

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования

**«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф.
Горбачева» в г.Белово**

(филиал КузГТУ в г.Белово)

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИОННОГО КУРСА ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ФИЗИКА»

(1 семестр)

для студентов СПО специальности «09.02.07 Информационные системы и
программирование»

Составитель

Белов С.В.

Белово, 2021.

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция №1. Физика – фундаментальная наука о природе	3
Лекция 2. Математика в курсе физики.	13
Лекция 3. Предмет и задачи классической механики. Кинематические характеристики механического движения.	19
Лекция 4. Свободное падение. Движение тела, брошенного под углом к горизонту..	32
Лекция 5. Равномерное движение по окружности	39
Лекция 6. Законы механики	45
Лекция 7. Закон сохранения импульса. Реактивное движение.	58
Лекция 8. Закон сохранения механической энергии. Работа силы. Мощность.	64
Лекция 9. Равновесие материальной точки и твердого тела. Движение жидкостей и газов.	75
Лекция 10. Основы молекулярно-кинетической теории. Идеальный газ.	92
Лекция 11 . Основы термодинамики	111
Лекция 12. Агрегатные состояния вещества	124
Лекция 13. Предмет и задачи электродинамики.	140
Лекция 14. Электрическое поле, его силовая характеристика. Принцип суперпозиции полей.	148
Лекция 15. Проводники и диэлектрики в электрическом поле. Конденсаторы, их виды, способы соединения.	163
Лекция 16. Постоянный электрический ток. Законы постоянного тока	177
Лекция 17. Магнитное поле. Вектор индукции магнитного поля. Принцип суперпозиции магнитных полей.	197
Лекция 18. Действие магнитного поля на движущийся заряд	212
Лекция 19. Явление электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции.	223
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	237

Лекция 1

Физика – фундаментальная наука о природе

Физика — наука о природе. Величайший мыслитель древности Аристотель (384 - 322 гг. до н. э.) в смысл слова «физика» (от греч. *physis* — природа) вкладывал всю совокупность сведений о природе, все, что было известно о земных и небесных явлениях. В русский язык термин «физика» был введен великим ученым-энциклопедистом, основоположником материалистической философии в России М. В. Ломоносовым (1711-1765).

Долгое время физику называли натуральной философией (философией природы), и она фактически сливалась с естествознанием. По мере накопления экспериментального материала, его научного обобщения и развития методов исследования из натуральной философии как общего учения о природе выделились астрономия, химия, физика, биология и другие науки. Отсюда следует, что резкую границу между физикой и другими естественными науками установить довольно сложно.

Процесс длительного изучения явлений природы привел ученых к идее о материальности окружающего мира. Материя включает в себя все, окружающее нас, и нас самих. ***Учение о строении материи является одним из центральных в физике.*** Оно охватывает два известных физике вида материи: ***вещество*** и ***поле***. Всякое изменение, происходящее в окружающем нас мире, представляет собой движение материи. ***Движение есть способ существования материи.***

Физика изучает наиболее общие формы движения материи и их взаимные превращения, такие, как механическая, молекулярно-тепловая, электромагнитная, атомная и ядерная. Подобное деление на формы движения условно, однако физика в процессе изучения обычно представлена именно такими разделами.

Материя существует в пространстве и во времени.

Пространство определяет взаимное расположение (одновременно существующих) объектов относительно друг друга и их относительную величину (расстояние и ориентацию). Размеры материальных объектов во Вселенной разнообразны. Эти материальные объекты образуют микро-, макро- и мегамир. **Микромир** — мир невидимых объектов, например элементарные частицы, атомы, молекулы. **Макромир** — мир объектов, обладающих «обычными» размерами. **Мегамир** — мир астрономических объектов, например звезды и образуемые ими системы. Все явления природы происходят в определенной последовательности и имеют конечную продолжительность. **Время** определяет последовательность явлений природы и их относительную продолжительность. **Следовательно, пространство и время не существуют сами по себе, в отрыве от материи, и материя не существует вне пространства и времени.**

Общей мерой различных форм движения материи является **энергия**. Качественно различные физические формы движения материи способны превращаться друг в друга, но сама материя неуничтожима и несотворима. К такому выводу пришли еще античные философы-материалисты

Физика — наука, изучающая простейшие и вместе с тем наиболее общие закономерности явлений природы, свойства и строение материи и законы ее движения.

Физика — основа естествознания. Физические ПОНЯТИЯ ЯВЛЯЮТСЯ простейшими и в то же время основополагающими и всеобщими в естествознании (пространство, время, движение, масса, работа, энергия и др.). Теория и методы физики широко используются в астрономии, биологии, химии, геологии и Других естественных науках. Физические законы (например, законы сохранения) выводы, следствия из физических теорий имеют глубокий философский смысл. *Физика относится к точным наукам и изучает количественные закономерности явлений.*

Физика — наука экспериментальная. Основная задача физики — выявить и объяснить законы природы, которыми определяются физические

явления. Задачи, стоящие перед физикой, определяют особенности уровней познания природы. В физике выделяют следующие уровни познания: *эмпирический*, т. е. основанный на опыте, *теоретический* и *моделирования*, **каждый из которых использует определенные методы**. Под **методом** понимают совокупность приемов и операций практического и теоретического познания действительности.

Эмпирические уровень предусматривает использование главным образом методов, опирающихся на чувственное познание объективно существующего мира. К этим методам относят систематические наблюдения. Эксперименты и измерения.

Наблюдения являются первоначальным источником информации. На начальных стадиях развития науки наблюдения играли важнейшую роль и благодаря им образовался эмпирический (опытный) базис науки. Как известно, первые закономерности в природе были установлены в поведении небесных тел и были основаны на наблюдениях за их движением, осуществляемых невооруженным глазом. ***В некоторых науках (например, астрономии, геологии и др.) наблюдения являются единственным методом исследования.***

Эксперимент — важнейший метод эмпирического исследования, ***с помощью которого явления исследуются в контролируемых управляемых условиях***. Проводя опыт, экспериментатор целенаправленно вмешивается в естественный ход протекания процесса. Отличительная особенность эксперимента воспроизводимость, т. е. его может осуществить каждый исследователь в любое время.

Эксперименты могут быть качественными и количественными. Качественный эксперимент отвечает на такой вопрос: остается постоянной или изменяется данная физическая величина при изменении внешних условий? Количественный эксперимент связан с измерением.

Не над всеми телами можно проводить эксперименты, например планеты, звезды можно только наблюдать. Если все же эксперимент

необходим, то проводят эксперимент с моделью, т. е. телом, размеры и масса которых пропорционально уменьшены по сравнению с реальным телом. В этом случае результаты модельных экспериментов можно считать пропорциональными результатам реального эксперимента.

Измерение — совокупность действий, выполняемых с помощью средств измерений в целях нахождения числового значения измеряемой величины в принятых единицах измерения.

Именно в интерпретации результатов измерений выявляется глубина теоретических выводов.

Теоретический уровень познания предусматривает обобщения, классификацию и анализ экспериментальных данных, установление физических законов, выдвижение научных гипотез и создание научных теорий.

Физические законы — устойчивые повторяющиеся объективные закономерности, существующие в природе.

Гипотеза — научное предположение, выдвигаемое для объяснения какого либо явления и требующее проверки на опыте. Если гипотеза выдерживает эмпирическую проверку, то она приобретает статус закона, в противном случае считается опровергнутой.

Теория — совокупность нескольких законов, относящихся к одной области познания.

Верховным судьей любой теории является опыт.

Если теория в целом не получает эмпирического подтверждения, то она дополняется новыми гипотезами. Подтвержденная опытами теория считается истинной до тех пор, пока не будет предложена новая теория, объясняющая новые эмпирические факты и включающая старую как частный случай.

Каждый шаг в изучении природы — это приближение к истине.
Физика все глубже проникает в новые области и изучает такие объекты, которые не имеют аналогов в повседневности. В таких случаях в физике используют моделирование.

Моделирование позволяет воспроизвести определенные геометрические, физические, динамические характеристики объекта — оригинала.

Модель — упрощенная версия физической системы или процесса, сохраняющая их главные черты. Простейшими моделями являются, например, *материальная точка, идеальный газ, кристаллическая решетка* — так называемое предметное моделирование. При моделировании указываются *пределы и границы допустимых упрощений*.

Любая модель прежде всего подвергается проверке соответствия ее свойств свойствам моделируемой реальной физической системы. По мере усовершенствования модель становится более точной и совершенной. Модель, выдержавшая много испытаний, предсказавшая новые явления и указавшая на новые эксперименты, которые согласуются с ней, составляет основу физических теорий. Существует также знаковое, мысленное и компьютерное моделирование. При *знаковом моделировании* в качестве модели используют схемы, чертежи, формулы. Частным случаем знакового моделирования является *математическое моделирование*. При *мысленном моделировании* (мысленном эксперименте) ученый представляет себе объект, который не существует в реальности, и проводит над ним эксперимент в уме. Широко известны, например, мысленные эксперименты А. Эйнштейна (1879-1955), создателя теории относительности, Г. Галилея и Дж. Максвелла (1831-1879). Так, Галилей открыл закон инерции, мысленно уменьшая, а затем исключая силы трения при движении; Максвелл сформулировал парадокс с «демоном», т. е. мысленно расположил на пути летящих молекул гипотетического «демона», сортирующего молекулы по скоростям. При *компьютерном моделировании* в качестве модели выступает алгоритм — программа функционирования объекта.

Модели, которые имеются у физиков сегодня, в состоянии описать многие явления Природы. Однако завтра они будут усовершенствованы и после опытной проверки все больше способствовать познанию Природы.

Итак, физика — наука экспериментальная, так как основным методом изучения природы является эксперимент, который подтверждает или отрицает выводы физики.

Физическая величина.

Физическая величина — это измеряемая характеристика физических объектов или явлений материального мира, общая в качественном отношении множества объектов или явлений, но индивидуальная для каждого из них в количественном отношении. Например, масса — физическая величина, являющаяся общей характеристикой физических объектов, для каждого объекта (автомобиль, телевизор, самолет и т.п.) имеет индивидуальное значение; удельное сопротивление — физическая величина — общая характеристика многих физических тел, но для разных металлов она различна.

Физическая величина представляет собой либо обобщенное понятие (длина, объем, масса, удельная теплоемкость, вязкость, сила электрического тока и т.д.), либо конкретную величину — индивидуальную характеристику отдельного объекта или явления: вместимость данного сосуда, напряженность электрического поля в данной точке пространства, удельная теплоемкость воды при температуре 0 °С и т.д. Указанному выше определению не удовлетворяют термины: электрическое поле, волна и т.д., а также наименования физических объектов: гиря, поезд, пуля и т.д.

Значение конкретной физической величины выражают произведением отвлеченного числа на принятую для данной физической величины единицу. Что надо знать о физической величине:

- физический смысл величины (какие свойства или качества вещества или поля она характеризует);
- определение физической величины;
- формулу, выражающую связь данной физической величины с другими;

- единицу величины (наименование, обозначение, определение)
- способы ее измерения.

Единицу физической величины можно установить произвольно, но если принять их независимыми друг от друга, то в формулах, связывающих различные физические величины, появится много переводных коэффициентов, что усложнит как сами формулы, так и вычисления. К. Гаусс показал, что для построения системы единиц физических величин достаточно выбрать несколько независимых друг от друга единиц. Эти единицы называют **основными**. Единицы физических величин, которые определяются по уравнениям с помощью основных единиц, называют **производными**.

Совокупность основных и производных единиц называют **системой единиц**. Международная система единиц СИ состоит из семи основных (метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль, кандела), двух дополнительных (радиан и стерадиан) и большого числа производных единиц.

Для образования производных единиц из основных применяют определяющие уравнения связи между величинами. Некоторые производные единицы, получившие специальные наименования, могут быть использованы для образования других производных единиц СИ. Сокращенные обозначения единиц, названные в честь ученых, пишутся с прописной буквы. Специальные наименования, присвоенные единицам, обязательны к применению. Например, для работы и энергии следует применять единицу джоуль (Дж), а не ньютон-метр (Н ■ м), несмотря на то, что $1 \text{ Н} \cdot \text{м} = 1 \text{ Дж}$.

Физические законы.

