) 6,21 эВ
Е) 11,18 эВ

19) По какой формуле определяется масса фотона?

А) $h\nu$

Б) $\frac{h\nu}{c^2}$

С) $\frac{h\nu}{c}$

Д) $h\nu c^2$

Е) $h\nu c$

20) Какая четверка квантовых чисел полностью характеризует состояние электрона в атоме:

А) n, s, j, m_j

Б) $n, l, m_l, m_s,$

С) l, s, m_l, m_s

Д) $n, l, m_j, m_e,$

Е) n, s, j, m_l

21) Что такое фотон?

А) Альфа-частиц

Б) Античастица электрон

С) Дырка

Д) Квант электромагнитного излучения

Е) Античастица протон

22) Масса фотона рентгеновского излучения с длиной волны 25 пм равна ($h = 6,62 * 10^{34}\ Дж \cdot с$):

А) $5{,}4 \cdot 10^{-22} кг$

Б) $0{,}138 \cdot 10^{-26} кг$

С) $0{,}26 \cdot 10^{-30} кг$

Д) $1{,}62 \cdot 10^{-13} кг$

Е) $0{,}088 \cdot 10^{-30} кг$

23) Все соотношения, за исключением одного, выражают принцип неопределенности. Укажите исключение.

А) $\Delta x \cdot \Delta P_y \geq h$

Б) $\Delta y \cdot \Delta P_y \geq h$

С) $\Delta z \cdot \Delta P_z \geq h$

Д) $\Delta x \cdot \Delta P_x \geq h$

Е) $\Delta E \cdot \mathrm{H}t \geq h$

24) Максимальное изменение длины волны при комптоновском рассеянии на свободных электронах равно:

$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot с$

$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31} кг$

А) 5,68 пм

Б) 11,36 пм

С) 4,84 пм

Д) 2,42 нм

Е) 2,42 пм

25) Максимальное комптоновское рассеяние $\Delta\lambda_{\max}$ для рассеяния на протоне ($\lambda_k = 1{,}32 * 10^{-15}\ м$) равна:

А) $\Delta\lambda_{\max} = 1{,}32 \cdot 10^{-15} м$

Б) $\Delta\lambda_{\max} = 1{,}32 \cdot 10^{-12} м$

С) $\Delta\lambda_{\max} = 2{,}43 \cdot 10^{-12} м$

Д) $\Delta\lambda_{\max} = 2{,}64 \cdot 10^{-15} м$

Е) $\Delta\lambda_{\max} = 2{,}64 \cdot 10^{-12} м$

10 вариант

1) Энергия и импульс фотона соответственно равны:

А) $\hbar\omega, \frac{2\pi\hbar}{\lambda}$

Б) $m_0c^2, \frac{2\pi\hbar}{\lambda}$

С) $\hbar\omega, \frac{1}{\lambda}$

Д) $\hbar\omega, m_0c$

Е) $m_0c^2, \frac{2\pi}{\lambda}$

2) Импульс фотона определяется по формуле:

А) $p = h/\lambda$

Б) $p = ch/\nu$

С) $p = h\lambda/c$

Д) $p = c\lambda/h$

Е) $p = h\nu/c^2$

3) Сколько электронов в атоме, ядро которого содержит 3 протона и 4 нейтрона?

А) 3
Б) 4
С) 1
Д) 6
Е) 7

4) Количество классов на которые разбиваются пространственные группы кристаллов по признакам симметрии равно:

А) 7
Б) 230
С) 23
Д) 216
Е) 32

5) Найти концентрацию молекул, если в 0,01 м^3 содержится 8*10^{10} молекул?

А) $8\cdot10^{10}1/м^3$

Б) $8\cdot10^{8}1/м^3$

С) $8\cdot10^{12}1/м^3$

Д) $8\cdot10^{6}1/м^3$

Е) $8 \cdot 10^4 1/м^3$

6) На нагревание кислорода массой 160 г на $\Delta T = 12K$ было затрачено количество теплоты Q=1,76 кДж. Как протекал процесс?