Физические законы выражают в математической форме количественные связи между физическими величинами. Они устанавливаются на основе обобщения опытных (экспериментальных) данных и отражают объективные закономерности, существующие в Природе. Установление физических законов связано с измерением физических

величин. Очевидно, что результат измерений не может быть абсолютно точным.

Физические законы справедливы для той области, для которой их применимость проверена опытным путем.

Например, законы механики Ньютона (классической механики) установлены для движения макроскопических тел, движущихся со скоростями много меньше скорости света.

Дальнейшее развитие науки показало, что законы классической механики не справедливы, с одной стороны, для движения объектов микромира (отдельных атомов или элементарных частиц), с другой — для движения объектов, скорости которых сравнимы со скоростью света ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

Физические законы, имеющие наиболее обширные области применимости, называют **фундаментальными** (например, закон сохранения энергии).

Изучая физический закон, нужно знать:

- связь между какими явлениями (процессами) или физическими величинами он выражает;
- формулировку закона и его математическое выражение;
- опыты, подтверждающие справедливость закона;
- учет и использование на практике;
- границы применимости.

Понятие о физической картине мира.

По мере накопления экспериментальных данных постепенно вырисовывалась и складывалась величественная и сложная картина окружающего нас мира и Вселенной в целом.

Научные поиски и исследования, проведенные на протяжении многих веков, позволили И. Ньютону (1643-1727) открыть и сформулировать фундаментальные законы механики, которые в то время казались настолько

всеобъемлющими, то легли в основу построения *механической картины мира*, согласно которой все тела должны состоять из абсолютно твердых частиц, находящихся в непрерывном движении. Взаимодействие между телами осуществляется с помощью сил тяготения (гравитационных сил). Все многообразие окружающего мира, по Ньютону, заключалось в различии движения частиц.

Механическая картина мира господствовала до тех пор, пока Дж. Максвеллом (1873) не были сформулированы уравнения, описывающие основные закономерности электромагнитных явлений. Эти закономерности не могли быть объяснены с точки зрения механики Ньютона. В отличие от классической механики, где предполагается, что взаимодействие между телами осуществляется мгновенно (теория дальнодействия), теория Максвелла утверждала, что взаимодействие происходит с конечной скоростью, равной скорости света в вакууме, посредством электромагнитного поля (теория близкодействия). Создание специальной теории относительности — нового учения о пространстве и времени — позволило полностью обосновать электромагнитную теорию.

В состав всех без исключения атомов входят электрически заряженные частицы. С помощью электромагнитной теории можно объяснить природу сил, действующих внутри атомов, молекул и макроскопических тел. Это положение легло и в основу создания *электромагнитной картины мира*, согласно которой все происходящие в окружающем нас мире явления пытались объяснить с помощью законов электродинамики. Однако объяснить строение и движение материи только электромагнитными взаимодействиями не удалось.

Дальнейшее развитие физики показало, что кроме *гравитационного* и *электромагнитного взаимодействий* существуют и другие типы взаимодействия. Первая половина XX в. ознаменовалась интенсивным изучением строения электронных оболочек атомов и тех закономерностей, которые управляют движением электронов в атоме. Это привело к

возникновению новой отрасли физики — **квантовой механики**. В квантовой механике используется понятие **дуализма**: движущаяся материя является одновременно и веществом, и полем, т. е. обладает одновременно корпускулярными и волновыми свойствами. В классической же физике материя всегда либо совокупность частиц, либо поток волн.

Развитие ядерной физики, открытие элементарных частиц, исследование их свойств и взаимопревращений привели к установлению еще двух типов взаимодействий, названных **сильными** и **слабыми**.

Таким образом, современная физическая картина мира предполагает четыре типа взаимодействия: сильное (ядерное), электромагнитное, слабое и гравитационное. Сильное взаимодействие обеспечивает связь нуклонов в ядре. Слабое взаимодействие проявляется в основном при распаде элементарных частиц. Итак, учение о строении материи в настоящее время является атомистическим, квантовым, релятивистским, в нем применяются статистические представления.

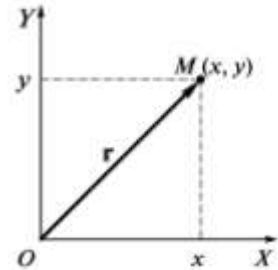
Вопросы для самоконтроля и повторения

1. Что изучает наука «физика»?
2. Какие виды материи вам известны?
3. Что определяет пространство?
4. Что определяет время?
5. Какие методы используются на эмпирическом уровне познания?
6. Почему физика — наука экспериментальная?
7. Что необходимо знать о физической величине?
8. Какие единицы физических величин являются основными в СИ?
9. Что выражают физические законы?
10. Что необходимо знать о физическом законе?
11. Сколько типов взаимодействия предполагает современная физическая картина мира?

Лекция 2 Математика в курсе физики

Прямоугольная система координат на плоскости

Для построения прямоугольной системы координат проводят две

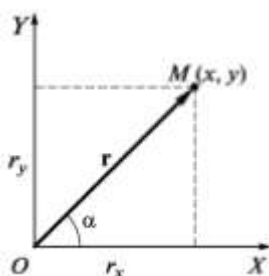


взаимно перпендикулярные оси OX и OY через точку O

Точку O называют началом координат. прямые OX , OY — осями координат (OX — ось абсцисс. OY — ось ординат). Положительные направления на осях принято выбирать так, чтобы положительный луч OX после поворота на 90° против часовой стрелки совмещался с положительным лучом OY . Оси координат с установленными положительными направлениями и выбранным масштабом образуют прямоугольную систему координат.

Положение любой точки M на плоскости можно определить двумя координатами (x, y) (см. рис). Координаты точки обычно обозначаются строчными латинскими буквами $M(x, y)$. Вектор om , идущий от начала координат к точке M . называется радиусом-вектором точки M и обозначается r или \vec{r} . длина радиуса-вектора. или его модуль $|\vec{r}|$: r . характеризует расстояние, на котором находится точка M от начала координат.

Дополнительную информацию о положении точки M дает угол α , образуемый положительным направлением OX с радиусом-вектором r (рис.



Координаты x и y связаны с r и α следующими соотношениями:

$$\begin{cases} x = r \cos \alpha; \\ y = r \sin \alpha. \end{cases}$$

Длина радиуса-вектора, или его модуль, выражается через координаты

формулой:

$$r = |r| = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Из формул следует

$$\cos \alpha = \frac{x}{r} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

$$\sin \alpha = \frac{y}{r} = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

Проекция радиуса-вектора на координатную ось равна координате по этой оси:

$$r_x = x = r \cos \alpha;$$

$$r_y = y = r \sin \alpha.$$

Векторные величины

Векторные физические величины характеризуются определенным числовым значением, соответствующей единицей измерения и направлением на плоскости или в пространстве (направленные величины):

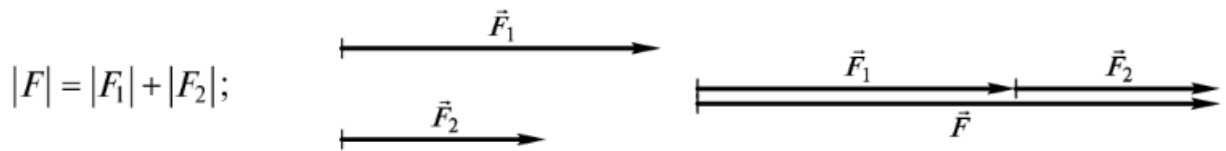
$$\vec{v}, \vec{F}, \vec{p} \text{ или } \mathbf{v}, \mathbf{F}, \mathbf{p}.$$

Эти величины изображаются графически с помощью стрелок в определенном масштабе. Направление стрелки указывает направление физической величины, длина показывает абсолютную величину (модуль) физической величины.

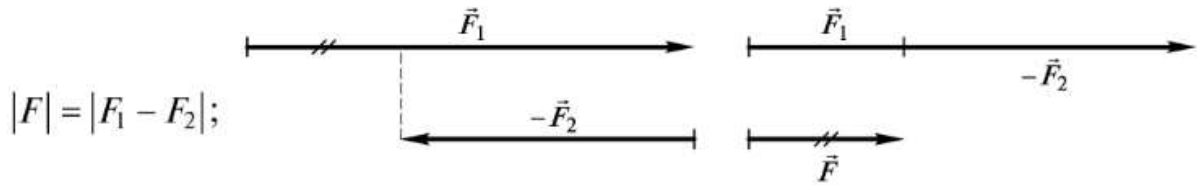
$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

Сложение векторных величин

Если у векторов одинаковые направления

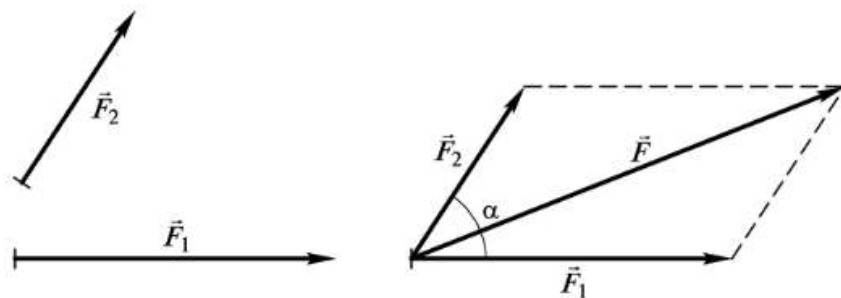


Если у векторов противоположные направления



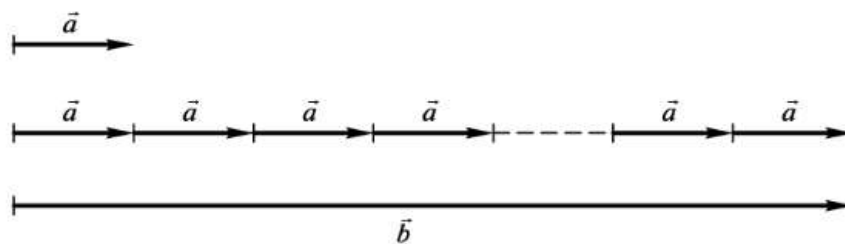
Если у векторов произвольные направления

$$|F|^2 = |F_1|^2 + |F_2|^2 + 2|F_1||F_2|\cos\alpha$$



Умножение векторных величин:

- *произведение векторной величины на скалярную.* Произведение $n \cdot \vec{a}$ векторной величины \vec{a} на скалярную величину n (n — положительная) равно векторной величине \vec{b} , имеющей такое же направление, как и векторная величина \vec{a} и ее абсолютная величина $|\vec{b}| = n \cdot |\vec{a}|$ (рис. В.6);



- *скалярное произведение двух векторных величин.* Скалярное произведение двух векторных величин \vec{a} и \vec{b} есть скалярная величина c , абсолютная величина которой равна произведению абсолютных величин (модулей) $|\vec{a}|$ и $|\vec{b}|$ векторов, умноженному на косинус угла между ними:

$$c = \vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \times \cos(\vec{a}; \vec{b}) = ab \cos(\vec{a}; \vec{b});$$

$$A = \vec{F} \cdot \vec{s} = A = Fs \cos \alpha \quad (\text{рис. В.7})$$

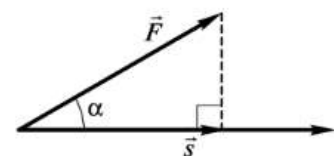


Рис. В.7

• *векторное произведение двух векторных величин.* Векторное произведение двух векторных величин \vec{a} и \vec{b} есть векторная величина \vec{c} , перпендикулярная плоскости, в которой расположены векторы \vec{a} и \vec{b} . Абсолютная величина вектора \vec{c} равна произведению абсолютных величин $|\vec{a}|$ и $|\vec{b}|$ векторов, умноженному на синус угла между ними. Его направление определяется так, что если смотреть из вершины \vec{c} , то наименьшее вращение от \vec{a} к \vec{b} осуществляется против движения часовой стрелки (как математически положительное вращение): $|\vec{c}| = |\vec{a} \times \vec{b}| = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \sin(\vec{a}; \vec{b}) = ab \sin(\vec{a}; \vec{b})$;

$$|\vec{M}| = |\vec{r} \times \vec{F}| = rF \sin \alpha \quad (\text{рис. В.8})$$

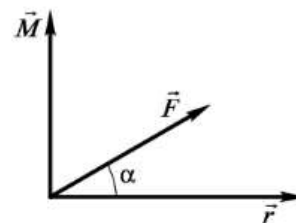


Рис. В.8

Некоторые формулы алгебры и тригонометрии

Корни квадратного уравнения

$$ax^2 + bx + c = 0, \quad x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}.$$

Основные тригонометрические формулы

$$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$$

$$\operatorname{tg} \alpha \operatorname{ctg} \alpha = 1$$

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta$$

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha$$

$$\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha$$

$$\sin^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{1 - \cos \alpha}{2}$$

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\sin \alpha - \sin \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\cos^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

Соотношения в прямоугольном треугольнике

$$a = c \sin \alpha; \quad a = b \operatorname{tg} \alpha;$$

$$b = c \cos \alpha; \quad b = a \operatorname{ctg} \alpha;$$

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad \text{— теорема Пифагора};$$

a, b — катеты; c — гипотенуза;

α — угол между сторонами b, c (рис. В.9).

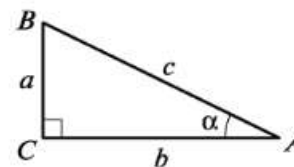


Рис. В.9

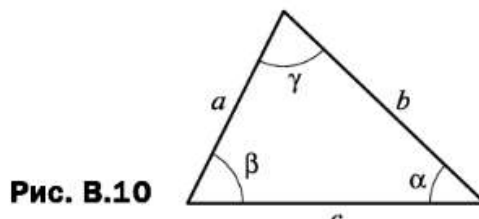
Соотношения в произвольном треугольнике

$$\frac{\sin \alpha}{a} = \frac{\sin \beta}{b} = \frac{\sin \gamma}{c} \text{ — теорема синусов.}$$

a, b, c — стороны треугольника;

α, β, γ — углы треугольника (рис. В.10).

$$\left. \begin{aligned} a^2 &= b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha \\ b^2 &= a^2 + c^2 - 2ac \cos \beta \\ c^2 &= a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma \end{aligned} \right\} \text{ — теорема косинусов.}$$



Правила округления

Если первая отбрасываемая цифра равна 5 или более, то последнюю из сохраняемых цифр увеличивают на единицу; если же первая отбрасываемая цифра меньше 5, то последнюю из сохраняемых цифр оставляют без изменения.

Пример: приближенное число 10,1385 можно округлить:

до тысячных долей — 10,139;

до сотых — 10,14;

до десятых — 10,1;

до целых — 10.

Приближенные вычисления

При решении физических задач мы имеем дело с приближёнными числовыми значениями. К ним относятся многие константы, например $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

В настоящее время в распоряжении обучающихся имеются различные счётно-вычислительные устройства, которые дают большое количество значащих цифр. Необходимо понимать, сколько цифр после запятой следует оставить, а сколько отбросить. Приведем правила приближённых вычислений:

1) при сложении и вычитании результат округляется так, чтобы не иметь значащих цифр в разрядах, которые отсутствуют хотя бы в одном из данных.

Пример: $3,351 + 2,45 + 1,2534 = 7,05$;

2) при умножении сомножители округляются так, чтобы каждый содержал столько значащих цифр, сколько их имеет сомножитель с наименьшим их количеством. В окончательном результате оставляют такое же количество значащих цифр, как в сомножителях после округления.

Пример: $2,51 \cdot 1,2 \cdot 5,245 = 2,5 \cdot 1,2 \cdot 5,2 = 15,6$;

3) при делении соблюдается такое же правило, как и при умножении.

Пример: $6,24 / 2,124 = 6,24 / 2,12 = 2,94$;

4) при возведении в квадрат (или куб) в результате берется столько значащих цифр, сколько их имеет основание степени.

Пример: $1,25^2 = 1,56$;

5. При извлечении корня квадратного (или кубического) в результате берется столько значащих цифр, сколько их имеет подкоренное выражение.

Пример: $\sqrt{6,82} = 2,61$.

Эти же правила следует применять при вычислении сложных выражений.

Лекция 3

Предмет и задачи классической механики. Кинематические характеристики механического движения.

Механика (*от греч. mechanike — искусство построения машин*) — наука о механическом движении материальных тел и происходящих при этом взаимодействиях между ними.

Кинематика (*от греч. kinematos — движение*) — раздел механики, в котором изучаются способы описания движений и связь между величинами, характеризующими эти движения. Кинематика изучает движения тел без учета причин, их вызывающих.

Динамика (*от греч. dynamis — сила*) — раздел механики, посвященный изучению движения материальных тел под действием приложенных к ним сил.

Механическое движение

Под *механическим движением* понимают изменение с течением времени взаимного положения тел или их частей в пространстве.

При изучении движения материальных тел, для упрощения решения некоторых задач в механике *используют модели* — материальную точку и абсолютно твердое тело.

Материальная точка — тело, обладающее массой, размерами которого в данной задаче можно пренебречь.

Абсолютно твердое тело — система материальных точек, расстояние между которыми с течением времени не изменяется.

Механическое движение происходит в пространстве и во времени.

В классической механике пространство однородно и изотропно, время — однородно.

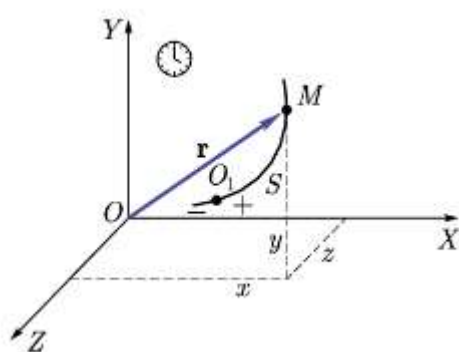
Однородность пространства означает равноправие всех его точек.

Изотропность пространства означает равноправие всех направлений в пространстве.

Однородность времени — равноправие всех моментов времени.

Для описания механического движения необходимо указать тело, относительно которого рассматривается движение.

Тело отсчета — произвольно выбранное тело, относительно которого определяется положение движущейся материальной точки.



Система отсчета — **совокупность тела отсчета, связанных с ним системы координат и часов.**

Положение материальной точки M в декартовой системе координат определяется тремя координатами: x , y , z или радиусом-вектором r .

Радиус-вектор r — вектор, проведенный из начала системы координат в данную точку. Длина радиуса-вектора r , т.е. его модуль $|r| = r$, определяет расстояние, на котором точка M находится от начала координат, а стрелка указывает направление на эту точку.

Траектория (от лат. *trajectorius* —относящийся к перемещению) — непрерывная линия, которую описывает точка при своем движении.

Виды движения. По форме траектории механическое движение классифицируют на прямолинейное и криволинейное.

Прямолинейное движение — это движение, траекторией которого в выбранной системе отсчета является прямая линия.

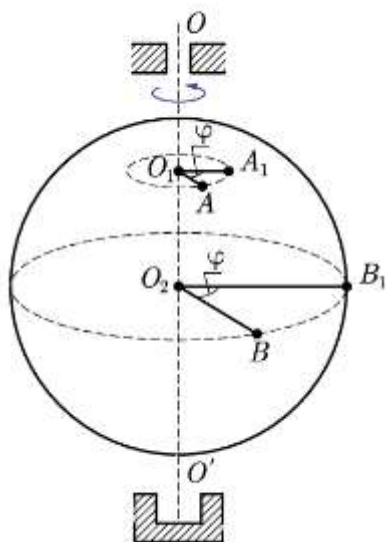
Криволинейное движение — это движение, траектория которого в выбранной системе отсчета — некоторая кривая линия.

Простейшими являются поступательное и вращательное движения твердого тела.

Поступательное движение — *это такое движение твердого тела, при котором прямая, соединяющая две любые точки тела, перемещается, оставаясь параллельной своему начальному положению*

Вращательное движение вокруг неподвижной оси — *это такое движение твердого тела, при котором все его точки описывают окружности, центры которых лежат на одной неподвижной прямой — оси вращения, перпендикулярной плоскостям этих окружностей.*

При вращательном движении твердого тела вокруг неподвижной оси $O O'$ его положение определяется углом поворота φ



Характеристики движения

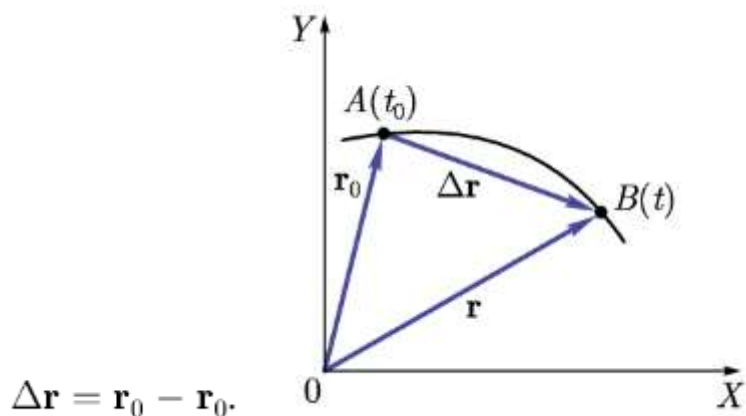
Путь. Путь является скалярной функцией времени.

Путь S — скаляр, равный длине участка траектории, пройденного движущейся точкой за данный промежуток времени.

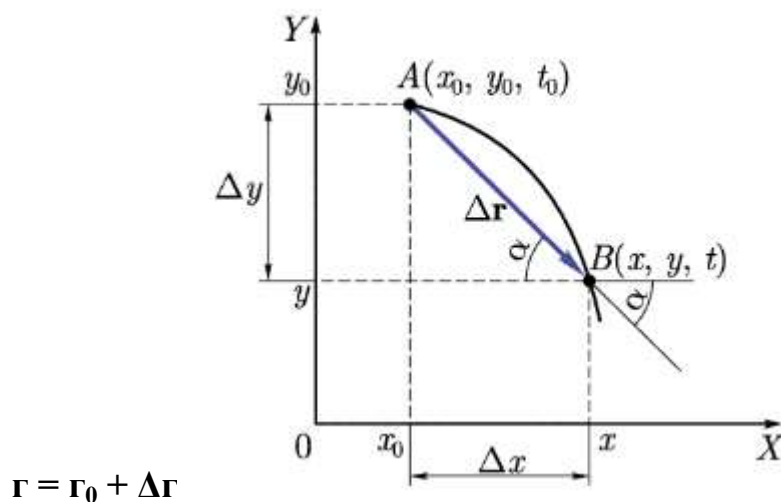
Единица пути — метр (м) является в СИ основной

При движении материальной точки путь не может уменьшаться и не бывает отрицательным $S \geq 0$

Перемещение Δr — вектор, соединяющий положения движущейся точки в начале и конце некоторого промежутка времени.



Если известен радиус-вектор в начальный момент времени \mathbf{r}_0 и известно перемещение $\Delta \mathbf{r}$, то можно найти радиус-вектор \mathbf{r} в любой последующий момент времени t



Векторному уравнению для движения точки на плоскости соответствуют два уравнения в координатной форме.

$$x = x_0 + \Delta x; y = y_0 + \Delta y$$

Модуль и направление перемещения полностью определяются его проекциями на оси ординат.

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$$

Направление вектора $\Delta \mathbf{r}$ можно задать углом α между вектором и положительным направлением оси X

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

Перемещение — векторная величина, поэтому действия с векторами перемещений проводятся по правилам векторной алгебры.

Скорость — векторная величина, характеризующая направление движения тела и быстроту его перемещения.

Скорость изображают направленным отрезком прямой, длина которого в выбранном масштабе характеризует модуль скорости.

Средняя скалярная(путевая) скорость — **физическая величина, равная отношению пути ΔS , пройденного телом за промежуток времени Δt , к длительности этого промежутка.**

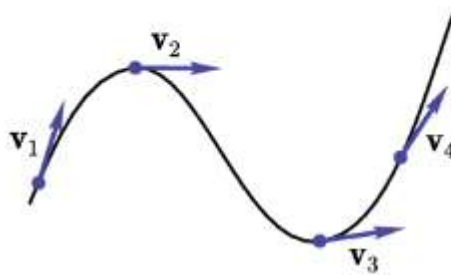
$$v_s = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

Единица измерения м/с

Средняя скорость является приблизительной характеристикой движения.