А) При $V = const$

Б) Политропно

С) Адиабатный

Д) При $T = const$

Е) При $P = const$

7) Сколько молекул содержится в газе объемом 3м^3 при давлении 100кПа и температуре 27^{0}С

А) $1 \cdot 10^{25}$

Б) $7{,}2 \cdot 10^{25}$

С) $3 \cdot 10^{25}$

Д) $5 \cdot 10^{25}$

Е) $72 \cdot 10^{25}$

8) Если центр тяжести совпадает с точкой подвеса тела, способного вращаться, то:

А) Равновесие называется неустойчивым

Б) Равновесие называется безразличным

С) Равновесие называется устойчивым

Д) Тело движется поступательно

Е) Е равновесие не наблюдается

9) Температура воздуха в комнате объемом 70 м^3 была 280 К. После того как протопили печь, температура поднялась до 296 К. Найдите работу воздуха при расширении, если давление постоянно и равно 100 кПа?

А) 400 кДж

Б) 0,4 кДж

С) 40 кДж

Д) 4 кДж

Е) 0,04 кДж

10) В сосуде находится 2 моля гелия. Сколько (примерно) атомов гелия в сосуде?

А) $6 \cdot 10^{26}$

Б) $6 \cdot 10^{23}$

С) 10^{18}

Д) $12 \cdot 10^{23}$

Е) 10^{23}

11) Оцените температуру газообразного гелия в сосуде, если известно, что его масса равна 4 г, объем сосуда 22,4*10^{-3} м^3, давление гелия 10^5 Па. Выберите из приведенных ниже значений наиболее близкое к полученному результату.

А) 300 К

Б) 3000

C) 30
Д) 3 К
Е) 30000 К

12) Чему равна кинетическая энергия вращательного движения всех молекул одного моля двухатомного газа?
А) 5/2 RT
Б) 3 RT
С) 3/2 kT
Д) RT
Е) 3/2RT

13) В каком процессе изменение внутренней энергии системы равно количеству переданной теплоты?
А) В адиабатическом
Б) В изотермическом
С) В изохорическом
Д) В изобарическом
Е) В изотермическом и изобарическом

14) Определите температуру нагревателя, если температура холодильника 375 К, КПД тепловой машины 35%.
А) 900 К
Б) 750 К
С) 500 К
Д) 800 К
Е) 577 К

15) Какими эффектами в газе можно пренебречь для того, чтобы газ считался идеальным?
А) Взаимодействием на расстоянии
Б) Внутренней энергией газа
С) Взаимодействием молекул при столкновении
Д) Массами молекул
Е) Столкновениями молекул

16) Сосуд, содержащий газ под давлением $1,4*10^5$ Па, соединили с пустым сосудом объемом 6 л. После этого в обоих сосудах установилось давление $1*10^5$ Па. Найти объем первого сосуда (процесс изотермический)?
А) 3 л
Б) 15 л
С) 20 л
Д) 10 л
Е) 5 л

17) Оцените массу атмосферного воздуха в помещении с объемом 300 $м^2$ при нормальных условиях.
А) 388 кг
Б) 0,03 кг
С) 38,8 кг
Д) 3 кг
Е) 0,3 кг

18) Идеальный газ при температуре T_0 имел давление p_0.Давление газа при неизменной массе и постоянном объеме увеличили в 1,5 раза. Как изменилась температура газа?

А) $\frac{4}{9}T_0$

Б) $\frac{2}{3}T_0$

С) $\frac{3}{2}T_0$

Д) $T = T_0$

Е) $\frac{4}{3}T_0$

19) Тепловая машина с температурой нагревателя 227^0 С и температурой холодильника 27^0 С может иметь максимальное значение КПД, равно

А) 100%
Б) 68%
С) 88%
Д) 40%
Е) 60%

20) При изохорном процессе азоту передано 60 Дж теплоты. Сколько теплоты пошло на увеличение внутренней энергии азота?

А) 20 Дж
Б) 7 Дж
С) 30 Дж
Д) 50 Дж
Е) 60 Дж

21) Как изменилась температура газа, если наиболее вероятная скорость молекул увеличилась в 3 раза.