Скорость в данный момент времени ($\Delta t \rightarrow 0$) называют **мгновенной** (\mathbf{v})

Вектор мгновенной скорости направлен по касательной к траектории в направлении движения



Равномерное прямолинейное движение

Равномерное движение — движение, при котором тело перемещается с постоянной по модулю и направлению скоростью

$$v = \text{const.}$$

Если тело движется равномерно вдоль положительного направления оси X и в начальный момент времени $t=0$ находилось в точке с координатой x_0 а в произвольный момент времени t в точке с координатой x , то скорость движения равна

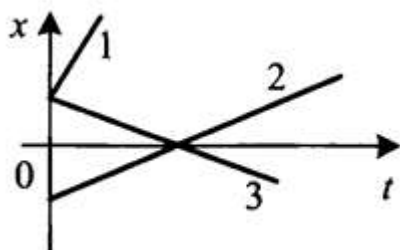
$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x - x_0}{t - t_0},$$

$$v_x = \frac{x - x_0}{t},$$

$$x = x_0 + v_x t.$$

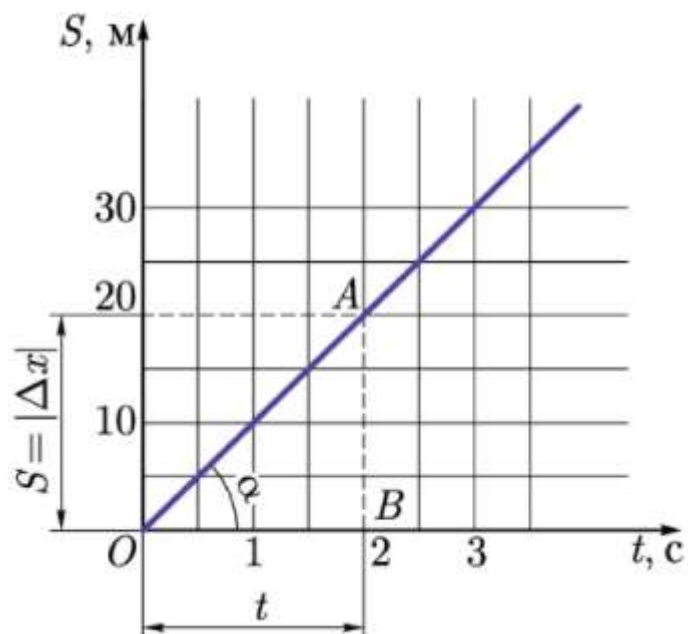
законом равномерного прямолинейного

движения.



При равномерном прямолинейном движении зависимость пути от времени является линейной

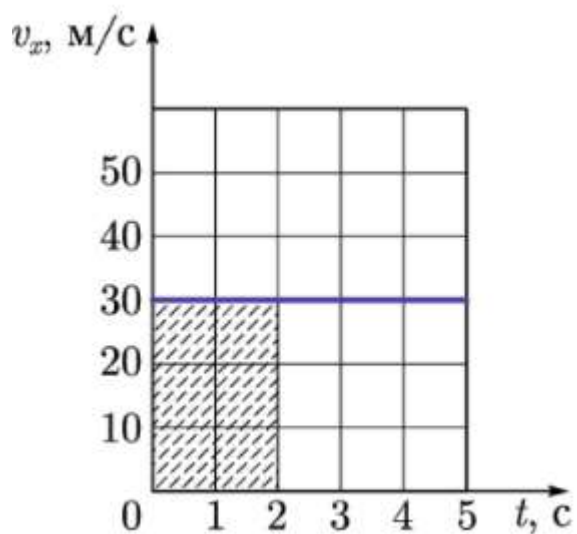
$$\Delta S = v_x t.$$



Проекция скорости по графику зависимости пути от времени определяется как:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{AB}{OB} = \frac{S}{t} = v_x; \quad v_x = \frac{20 \text{ м}}{2 \text{ с}} = 10 \text{ м/с}.$$

График зависимости проекции скорости от времени



По графику можно определить путь пройденный тело за определенный промежуток времени. Он будет равен площади фигуры расположенной под графиком.

Ускорение

Ускорение (от лат. *acceleratio* — ускорение) — векторная величина, характеризующая быстроту изменения скорости материальной точки по модулю и направлению.

Ускорение — векторная физическая величина, равная отношению изменения скорости материальной точки к длительности промежутка времени, в течение которого это изменение произошло:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$$

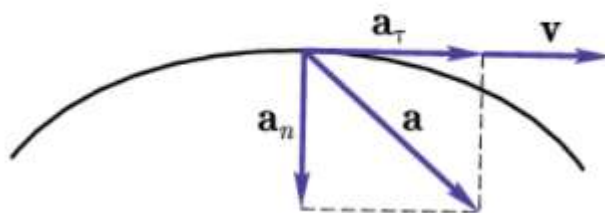
$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$$

В проекции на ось x

Единица измерения м/с^2

Вектор ускорения a направлен так же, как вектор изменения скорости

При криволинейном движении, в общем случае, вектор a направлен в сторону вогнутости траектории движения материальной точки.



Составляющая a_n , вектора ускорения a , направленная вдоль нормали к траектории в данной точке, называется **нормальным ускорением**.

Нормальное ускорение характеризует изменение вектора скорости по направлению при криволинейном движении.

Составляющая a_t вектора ускорения a , направленная вдоль касательной к траектории в данной точке, называется **тангенциальным, или касательным, ускорением**.

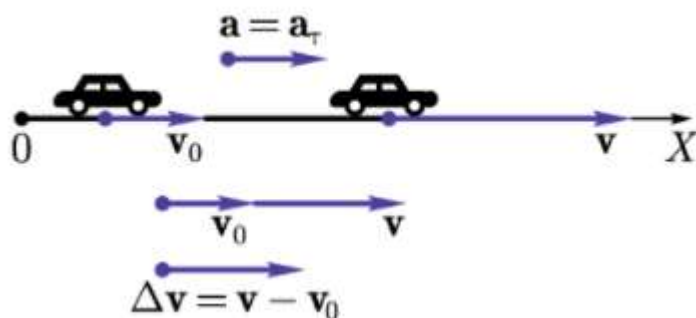
Модуль вектора a

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}.$$

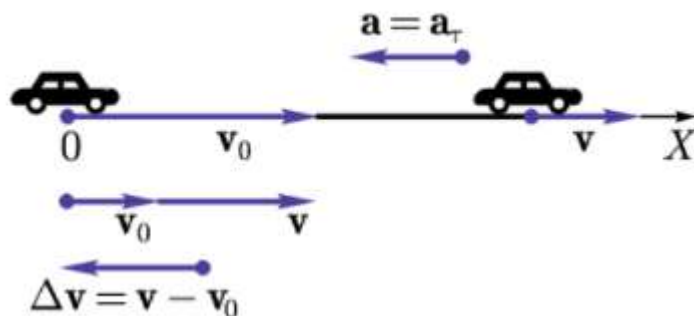
При прямолинейном равномерном движении $v = \text{const}$, т. е. скорость тела не изменяется ни по модулю, ни по направлению, поэтому $a = 0$.

При прямолинейном движении скорость тела изменяется только по модулю, т.е. $a_n = 0$, поэтому $a = a_t$

Разгон



Торможение



Равнопеременное движение — это движение, при котором ускорение остается постоянным по модулю и направлению: $\mathbf{a} = \text{const}$.

Равнопеременное движение может быть либо равноускоренным, либо равнозамедленным

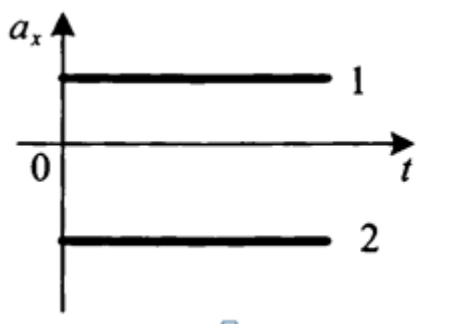
Равноускоренное прямолинейное движение — это движение, при котором ускорение постоянно по модулю и направлению, и векторы скорости и Ускорения являются равнонаправленными:

$$\mathbf{a} = \text{const}; \mathbf{v} \uparrow \uparrow \mathbf{a}, \mathbf{a} > 0.$$

Равнозамедленное прямолинейное движение — это движение, при котором ускорение постоянно по модулю и направлению и векторы скорости и ускорения противоположно направлены:

$$\mathbf{a} = \text{const}; \mathbf{v} \uparrow \downarrow \mathbf{a} \Rightarrow |\mathbf{a}| < 0.$$

График зависимости проекции ускорения тела от времени



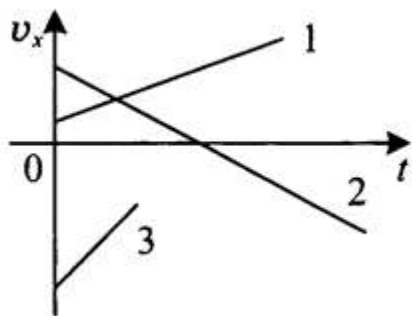
При равнопеременном прямолинейном движении зависимость скорости движения материальной точки от времени является линейной

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t .$$

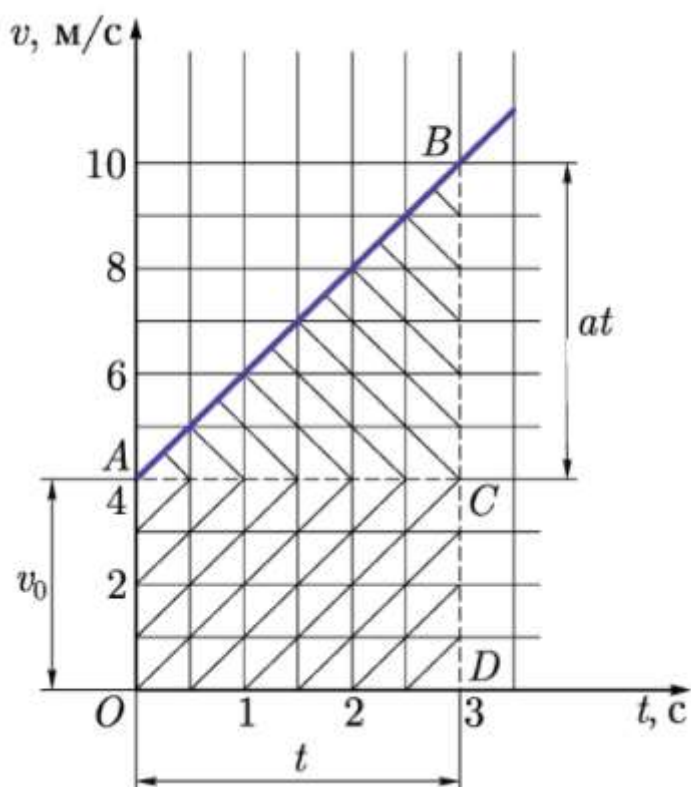
С учётом знака ускорения («+» разгон, «-» торможение):

$$v = v_0 \pm at .$$

График зависимости проекции скорости от времени



По графику зависимости, аналогично с равномерным движением, пройденный путь есть площадь фигуры под графиком



Закон равнопеременного прямолинейного движения в общем виде

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$$

Графики кинематических величин прямолинейного движения

	Покой $a_x = 0$ $v_x = 0$ $s_x = 0$ $x = x_0$	Равномерное движение $a_x = 0$ $v_x = \text{const}$ $s_x = v_x t$ $x = x_0 + v_x t$ $\bar{v}_1 \uparrow \uparrow OX$ $\bar{v}_2 \uparrow \downarrow OX$	Равноускоренное движение $a_x = \text{const},$ $\bar{a} \uparrow \uparrow \bar{v}_0, \bar{v}_0 \uparrow \uparrow OX$ $v_x = v_0 + at$ $s_x = v_0 t + \frac{at^2}{2}$ $x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}$	Равнозамедленное движение $a_x = \text{const},$ $\bar{a} \uparrow \downarrow \bar{v}_0, \bar{v}_0 \uparrow \uparrow OX$ $v_x = v_0 - at$ $s_x = v_0 t - \frac{at^2}{2}$ $x = x_0 + v_0 t - \frac{at^2}{2}$
$a_x(t)$				
$v_x(t)$				
$s_x(t)$				
$l(t)$				
$x(t)$				

Учтите: путь $l(t)$ всегда возрастающая функция.

Вопросы для самоконтроля и повторения

1. Какое движение называется механическим?
2. Какое тело можно считать материальной точкой?
3. Чем различаются понятия «система отсчета» и «система координат»?
4. Что такое траектория движения?
5. Что такое вектор перемещения?
6. Что характеризует скорость движения тела?
7. Как направлен вектор мгновенной скорости?
8. Какое движение называют равномерным прямолинейным?
9. Что характеризует ускорение?
10. Что характеризуют тангенциальное и нормальное ускорения? Как они направлены?
11. Какое прямолинейное движение называют равноускоренным; равнозамедленным?

Лекция 4

Свободное падение. Движение тела, брошенного под углом к горизонту.

Свободное падение.

Свободное падение — это движение тел в безвоздушном пространстве.

На основании опытов Галилей сделал вывод: свободно падающее тело подчиняется закону $x \sim t^2$. При изучении и описании этих опытов Галилей вводит в физику новое понятие — **ускорение**.

Чтобы исключить действие силы сопротивления воздуха из стеклянной трубки, в которую помещали различные предметы, откачивали воздух. Тогда предметы, находящиеся в ней, например пушинка и дробишка, падали в одном темпе, т. е. синхронно.

Ускорение свободного падения (g) — это ускорение, с которым падают все тела на Землю независимо от их массы в отсутствие сил сопротивления воздуха.

Из измерений, сделанных с помощью стробоскопа, следует, что тела падают с ускорением 980 см/с^2

Свободное падение. Свободное падение тела с высоты h аналогично равноускоренному движению, происходящему вдоль оси Y , положительное направление которой совпадает с направлением вектора g . Учитывая, что $g = \text{const}$, уравнение движения будет иметь вид

$$y = y_0 + v_0 t + \frac{gt^2}{2}$$

Скорость свободно падающего тела будет изменяться по закону

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{g}t.$$

Если в момент времени $t_0 = 0$ направления векторов \mathbf{v}_0 и \mathbf{g} совпадали, то в проекции на ось Y

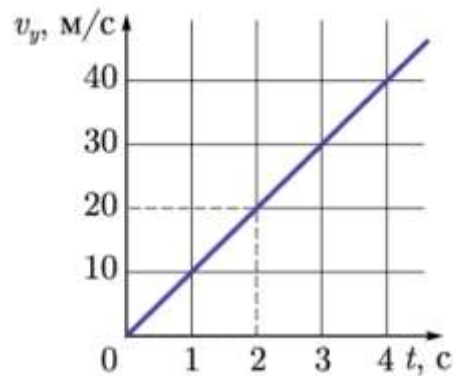
$$v_y = v_{0y} + gt.$$

Свободное падение без начальной скорости ($v_{0y} = 0$) аналогично равноускоренному движению, происходящему вдоль оси Y , положительное направление которой совпадает с направлением вектора g , а начало отсчета ($t_0 = 0$; $y_0 = 0$) находится в верхней точке траектории свободно падающего тела. Закон движения по оси Y в этом случае имеет вид

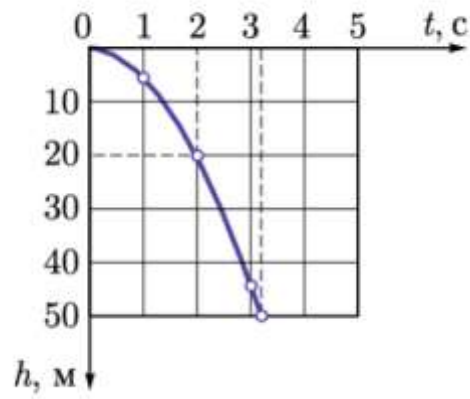
$$y = \frac{gt^2}{2}$$

а зависимость скорости движения тела по оси Y от времени

$$\mathbf{v} = \mathbf{g}t \quad \text{или} \quad v_y = gt$$



Время падения тела на Землю с высоты h можно определить, если в формулу подставить $y = h$:

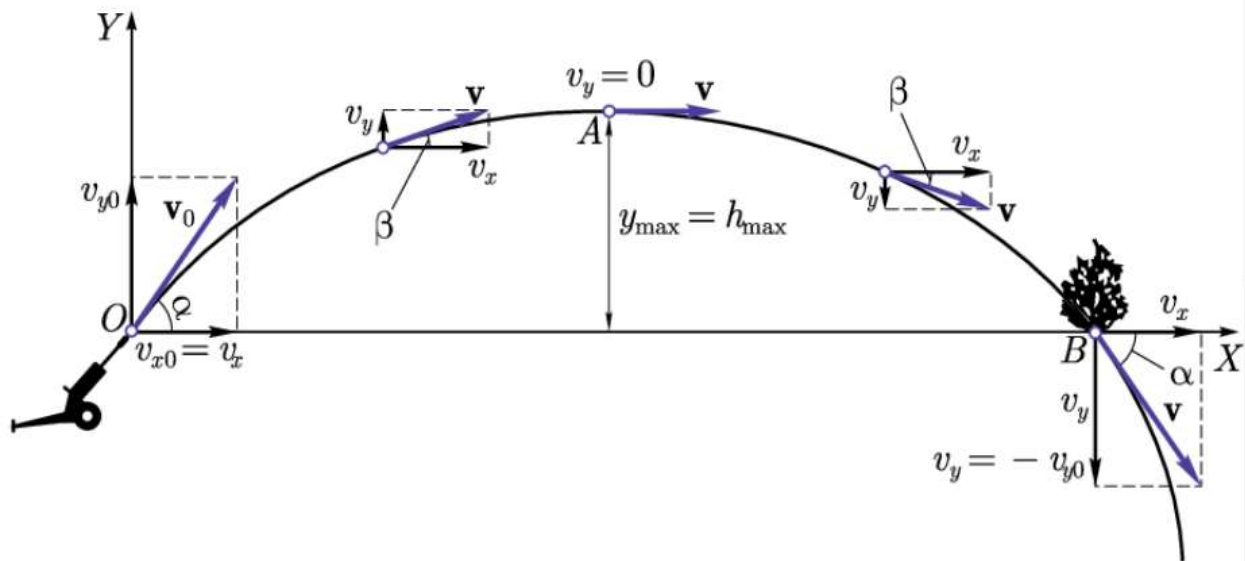


$$h = \frac{gt^2}{2} \quad t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

Движение тела, брошенного под углом к горизонту

Если телу сообщить начальную скорость \mathbf{v}_0 , направленную под углом α к горизонту, то его движение будет криволинейным. Это движение можно рассматривать в плоскости $X O Y$ как результат сложения двух прямолинейных движений — равномерного вдоль оси X и равнопеременного по оси Y с ускорением g

Траекторией движения тела является парабола



для начального момента времени $t_0 = 0$

$$(x_0 = 0; v_{x0} = v_0 \cos \alpha)$$

$$(y_0 = 0; v_{y0} = v_0 \sin \alpha)$$

Закон равномерного движения вдоль оси X имеет вид:

$$x = x_0 + v_{x0}t.$$

$$x_0 = (v_0 \cos \alpha)t$$

С учетом начальных условий

Закон равнопеременного движения вдоль оси Y имеет вид

$$y = y_0 + v_{y0}t - \frac{gt^2}{2}$$

$$y = (v_0 \sin \alpha)t - \frac{gt^2}{2}$$

С учетом начальных условий

Наибольшая высота подъема.

Наибольшую высоту подъема $h_{\max} = y_{\max}$ можно определить из

уравнения $y = (v_0 \sin \alpha)t - \frac{gt^2}{2}$, если будет известно время движения тела от точки O до точки A , т. е. время подъема.

При движении тела от точки O до точки A скорость тела изменяется. Движение вдоль оси Y будет равнозамедленным $v_y = v_0 \sin \alpha - gt$. В наивысшей точке подъема вектор скорости v параллелен оси X (см. рис.), поэтому проекция v на ось Y равна нулю: $v_0 \sin \alpha - gt = 0$ Следовательно, время подъема равно

$$t_{\text{под}} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}.$$

Подставив найденное время подъема в уравнение для координаты y , получим

$$y_{\max} = v_0 \sin \alpha \frac{v_0 \sin \alpha}{g} - \frac{g}{2} \left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g} \right)^2,$$

ИЛИ

$$y_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{g} - \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}.$$

$$h_{\max} = y_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}, \quad 0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$$

Таким образом

Наибольшая высота подъема пропорциональна квадрату начальной скорости и будет максимальна при угле бросания $\alpha = \pi/2$ так как $\sin \pi/2 = 1$. В этом случае тело движется прямолинейно вертикально вверх и высота подъема, как следует из (1.45), равна

$$h = \frac{v_0^2}{2g}.$$

Дальность полета.

Дальность полета определяется координатой точки падения тела на поверхность Земли, т.е. координатой точки В (см. рис.). Координату

точки В найдем из уравнения $x_0 = (v_0 \cos \alpha)t$, подставив в него время полета тела от точки О до точки В.

Так как парабола симметрична относительно вершины (точки А), то время подъема равно времени падения, т.е. время полета t равно удвоенному времени подъема

$$t = 2t_{\text{под}} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}.$$

Подставив время движения в уравнения движения вдоль оси x получим:

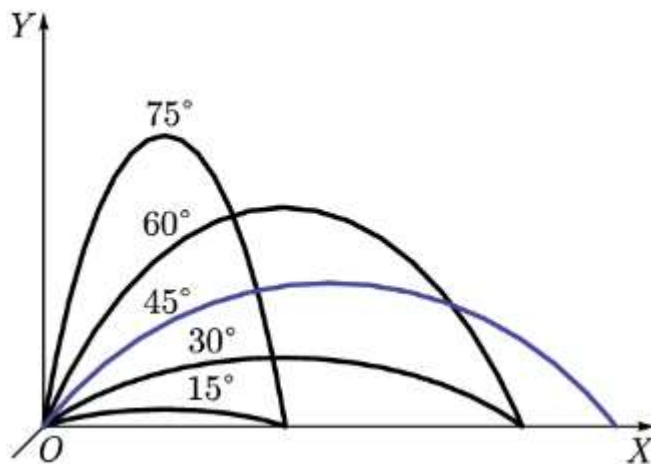
$$x_{\max} = v_0 \cos \alpha \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$$

Учитывая $2 \sin \alpha \cos \alpha = \sin 2\alpha$,

$$x_{\max} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$$

Как следует из формулы (1.48), дальность полета при данной начальной скорости будет наибольшей, когда $\sin 2\alpha = 1$, т.е. $2\alpha = \pi/2$, или $\alpha = \pi/4 = 45^\circ$ (рис).

Если сопротивлением воздуха пренебречь, то максимальная дальность полета тела будет при угле бросания 45° к горизонту.



Вопросы для самоконтроля и повторения

1. Дайте определение ускорения свободного падения.
2. Чем отличается падение тел в воздухе от падения в вакууме?
3. По какой траектории движется тело, брошенное под углом к горизонту?
4. Как влияет сила сопротивления воздуха на дальность полета снарядов?

5. У верхнего конца трубки, расположенной вертикально, находятся дробинка и пробка. Какое из тел при одновременном старте первым достигнет нижнего конца трубки, если из нее откачен воздух?

6. Тело из состояния покоя свободно падает на Землю в течение 4 с. С какой высоты оно падает и какую скорость будет иметь в момент приземления?

7. Два тела свободно падают: одно — с высоты 20 м, а другое — с высоты 80 м. С какой скоростью приземлятся тела? Определить время падения.

8. С вертолета, находящегося на высоте 200 м, сброшен груз. Через какое время груз упадет на Землю, если вертолет неподвижен.

9. В какой точке траектории тела брошенного под углом к горизонту у него наименьшая скорость? Почему?

Лекция 5

Равномерное движение по окружности

Движение по окружности является простейшим примером периодического движения.

Периодическое движение — это движение, повторяющееся через определенный промежуток времени. Например, вращение Земли вокруг собственной оси, вращение Земли вокруг Солнца. Характеристикой периодического движения является период (T).

Период — минимальный промежуток времени, через который движение повторяется, т. е. время одного оборота.

Единица периода — секунда (с).

Зная период вращения, можно определить частоту вращения (ν).

Частота вращения — величина, показывающая число оборотов в единицу времени:

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

Единица частоты — секунда в минус первой степени (с^{-1}).

1 с^{-1} равна частоте равномерного вращения, при которой за время 1 с тело совершает один полный оборот.

Линейная скорость.