А) Увеличилась в 6 раз
Б) Увеличилась в 9 раз
С) Увеличилась в 3 раз
Д) Увеличилась в $\sqrt{3}$ раз
Е) Уменьшилась в 3 раза

22) Средняя арифметическая скорость молекул азота N_2 при 27^0 С равна:

А) 346 м/с
Б) 612 м/с
С) 756 м/с
Д) 402 м/с
Е) 476 м/с

23) Средняя кинетическая энергия идеального газа при повышении его температуры в 2 раза:

А) Увеличится в 2 раза
Б) Увеличится в $\sqrt{2}$ раз
С) Уменьшится в 2 раза
Д) Уменьшится в $\sqrt{2}$ раз
Е) не изменится

24) Как изменится внутренняя энергия идеального газа, если его давление увеличится в 2 раза, а объем уменьшится в 2 раза?
А) Останется неизменной
Б) Увеличится в 2 раз
С) Увеличится в 4 раз
Д) Уменьшится в 2 раз
Е) Уменьшится в 4 раз

25) Что является причиной, вызывающей процесс теплопроводности?
А) Градиент скорости упорядоченного движения молекул
Б) Градиент плотности
С) Градиент температуры
Д) Градиент скорости хаотического движения молекул
Е) Градиент концентрации молекул

Ключи

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	А	Д	Б	А	Е	Б	А	Б	С	Д
2	Д	А	Б	Б	С	Е	С	Б	А	А
3	А	С	А	Б	А	А	С	А	Е	А
4	Б	С	Д	С	Д	С	Е	С	Е	Е
5	Б	Е	С	А	Д	С	А	Д	Д	С
6	Д	А	С	Д	А	Д	Д	Е	С	Е
7	А	А	Е	Д	С	А	Д	Е	А	Б
8	С	Б	А	Б	Е	Д	С	А	Б	Б
9	Д	Д	Б	Е	Е	Е	Б	Д	Б	А
10	А	Е	А	Е	С	Е	Б	Б	А	Д
11	Д	С	Д	А	А	А	А	Д	Е	А
12	Е	С	А	Е	Д	С	С	Б	Д	Д
13	А	А	Е	Д	Е	Е	Б	А	Е	С
14	А	Б	Е	С	Б	Б	А	А	А	Е
15	Б	С	С	А	Б	Б	Д	С	С	А
16	А	Е	Б	Б	А	А	Е	Е	С	Б
17	Д	А	С	Б	С	Д	Е	С	Б	А
18	С	А	А	Д	А	С	Д	А	А	С
19	Е	Б	А	А	Е	Д	А	Д	Б	Д
20	Е	А	Д	Б	Д	С	Б	Д	Е	Е
21	Б	Д	Е	Е	Д	А	Б	А	Д	Б
22	А	Е	Е	С	Б	Б	А	Е	Е	Е
23	А	Д	А	А	А	Д	С	С	А	А
24	С	А	Б	Д	С	А	Е	Б	С	А
25	А	С	Д	А	Е	А	С	Б	А	С

Тематика рефератов и докладов.

1. Реактивное движение.
2. Ультразвук, его применение.
3. История атомистических учений.
4. Дефекты в кристаллах.
5. Жидкие кристаллы.
6. Тепловое расширение тел в природе и технике.
7. «Вечные двигатели».
8. Тепловые двигатели и охрана окружающей среды.
9. Альтернативные источники энергии.
10. Сверхпроводимость.
11. Атмосферное электричество.
12. Плазма – четвертое состояние вещества.
13. Термоэлектрические явления.
14. Эффективное энергосбережение.
15. Магнитное поле Земли, радиационные пояса.
16. Изобретение радио и телевидения.
17. Защита от электромагнитных излучений.
18. МГД-генератор. Ускорители частиц.
19. Оптические явления в природе.
20. Спектральный анализ.
21. Химическое действие света. Давление света. Солнечный парус.
22. Голография.
23. Квантовые генераторы.
24. Развитие ядерной энергетики. Применение радиоизотопов.
25. Нобелевские лауреаты по физике.
26. Из истории научного открытия.

Вопросы для итогового контроля

1. Движение тела под действием силы тяжести (три случая).
2. Законы Ньютона. Решение задач
3. Закон всемирного тяготения.
4. Потенциальная энергия тела в гравитационном поле.
5. Закон сохранения и превращения энергии.
6. Закон сохранения импульса.
7. Уравнение Бернулли.
8. Подъемная сила крыла.
9. Основные положения МКТ и их опытное обоснование.
10. Броуновское движение.
11. Количество вещества.
12. Молярная масса.
13. Силы взаимодействия молекул.
14. Строение газообразных, жидких и твердых тел.
15. Идеальный газ.
16. Основное уравнение МКТ идеального газа.
17. Термодинамические параметры.
18. Температура и способы ее измерения.
19. Уравнения состояния идеального газа.
20. Закон Дальтона и Авогадро.
21. Изопроцессы. Газовые законы.
22. Внутренняя энергия идеального газа и способы ее изменения.
23. Закон термодинамики.
24. Работа газа. Количество теплоты. Теплоемкость. Уравнение теплового баланса.
25. Свойства паров. Кипение. Критическое состояние вещества. Влажность воздуха.
26. Свойства поверхностного слоя жидкости. Капиллярные явления, смачивание.
27. Строение кристаллических и аморфных тел. Анизотропия. Деформация и ее виды.
28. Закон Гука. Модуль Юнга. Диаграмма растяжений.
29. Фазы вещества на земле и в космосе. Процессы: плавления, кристаллизации, кипения, конденсации.
30. Электризация тел и ее виды.
31. Закон сохранения электрического заряда.
32. Закон Кулона.
33. Электрическое поле и его свойства. Напряженность электрического поля. Напряженность электрического поля
34. Потенциал электрического поля. Работа электрического поля.
35. Проводники и диэлектрики в электрическом поле. Электроемкость. Конденсаторы. Емкость плоского конденсатора.
36. Соединение конденсаторов. Энергия и плотность энергии электрического поля.
37. Электрический ток. Сила тока. Закон Ома для участка цепи.
38. Внешний и внутренний участки цепи, напряжение на этих участках цепи.
39. Сопротивление проводника. Зависимость сопротивления проводника от длины, площади поперечного сечения и материала.
40. Электрические цепи с последовательным и параллельным соединением проводников.
41. Э.Д.С. Закон Ома для полной цепи. КПД источника тока.
42. Законы Кирхгофа. Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля-Ленца.
43. Электрический ток в металлах. Основные положения электронной теории проводимости. Сверхпроводимость.

44. Электрический ток в полупроводниках. Полупроводниковый диод, транзистор.
45. Электрический ток в жидкостях. Законы Фарадея.
46. Электрический ток в газах. Виды газовых разрядов. Электрический ток в вакууме. Плазма – четвертое состояние вещества.
47. Магнитное поле и его свойства. Закон Ампера. Закон Био-Савара-Лапласа.
48. Магнитное поле прямого тока, кругового тока, соленоида
49. Сила Лоренца. Действие магнитного поля, движущиеся электрические заряды.
50. Магнитные свойства вещества. Ферромагнетики.
51. Явление электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции.
52. Определение направления индукционного тока. Правило Ленца.
53. ЭДС индукции в движущихся проводниках. Явление самоиндукции. Закон самоиндукции.
54. Самоиндукция. Индуктивность. ЭДС самоиндукции. Энергия магнитного поля.
55. Механические колебания и волны. Колебательное движение. Механические колебания математического и пружинного маятников. Периоды колебаний маятников.
56. Переменный электрический ток и его основной характеристики.
57. Активное сопротивление в цепи переменного тока.
58. Конденсатор и катушка индуктивности в цепи переменного тока.
59. Электрический резонанс в цепи переменного тока.
60. Генератор переменного тока. Генератор постоянного тока. Электродвигатели.
61. Трансформатор. Производство и передача электрической энергии
62. Учение об электромагнитном поле. Идеи Максвелла. Связь между переменным электрическим и магнитным полями.
63. Электромагнитные волны. Излучение электромагнитных волн. Опыты Герца. Энергия и свойства электромагнитных волн.
64. Принципы современной радиосвязи. Модуляция и детектирование
65. Электромагнитная природа света. Квантовая теория света. Источники света.
66. Скорость распространения света в вакууме. Определение скорости света. Скорость распространения света в различных средах.
67. Явление отражения света. Законы отражения. Плоские и сферические зеркала.
68. Явление преломления света. Законы преломления. Явление полного внутреннего отражения.
69. Линзы. Формула тонкой линзы. Ход лучей в тонкой линзе. Построение изображений в тонкой линзе
70. Понятие о волновом движении. Явления интерференции и дифракции волн.
71. Интерференция света. Практическое применение интерференции света.
72. Дифракция света. Дифракционная решетка
73. Дисперсия и поляризация света
74. Дисперсия света. Разложение белого света призмой.
75. Сложение спектральных цветов. Цвета тел. Распределение энергии в непрерывном спектре. Спектры испускания и поглощения.
76. Ультрафиолетовая и инфракрасная части спектра. Роль ультрафиолетовых и инфракрасных лучей в природе, их применение в технике.
77. Приборы для получения и исследования спектра. Спектры солнечных Солнца и звезд, их связь с температурой. Понятие о спектральном анализе.
78. Рентгеновские лучи, их природа и свойства, применение в науке и технике.
79. Спектр электромагнитных излучений. Тепловое излучение и люминесценция.
80. Принципы относительности в механике. Принцип относительности Эйнштейна. Постулаты теории относительности.