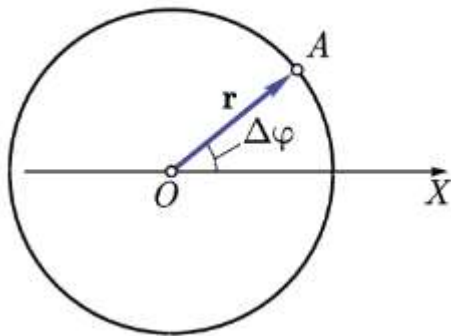
Скорость движения тела по окружности называют **линейной скоростью**. Определим линейную скорость Земли. Землю, движущуюся вокруг Солнца, можно рассматривать как материальную точку, так как радиус Земли $R=6,4 \cdot 10^6$ м много меньше среднего расстояния от Земли до Солнца. Среднее расстояние от Земли до Солнца называют **одной астрономической единицей** (1 а. е.), 1 а. е. = $1,5 \cdot 10^{11}$ м. Траектория движения Земли вокруг Солнца — эллипс, но фокусы эллипса близко расположены друг к другу, поэтому можно считать, что Земля вокруг Солнца

движется по окружности радиуса $R = 1,5 \cdot 10^{11}$ м. За один оборот, т.е. за время, равное периоду $T = 1 \text{ год} = 3,16 \cdot 10^7$ с, Земля проходит путь, равный длине окружности $S = 2\pi R$, двигаясь с линейной скоростью v :

$$v = \frac{S}{T} = \frac{2\pi R}{T} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}}{3,16 \cdot 10^7 \text{ с}} \approx 2,9 \cdot 10^4 \text{ м/с.}$$

Угол поворота.

При движении точки по окружности радиус r является величиной постоянной $r = \text{const}$. Проведем координатную ось X через центр окружности O , вдоль которой движется точка (рис.)



Центр окружности O — начало координат. Положение точки A на окружности в любой момент времени однозначно определяется углом $\Delta\varphi$ между положительным направлением оси X и радиусом-вектором r , проведенным из начала координат к движущейся точке.

Угол $\Delta\varphi$ отсчитывается от положительного направления оси X до радиуса-вектора r против часовой стрелки. Углы выражают в радианах. Угол 360° соответствует 2π радиан.

При повороте радиуса-вектора r на угол $\varphi = 2\pi$ точка проходит путь S , равный длине окружности $S = 2\pi r$ при повороте радиуса-вектора r на угол $\Delta\varphi$ точка проходит путь, равный длине дуги ΔS . Из пропорции $2\pi : 2\pi r = \Delta\varphi : \Delta S$; определим ΔS

$$\Delta S = \frac{2\pi r \Delta\varphi}{2\pi} = r\Delta\varphi.$$

$$S = r\Delta\varphi, 0 \leq \Delta\varphi \leq 2\pi.$$

Линейный путь ΔS равен произведению модуля радиуса-вектора $|r|$ точки на его угол поворота $\Delta\varphi$.

Равномерное движение точки по окружности.

Равномерное движение по окружности — движение, при котором точка движется с постоянной по модулю линейной скоростью: $|\mathbf{v}| = \text{const}$

При равномерном движении по окружности за равные промежутки времени:

- точка проходит равные по длине дуги окружности;
- радиус-вектор точки поворачивается на равные углы

Быстроту поворота радиуса-вектора движущейся по окружности точки характеризует угловая скорость.

Угловую скорость обозначают греческой буквой ω (омега)

Угловая скорость — физическая величина, равная отношению угла поворота радиуса-вектора $\Delta\varphi$ к промежутку времени Δt , за который этот поворот произошел:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad \Delta\varphi = \omega\Delta t$$

Единица угловой скорости — радиан в секунду (рад/с).

1 рад/с равен угловой скорости равномерно вращающейся точки, радиус-вектор которой за время 1 с поворачивается на угол 1 радиан.

Угловую скорость можно выразить через период обращения T . За время, равное периоду ($\Delta t = T$), радиус-вектор точки поворачивается на угол 2π ($\Delta\varphi = 2\pi$):

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

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

Используя соотношения $\omega = \frac{2\pi}{T}$ выразим угловую скорость через частоту вращения:

$$\omega = 2\pi\nu.$$

Между модулем линейной скорости точки, обращающейся по окружности, и ее угловой скоростью имеется связь. За промежуток времени Δt точка проходит путь $\Delta S = v \cdot \Delta t$, а радиус-вектор поворачивается на угол $\Delta\varphi = \omega \Delta t$. Учитывая, что $S = r \Delta\varphi$, имеем

$$v \Delta t = r \omega \Delta t$$

$$v = \omega r.$$

Модуль линейной скорости точки, движущейся по окружности, равен произведению угловой скорости на радиус окружности.

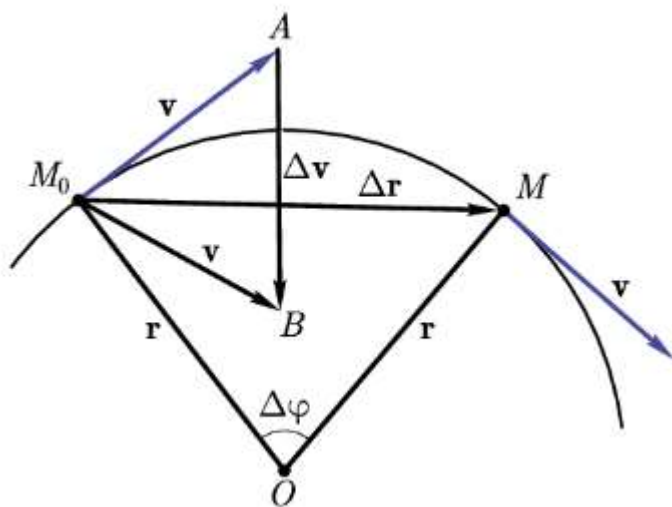
Из формулы следует, **чем больше радиус окружности, тем больше линейная скорость.**

При вращении Земли вокруг собственной оси максимальная линейная скорость у тел, расположенных на экваторе, минимальная и равна нулю на полюсах; угловая скорость при этом одинакова.

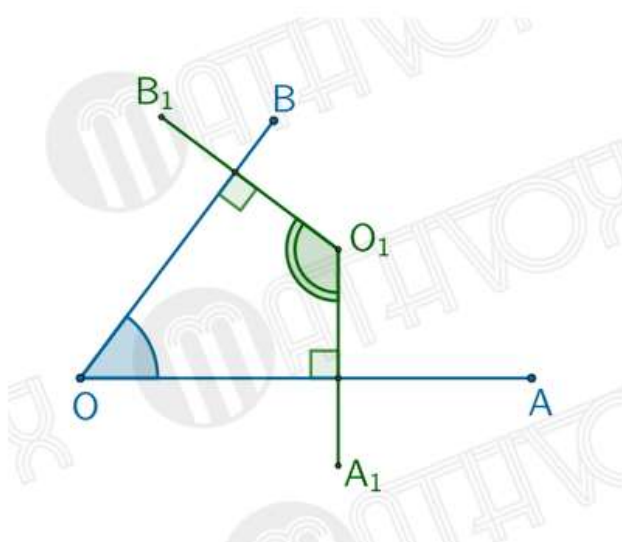
Центростремительное ускорение.

При равномерном вращении материальной точки по окружности модуль ее линейной скорости постоянный, следовательно, тангенциальное, или касательное, ускорение равно нулю. Изменение вектора скорости v по направлению характеризует нормальное, или центростремительное, ускорение a_n .

Вектор скорости v в любой точке окружности направлен по касательной к ней. Рассмотрим положение движущейся материальной точки в двух точках на окружности M_0 и M в близкие моменты времени t и $t + \Delta t$



За промежуток времени Δt радиус-вектор повернется на угол $\Delta\varphi$, материальная точка переместится на Δr , скорость изменится на Δv . Модуль изменения скорости $|\Delta v|$ равен стороне AB треугольника M_0AB , построенного на векторах скоростей, как на сторонах. Равнобедренные треугольники M_0OM и M_0AB подобны, так как $\text{угол } M_0OM = \angle AM_0B = \Delta\varphi$ как углы со взаимно-перпендикулярными сторонами. Из подобия треугольников следует,



Сторона OA перпендикулярна стороне O_1A_1 , сторона OB перпендикулярна стороне O_1B_1 ,

поэтому $\angle O + \angle O_1 = 180^\circ$

что

$$\frac{\Delta v}{\Delta r} = \frac{v}{r} \quad \text{откуда} \quad \Delta v = \frac{v}{r} \Delta r.$$

$$a_n = \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

По определению, мгновенное ускорение равно

$$a_n = \frac{v}{r} \frac{\Delta r}{\Delta t}.$$

Учитывая выражение, полученное для Δv , имеем:

$$\text{Учитывая, что } \frac{\Delta r}{\Delta t} = v, \quad \text{получим} \quad a_n = \frac{v^2}{r}$$

При равномерном движении материальной точки по окружности ее ускорение направлено перпендикулярно скорости, по радиусу к центру окружности, поэтому его называют нормальным, или центростремительным.

Учитывая связь между линейной и угловой скоростью получим

$$a_n = \omega^2 r.$$

Вопросы для самоподготовки повторения

1. Что такое период движения?
2. Дайте определение угловой скорости.
3. Почему равномерное движение по окружности является ускоренным?
4. Чему равно центростремительное ускорение и куда оно направлено?
5. Какая связь существует между линейной и угловой скоростями?
6. Чему равна угловая скорость вращения точек Земной поверхности на широте Санкт-Петербурга ($\varphi = 60^\circ$)?

7. Сколько оборотов в секунду делают колеса грузового автомобиля диаметром 1,5 м при скорости движения 72 км/ч.

8. Определить линейную скорость точек, лежащих на земной поверхности на широте Москвы ($\varphi = 56^\circ$)

Лекция 6

Законы механики

Динамика отвечает на вопрос: почему тело движется?

Основывается на 3-х законах.

Первый закон Ньютона

Покой и движение относительно, зависят от выбора начала отсчета.

Самым простым видом движения тела является равномерное прямолинейное движение, при котором скорость — величина постоянная. В состоянии покоя скорость тоже величина постоянная и равна нулю. Следовательно, покой — частный случай прямолинейного равномерного движения.

Первый закон Ньютона — закон инерции

***Первый закон Ньютона:* любая материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока внешние воздействия со стороны других тел не изменят этого состояния.**

Первый закон Ньютона выполняется в системах отсчета, которые называются *инерциальными*, и устанавливает факт существования инерциальных систем отсчета.

В инерциальных системах отсчета свободное тело движется прямолинейно и равномерно.

Равномерное прямолинейное движение свободного тела в инерциальной системе отсчета называют движением по инерции. При движении по инерции скорость свободного тела не изменяется ни по модулю, ни по направлению, т. е. $v = \text{const}$.

Сила в механике.

Сила F — это векторная физическая величина, являющаяся мерой механического воздействия на тело со стороны других тел или полей.

Сила, как и любая векторная величина, считается заданной, если известны ее модуль, направление в пространстве и точка приложения. Прямая, вдоль которой направлена сила, называется *линией действия силы*.


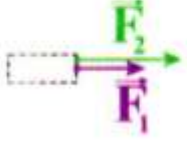


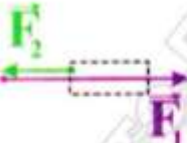


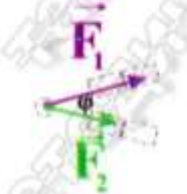


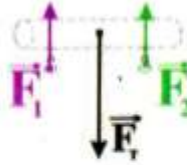
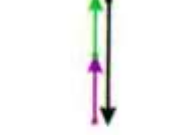
В механике рассматриваются гравитационные силы, или силы тяготения, и разновидности электромагнитных сил — сила упругости и сила трения.

Принцип независимости действия сил, если на материальную точку (тело) одновременно действуют несколько сил, то каждая из сил действует независимо от других сил.

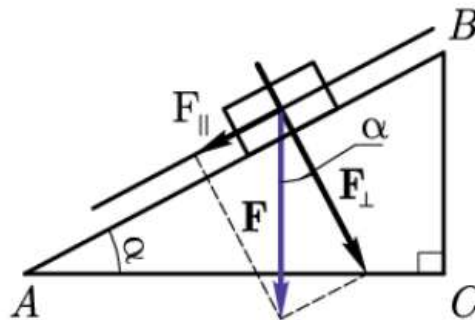
Система нескольких сил, одновременно действующих на материальную точку, можно заменить *равнодействующей силой*, равной их геометрической сумме:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2.$$

Сложение сил

СИТУАЦИЯ	ДЕЙСТВУЮЩИЕ СИЛЫ	ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА СИЛ	МОДУЛЬ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЙ СИЛЫ
			$F_p = F_1 + F_2$
			$F_p = F_1 - F_2$
			$F_p^2 = F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos\varphi$
			$F_p = F_1 + F_2 - F_3 = 0$

Разложение силы на составляющие



Масса — мера инертности.