81. Относительность расстояний. Относительность одновременности. Релятивистский закон сложения скоростей.
82. Релятивистская динамика. Зависимость массы от скорости. Связь массы и энергии.
83. Внешний фотоэлектрический эффект. Опыты Столетова. Законы внешнего фотоэффекта. Фотоны. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
84. Внутренний фотоэффект, его особенность. Применение фотоэффекта в технике.
85. Давление света. Опыты Лебедева.
86. Химическое действие света и его применение. Понятие о фотосинтезе.
87. Понятие о корпускулярно-волновой природе света.
88. Строение атома. Опыт Резерфорда по рассеиванию а-частиц. Модель атома по Резерфорду.
89. Постулаты Бора. Модель атома водорода по Бору. Принцип соответствия.
90. Открытие волновых свойств частиц. Волны Луи де Бройля.
91. Спонтанное и вынужденное излучение. Квантовые источники света. Лазер. Понятие о нелинейной оптике. Голография
92. Атомное ядро. Нуклонная модель ядра.
93. Энергия связи нуклонов в ядре. Удельная энергия связи.
94. Открытие явления естественной радиоактивности. Закон радиоактивного распада.
95. Методы наблюдения и регистрации радиоактивных излучений.
96. Искусственная радиоактивность.
97. Деление тяжелых ядер. Цепные ядерные реакции. Ядерный реактор.
98. Ядерная энергетика. Термоядерные реакции. Биологическое действие радиоактивных лучей. Защита от радиации.
99. Термоядерный синтез и условия его существования. Проблема термоядерной энергетики.
100. Строение звезд. Ядра звезд как естественный термоядерный реактор.
101. Необратимость развития материального мира.

Дескриптор к Разделу Электрические явления

Характеристика заданий раздела «Электрические явления»

Раздел	Проверяемая цель	Уровень мыслительных навыков	Кол. заданий*	№ задания*	Тип задания*	Время на выполнение, мин*	Балл *	Балл за раздел
Электростатика	10.3.1.2 - применять принцип суперпозиции для определения напряженности электрического поля	Применение	4	2	МВО	1	10	40
	10.3.1.4 - рассчитывать потенциал и работу электрического поля точечных зарядов	Применение		1 2	МВО РО	5	10	
	10.3.1.9 - применять формулу последовательного и параллельного соединения конденсаторов при решении задач	Применение		3	КО	4	10	
	10.3.1.10 - рассчитывать энергию электрического поля	Применение		4	РО	5	10	
Постоянный тока	10.3.2.4 - применять закон Ома для полной цепи	Применение	2	5	РО	5	10	30
	10.3.2.6 - применять законы Кирхгофа к разветвленным электрическим цепям	Применение		6	РО	9	10	
	10.3.2.7 – применять формулы работы, мощности и электродвижущей силы источника тока при решении задач	Применение		5	КО	2	10	
Электрический ток в различных средах	10.3.3.1 - описывать электрический ток в металлах и анализировать зависимость сопротивления от температуры	Применение	4	7 8	МВО КО	1 2	10	30
	10.3.3.3 - описывать электрический ток в полупроводниках и объяснять применение полупроводниковых приборов	Применение		7 9	МВО КО	1 2	10	
	10.3.3.5- описывать электрический ток в электролитах и применять законы электролиза при решении задач	Применение		7 10	МВО КО	1 2	10	
Итого:			10			**40**	**100**	**100**

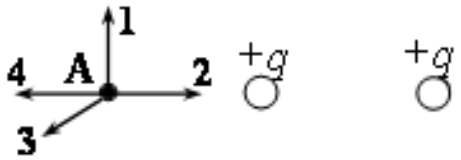
Задания

1. Заряд $40*10^{-9}$ Кл переместился между двумя точками с разностью потенциалов $1*10^3$ В, при этом поле совершило работу, равную…

*a) 40 *10 $^{-6}$ Дж*
*b) 25*10 $^{-6}$ Дж*
*c) 25*10 ^{6} Дж*
*d) 40 *10 ^{6} Дж*

[1]

2. Два одинаковых точечных положительных заряда, по 1 нКл каждый, отстоят на расстоянии 1м друг от друга в вакууме ε = 1так как показано на рисунке.



https://onlinetestpad.com/ru/test/24225-315-princip-superpozicii-elektricheskikh-polej

(I) Направлению вектора напряженности в точке А соответствует стрелка

a) 1
b) 2
c) 3
d) 4

[1]

(II) Найти потенциал поля в точке А, находящейся на расстоянии 1м от левого заряда и 2м от правого заряда

[3]

3. Два конденсатора емкостями 2 мкФ и 4 мкФ соединили последовательно. Параллельно к ним присоединили конденсатор емкостью 8 мкФ

(I) Начертите схему такого соединения

[1]

(II) Запишите формулу для расчета емкость батареи конденсаторов____

[1]

(III) Чему равна емкость батареи конденсаторов?_____

[1]

4. Определите заряд плоского воздушного конденсатора, если площадь каждой обкладки S=25 см^2, расстоянии между ними d=2,2мм. Энергия заряженного конденсатора W=800мДж. Диэлектрическая проницаемость ε=1.
Электрическая постоянная $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф·м$^{-1}$

[4]

5. Источник постоянного тока с ЭДС $\mathscr{E}$ = 12 В и внутренним сопротивлением r = 1 Ом замкнут на внешнее сопротивление R = 9 Ом.

*(I) Определите силу тока в цепи I*_____

[2]

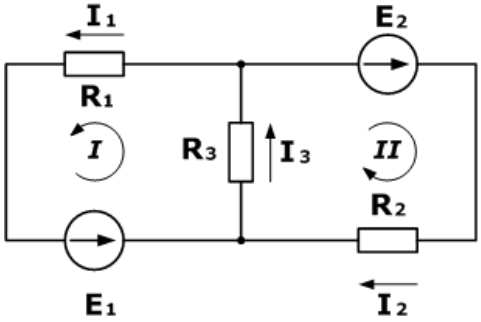
*(II) Определите падение напряжения U_R на внешнем участке цепи*_____

[2]

*(III)Определите мощность источника тока в замкнутой цепи*_____

[2]

6. Резисторы сопротивлениями R_1=100 Ом, R_2=150 Ом, R_3=150 Ом, включены в цепь с $\mathscr{E}_1$=75В и $\mathscr{E}_2$=75В так, как показано на схеме



https://electroandi.ru/toe/dc/primery-resheniya-zadach-na-zakony-kirkhgofa.html

Используя законы Кирхгофа, выполните:

*(I) запишите уравнение токов для токов, сходящихся в узле*_____

[1]

*(II) составьте уравнения для первого и второго контуров цепи*_____

[2]

(III) подставьте известные значения в систему полученных уравнений и найдите токи в ветвях _____

[3]

7. Определите истинность/ложность утверждений, поставив галочку в соответствующем столбце