Инертность — свойство тела сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, когда действующие на него силы отсутствуют или взаимно уравновешены

Масса (от лат. *massa* — ком, кусок, груды) — это физическая величина, являющаяся мерой инертности тела при поступательном движении.

Масса — величина скалярная. Единица массы — килограмм (кг).

1 кг — это масса эталона, отлитого из сплава платины и иридия (90 % Pt, 10 % Ir) в виде цилиндра (международный прототип килограмма), высота которого (39 мм), равна его диаметру, хранящегося в международном бюро мер и весов в Севре близ Парижа. Все страны имеют точные копии этого эталона.

В классической механике, или механике Ньютона, т. е. когда скорость движения макротел v много меньше скорости света c в вакууме ($v \ll c$), считается, что *масса тела не зависит от скорости его движения.*

Масса — величина аддитивная, т. е. масса тела равна сумме масс всех частиц из которых оно состоит

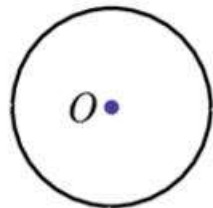
Для массы выполняется закон сохранения

Масса замкнутой системы тел остается неизменной при любых процессах, происходящих в системе.

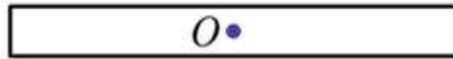
В случае движения твердого тела вместо тела рассматривают движение одной точки:

Центр масс — это точка, в которой может считаться сосредоточенной масса тела при его поступательном движении.

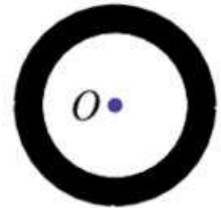
Центр масс однородного шара совпадает с его центром (рис. *а*). Центр масс однородного стержня находится в его середине (*б*) Центр масс тела может находиться и вне тела, например центр масс однородного обода или кольца (*в*)



a



б



в

Пример. Система состоит из двух материальных точек массами m_1 и m_2 .



Рис. 3 – Система из двух материальных точек

Предположим, что

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{l_2}{l_1} \quad (1)$$

где l_1 и l_2 - векторы, проведенные от точек к центру масс;

r_1 и r_2 - радиус-векторы точек;

r_c - радиус-вектор, проведенный из начала координат к центру масс точек.

Из рисунка 3 видно

$$\begin{aligned} \vec{r}_1 + \vec{l}_1 &= \vec{r}_c \\ \vec{r}_2 + \vec{l}_2 &= \vec{r}_c \end{aligned} \quad (2)$$

Умножим (2) на m_1 и m_2 соответственно

$$m_1 \vec{r}_1 + m_1 \vec{l}_1 = m_1 \vec{r}_c \quad (3)$$

$$m_2 \vec{r}_2 + m_2 \vec{l}_2 = m_2 \vec{r}_c \quad (4)$$

Сложим (3) и (4), получим

$$m_1 \vec{r}_1 + m_1 \vec{l}_1 + m_2 \vec{r}_2 + m_2 \vec{l}_2 = m_1 \vec{r}_c + m_2 \vec{r}_c \quad (5)$$

Так как

$$m_1 \vec{l}_1 = -m_2 \vec{l}_2$$

то (5) можно записать в виде

$$m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 = (m_1 + m_2) \vec{r}_c \quad (6)$$

Из (6) следует, что для системы из двух тел положение центра масс задается радиус-вектором

$$\vec{r}_c = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2}{m_1 + m_2} \quad (7)$$

Для системы из произвольного числа материальных точек

$$\vec{r}_c = \frac{\sum_i m_i \vec{r}_i}{\sum_i m_i}$$

где m_i – масса i -го элемента;
 r_i – радиус-вектор i -го элемента. (8)

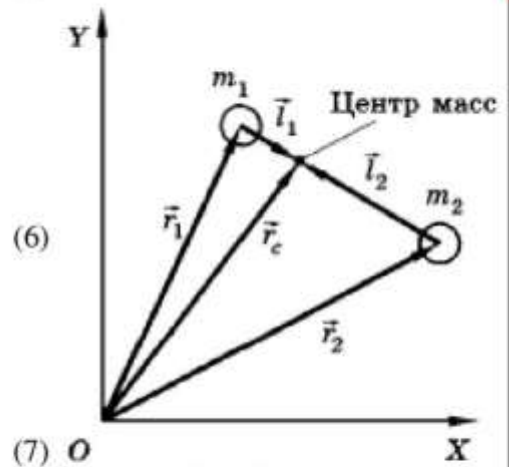


Рис. 3 – Система из двух материальных точек

Импульс тела

Импульс материальной точки p — векторная величина, равная произведению массы m точки на скорость v ее движения:

$$p = mv.$$

Единица импульса — килограмм-метр в секунду (кг·м /с).

1 кг · м /с равен импульсу материальной точки массой 1 кг, движущейся со скоростью 1 м/с.

векторы скорости и импульса являются сонаправленными.

Второй закон Ньютона

Второй закон Ньютона-, ускорение тела в инерциальной системе отсчета пропорционально действующей на тело силе и обратно пропорционально массе тела:

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

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}.$$

Векторы ускорения \mathbf{a} и силы \mathbf{F} сонаправлены:

Единица силы — ньютон (Н).

1 Н равен силе, которая телу массой 1 кг сообщает ускорение 1 м/с^2 в направлении действия силы: $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг м/с}^2$.

Если на тело действует несколько сил, то в формуле закона Ньютона (2.7) под силой \mathbf{F} следует понимать равнодействующую этих сил. Такой вывод вытекает из принципа независимости действия сил.

Основной закон классической динамики

изменение импульса тела пропорционально приложенной к нему силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

Математически этот закон можно записать так:

$$\Delta(m\mathbf{v}) = \mathbf{F}\Delta t \text{ или } \Delta\mathbf{p} = \mathbf{F}\Delta t$$

где $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ — импульс тела.

Произведение силы \mathbf{F} на время ее действия Δt , т.е. $\mathbf{F}\Delta t$ называют импульсом силы.

Единица импульса силы — ньютон • секунда (Н с).

1 Н • с равен импульсу силы 1 Н, действующей в течение 1 с.

Второй закон Ньютона можно сформулировать еще и следующим образом:

Импульс силы, действующей на тело, равен изменению импульса тела

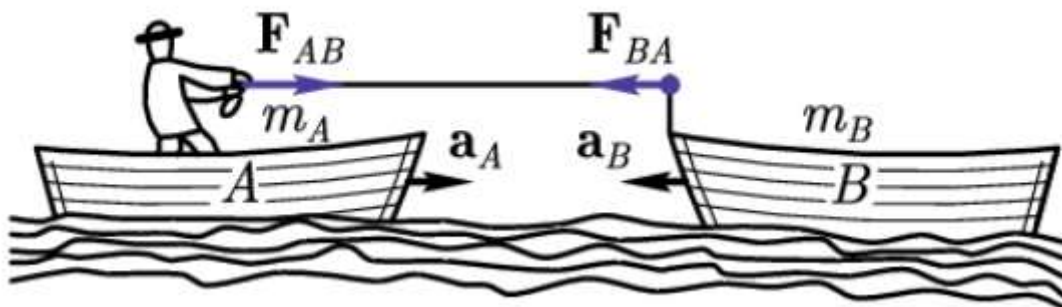
$$\mathbf{F} = \frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t}$$

откуда видно, что сила, действующая на тело, равна изменению импульса тела за единицу времени. Значит, *изменение импульса тела, а следовательно, и скорости не может происходить мгновенно.*

Третий закон Ньютона

Третий закон Ньютона: силы взаимодействия двух тел в инерциальной системе отсчета равны по модулю, противоположны по направлению и действуют вдоль прямой, соединяющей эти тела:

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



Ускорения, приобретаемые телами при взаимодействии, обратно пропорциональны массам взаимодействующих тел. Чем больше масса тела, тем меньше его ускорение.

$$\frac{a_A}{a_B} = \frac{m_B}{m_A}$$

Закон всемирного тяготения

По известным кинематическим законам движения планет Ньютон определил силу всемирного тяготения и установил закон, который является фундаментальным законом природы.

Закон всемирного тяготения: любые две материальные точки притягиваются друг к другу с силой, пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

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

Коэффициент пропорциональности G называется **гравитационной постоянной**

Гравитационная постоянная численно равна модулю силы тяготения двух тел, массой 1 кг каждое, находящихся на расстоянии 1 м друг от друга:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2), \text{ или } G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2.$$

Гравитационные силы—силы притяжения— направлены вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие точки, поэтому являются *центральными силами*.

Если тело массой m находится над поверхностью Земли на высоте h , то на него действует сила земного притяжения — тяготения, определяемая по формуле:

$$F = G \frac{mM_{\oplus}}{(R_{\oplus} + h)^2}$$

Силы в механике

Сила тяжести — сила, действующая на тело вследствие его притяжения к Земле

Сила тяжести равна произведению массы тела на ускорение свободного падения и приложена к телу

$$g = G \frac{mM_{\oplus}}{(R_{\oplus} + h)^2}$$

Силы в природе

Гравитационная сила	между любыми телами	притяжение		$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$
Сила тяжести	тело и Земля	притяжение К центру		$F_T = mg$
Сила упругости	при деформации	против деформации		$F_{упр} = -kx$
Вес тела	между телом и опорой	действует на опору		$P = mg$ $P = -N$
Сила трения	движение по поверхности	против движения		$F_{тр} = \mu mg$
Выталкивающая сила	тело в газе, жидкости	вверх		$F_A = \rho_{жс} gV$

Сила упругости

Деформация тела происходит под действием внешних сил и сопровождается изменением размеров и формы твердого тела.

Деформации, которые полностью исчезают при снятии деформирующих факторов, называют *упругими*. Деформации, которые не исчезают при снятии деформирующих факторов, являются *пластическими*

Упругие деформации, возникающие в телах, весьма разнообразны. Различают четыре основных вида деформаций: растяжение (сжатие), сдвиг, кручение и изгиб.

Упругие деформации подчиняются закону Гука

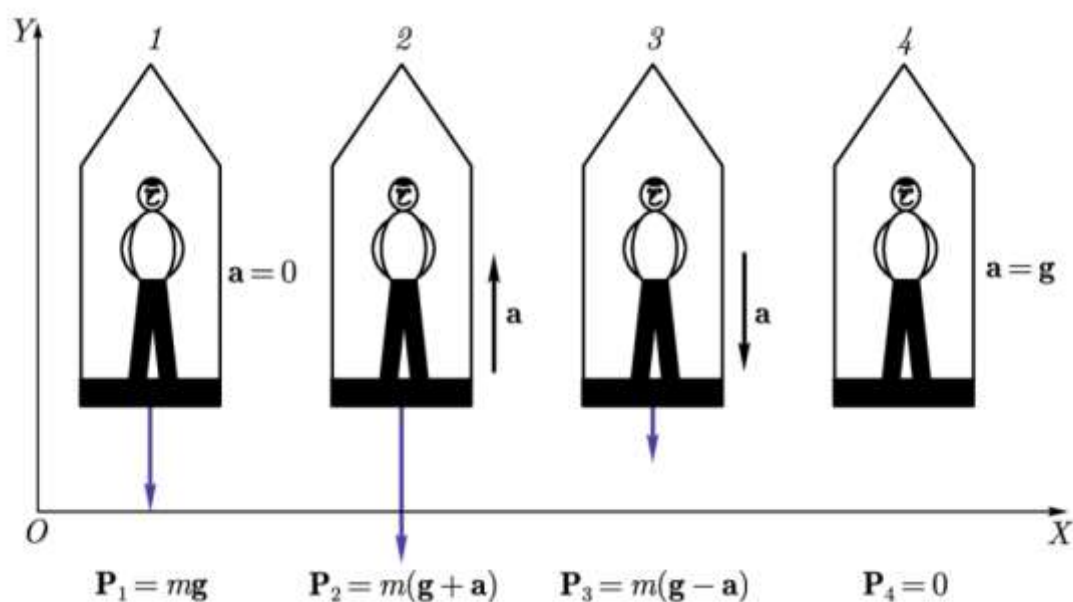
Закон Гука: модуль силы упругости, возникающей при упругой деформации растяжения или сжатия, пропорционален его удлинению:

$$F_{упр} = -k\Delta l.$$

Коэффициент пропорциональности k называют **коэффициентом упругости**, или **жесткостью**.