Утверждение	***Правда***	***Ложь***

Носителями электрического тока в жидкостях являются только электроны	□	□
Носителями электрического тока в металлах являются только электроны	□	□
Носителями электрического тока в полупроводниках являются только электроны	□	□

[3]

8. При температуре 20 °С сопротивление проводника 25 Ом,
а при температуре 35°С сопротивление проводника 25,17 Ом.
Температурный коэффициент электрического сопротивления равен_____

[1]

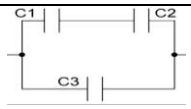
9. Какой полупроводниковых приборов вы предложили бы для использования в уличных фонарях для контроля, когда свет должен включаться и когда свет должен выключаться?_____

[1]

10. Электрохимический эквивалент цинка k= 3,4 *10^{-7} кг/Кл. Какая масса цинка покроет металлическое изделие за 2 часа электролиза при прохождении тока I=2 А?
_____

[1]

Схема выставления баллов за раздел

№	Ответ	Балл	Дополнительная информация
1	**А**	**2**	
2	(I) **Д** (II) $\varphi = k\frac{q}{r}$ $\varphi=\varphi_1+\varphi_2$ 20В	**2** **2** **2** **2**	
3	(I)  https://en.ppt-online.org/542950 (II) $C = C_3 + \frac{C_1 C_2}{C_1+C_2}$ (III) 9,3мкФ	**3** **3** **4**	Принимаются ответы 9мкФ и 9,33 мкФ
4	$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}$ $W = \frac{q^2}{2C}$ $q = \sqrt{2W\frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}}$ 4мкКл	**2** **2** **3** **3**	Принимается ответ $4*10^{-6}$ Кл
5	(I) $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$, 1,2 А (II) $U_R = \frac{\varepsilon R}{R+r}$, 10,8В (III) $P_{полн} = \frac{\varepsilon^2}{R+r}$ 14,4 Вт	**1** **2** **2** **1** **2** **2**	
6	(I) $I_3 - I_1 - I_2 = 0$ (II) $R_1 I_1 + R_3 I_3 = \mathscr{E}_1$ $R_2 I_2 + R_3 I_3 = \mathscr{E}_2$ (III) $I_1 = 0{,}143$А ; $I_2 = 0{,}262$А ; $I_1 = 0{,}405$А	**2** **3** **5**	способ решения может быть любым
7	Ложь Правда Ложь	**10**	
8	$4{,}5 \cdot 10^{-4}$ $К^{-1}$	**10**	
9	фоторезистор	**10**	
10	4г	**10**	Принимается ответ $4*10^{-3}$ кг

Литература

Основная:

1. Учебник для 10 классов естественно-математического направления общеобразовательных школ: Б. Кронгарт, В. Кем, Н. Койшинобаев – Алматы: издательство «Мектеп», 2019
2. Учебник для 11 классов естественно-математического направления общеобразовательных школ. С. Туякбаев, Ш.Б. Насохова, В.И. Кем, В.И. Зайганова, Б.А. Кронгарт – Алматы: Издательство «Мектеп», 2020.
3. Дидактические материалы. Учебное пособие для 10 классов естественно-математического направления общеобразовательных школ. Б. Кронгарт, В. Кем – Алматы: Издательство «Мектеп», 2019.
4. Дидактические материалы. Учебное пособие для 11 классов естественно-математического направления общеобразовательных школ. Б. Кронгарт, В. Кем – Алматы: Издательство «Мектеп», 2020.
5. Методическое руководство. Пособие для учителей 10 классов естественно-математического направления общеобразовательных школ. Б. Кронгарт, В. Кем – Алматы: Издательство «Мектеп», 2019.
6. Методическое руководство. Пособие для учителей 11 классов естественно-математического направления общеобразовательных школ. Б. Кронгарт, В. Кем – Алматы: Издательство «Мектеп», 2020.
7. Типовая и учебная программа;
8. Научно-методический журнал Н. Мурзова.

Дополнительная:

1. Рымкевич А.Л. Сборник задач по физике. М.: Просвещение.
2. Мякишев Г.Я., Бухевцев Б.Б., Физика 10-11,Алматы,1996.
3. Жданов Л.С., Жданов Г.Л., Физика, учебник для среднего специального учебного заведения. М., Наука, 1984