Вес тела P — сила, с которой тело вследствие притяжения к вращающейся Земле действует на опору или подвес, удерживающие его от свободного падения. Вес тела численно равен действующей на тело силе тяжести $P = mg$ только в том случае, когда опора или подвес находятся в покое относительно Земли или в состоянии равномерного прямолинейного движения, т.е. $a = 0$

Если же подвес или опора движутся с ускорением, то вес тела может быть как больше, так и меньше силы тяжести.



Невесомость — это состояние, при котором тело движется под действием только силы тяжести.

Сила трения — это сила, возникающая при соприкосновении поверхностей тел и препятствующая их относительному перемещению в плоскости касания.

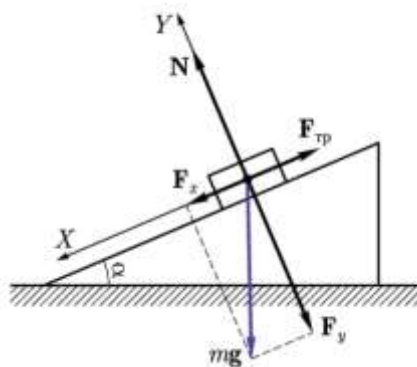
Различают силы трения покоя $F_{трп}$, силы трения скольжения $F_{трск}$, силы трения качения $F_{тркач}$. Для одних и тех же поверхностей $F_{Трп} > F_{трск} > F_{тркач}$.

сила трения скольжения $F_{трск}$ всегда направлена в сторону, противоположную относительной скорости движения соприкасающихся тел, и зависит от силы нормального давления N :

$$F_{\text{тр}} = \mu N$$

где μ — безразмерная величина коэффициентом трения скольжения

Направление силы трения скольжения противоположно направлению силы F_x , которая побуждает тело двигаться



$$F_{\text{тр}} = \mu mg \cos \alpha.$$

Центростремительная сила

Сила или равнодействующая нескольких сил, обеспечивающая движение материальной точки (тела) по окружности, называется **центростремительной силой**.

Обратите внимание! Центростремительных сил в природе не существует.

Центростремительная сила всегда направлена к центру кривизны траектории. Если на тело массой m действует центростремительная сила, то оно движется с центростремительным, или нормальным, ускорением.

$$F_{\text{цс}} = \frac{mv^2}{R}$$

Вопросы для самоконтроля и повторения

1. Что изучает динамика?
2. Какое тело называют свободным?
3. Сформулируйте первый закон Ньютона.

4. Какую систему отсчета называют инерциальной?
5. Дайте определение силы.
6. В чем заключается принцип независимости действия сил?
7. Что такое инертность? Какая физическая величина является мерой инертности тела?
8. Чему равен импульс тела?
9. Сформулируйте второй закон Ньютона.
10. Какую силу называют центростремительной?
11. Сформулируйте третий закон Ньютона.
12. Сформулируйте закон всемирного тяготения.
13. В чем заключается физический смысл гравитационной постоянной?
14. Дайте определение веса тела.
15. Какое состояние тела называют невесомостью?
16. Какие способы измерения массы тела вам известны?
17. Куда направлена сила трения скольжения и чему она равна?
18. Какие силы называют силами упругости?
20. Сформулируйте закон Гука.

Лекция 7

Закон сохранения импульса. Реактивное движение

Закон сохранения импульса

Изменение импульса системы тел. Рассмотрим систему, состоящую из двух тел, например двух звезд.

Силы взаимодействия между телами, входящими в систему (между звездами), называются *внутренними силами*. Внутренние силы будем обозначать символом F_{ik} . Здесь первый индекс i обозначает номер тела, на которое действует сила второй индекс k — номер тела, со стороны которого действует сила

По третьему закону Ньютона:

$$\mathbf{F}_{ik} = -\mathbf{F}_{ki}.$$

Силы воздействия на тела данной системы (две звезды) со стороны тел, не входящих в эту систему (например, соседние космические тела), называются *внешними силами*.

Равнодействующую всех внешних сил, действующих на i -е тело системы, будем обозначать F_i .

Для каждого тела, входящего в систему, запишем второй закон Ньютона

$$\frac{\Delta(m_1 \mathbf{v}_1)}{\Delta t} = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_1;$$

$$\frac{\Delta(m_2 \mathbf{v}_2)}{\Delta t} = \mathbf{F}_{21} + \mathbf{F}_2.$$

Сложив левые и правые части уравнений, получим

$$\frac{\Delta(m_1 \mathbf{v}_1)}{\Delta t} + \frac{\Delta(m_2 \mathbf{v}_2)}{\Delta t} = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_{21} + \mathbf{F}_2.$$

Учитывая, что $\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$, имеем

$$\frac{\Delta(m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2)}{\Delta t} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad \text{или} \quad \frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2,$$

где \mathbf{p} — суммарный импульс системы двух тел.

Из соотношения следует, что *изменение суммарного импульса системы тел определяется векторной суммой внешних сил, действующих на эту систему.*

Внутренние силы, изменяя импульсы отдельных тел системы, не изменяют суммарный импульс системы

Частные случаи определения изменения импульса тела

<p>1. Абсолютно неупругий удар о горизонтальную поверхность — конечная скорость равна нулю: $v = 0, p = 0$, $\Delta p = p_0$</p>	
<p>2. Абсолютно упругий удар о горизонтальную поверхность — модули конечной и начальной скоростей равны: $v = v_0, p = p_0$, $\Delta p = 2p_0 = 2mv_0$</p>	
<p>3. Пуля пробивает стенку $\Delta p = p_0 - p$</p>	
<p>4. Радиус-вектор тела повернул на 180° $\Delta p = 2p_0 = 2mv_0$</p>	
<p>5. Абсолютно упругое отражение от горизонтальной поверхности — модули конечной и начальной скоростей равны: $v = v_0, p = p_0$; угол падения равен углу отражения $\alpha = \alpha'$</p>	

Закон сохранения импульса.

Замкнутая система — это система тел, на каждое из которых не действуют внешние силы.

Система реальных тел может рассматриваться как *замкнутая*, если:

- действие на систему внешних тел пренебрежимо мало;
- действия на систему внешних тел скомпенсированы;
- рассматриваются изменения, происходящие в системе в течение такого малого промежутка времени, что действие внешних тел не успевает существенно изменить состояние системы.

Закон сохранения импульса: . в инерциальной системе отсчета суммарный импульс замкнутой системы тел с течением времени не изменяется

$$\frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t} = 0 \text{ или } \Delta \mathbf{p} = 0, \Delta t \neq 0.$$

$$m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2 = \text{const.}$$

Закон сохранения импульса.

Математическая запись закона сохранения импульса для двух тел.

$$\underbrace{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}_{\text{До взаимодействия}} = \underbrace{m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2}_{\text{После взаимодействия}} \quad \underbrace{\vec{p}_1 + \vec{p}_2}_{\text{До взаимодействия}} = \underbrace{\vec{p}'_1 + \vec{p}'_2}_{\text{После}}$$

Математическая запись закона сохранения импульса для N тел.

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + m_3 \vec{v}_3 + \dots + m_N \vec{v}_N = \text{const}$$

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

В замкнутой системе, векторная сумма импульсов всех тел, входящих в систему, остается постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой.

Импульс системы равен произведению массы m системы на скорость ее центра масс V_C $\mathbf{P} = m\mathbf{V}_C$.

Для замкнутой системы тел $\mathbf{p} = m\mathbf{V}_C = \text{const}$, так как $m = \text{const}$, следовательно, $\mathbf{V}_C = \text{const}$.

В инерциальной системе отсчета центр масс замкнутой системы тел движется прямолинейно и равномерно.

В некоторых случаях закон сохранения импульса можно применять и для незамкнутых систем тел, если внешние силы, действующие на любое тело системы, уравновешиваются, т. е. сумма всех внешних сил Равна нулю

Частные случаи закона сохранения импульса (в проекциях на горизонтальную ось)

Неупругое столкновение с неподвижным телом	$m_1v_1 = (m_1 + m_2)v$
Неупругое столкновение движущихся тел	$\pm m_1v_1 \pm m_2v_2 = \pm(m_1 + m_2)v$
В начальный момент система тел неподвижна	$0 = m_1v'_1 - m_2v'_2$
До взаимодействия тела двигались с одинаковой скоростью	$(m_1 + m_2)v = \pm m_1v'_1 \pm m_2v'_2$

Реактивное движение

Реактивное движение — движение, возникающее при отделении от тела некоторой его части с определенной скоростью относительно тела.

До начала работы двигателей ракеты импульс ракеты и топлива был равен нулю. Следовательно, при отсутствии внешних сил и после включения двигателей геометрическая сумма импульса ракеты и импульса истекающих газов равна нулю:

Оценим скорость ракеты

$$M\vec{V} + m\vec{v} = 0$$

$$MV = -mv$$

$$\vec{V} = -\frac{m}{M}\vec{v} \quad \text{- Формула Циолковского}$$

Скорость ракеты тем больше, чем больше скорость выбрасываемого газа.

В полете масса ракеты с течением времени убывает. Динамика тел переменной массы была создана в конце XIX в. русским профессором И. В. Мещерским (1859—1935) и К.Э.Циолковским (1857 — 1935). Приведем без доказательства формулу Циолковского для определения максимальной скорости v_{max} , которую получит ракета по израсходованию всего топлива:

$$v_{max} = v_1 \ln \frac{M_0}{M_1}$$

где v_1 — скорость истечения газов; M_0 — масса ракеты в момент старта, т.е. с полным запасом топлива; M_1 — масса ракеты без топлива.

Вопросы для самоконтроля и повторения

1. Какие силы называются внутренними, внешними?
2. Какая система тел называется замкнутой? Приведите примеры замкнутых систем тел.
3. Сформулируйте закон сохранения импульса.
4. Какое движение называют реактивным? Почему для запуска космических кораблей с поверхности Земли используются многоступенчатые ракеты?

Лекция 8

Закон сохранения механической энергии. Работа силы. Мощность. Энергия

Работа силы

Работа силы F на перемещении Δr равна произведению модулей этих векторов на косинус угла между ними.

Единица работы — джоуль (Дж), $1 \text{ Дж} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$.

1 Дж — работа, совершаемая силой 1 Н на перемещении 1 м если направления силы и перемещения совпадают.

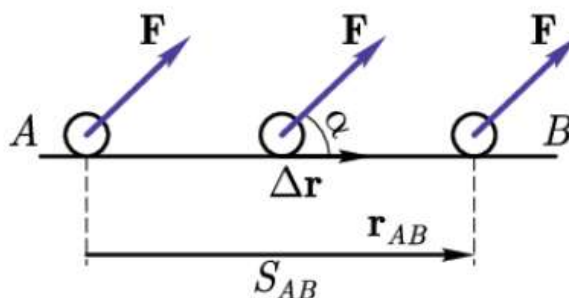


Если на материальную точку (тело) одновременно действует несколько сил, то элементарная работа всех этих сил при перемещении точки (тела) на Δr равна $\Delta A = F_{\text{рез}} \Delta r \cos \alpha,$

где $F_{\text{рез}}$ — модуль результирующей (равнодействующей) всех сил, действующих на материальную точку;

В общем случае вычисление работы силы на конечном перемещении очень сложно. Но если сила постоянна ($F = \text{const}$), а траектория тела прямолинейна ($\alpha = \text{const}$), то, работа силы F при перемещении тела из точки A в точку B равна:

$A = F r_{AB} \cos \alpha = F S_{AB} \cos \alpha,$



В зависимости от взаимной ориентации векторов F и Δr , т. е. угла между ними, работа может быть:

- положительной ($\Delta A > 0$), если $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$, так как косинусы острых углов положительны;
- отрицательной ($\Delta A < 0$), если $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$, поскольку косинусы тупых углов отрицательны;
- равной нулю ($\Delta A = 0$), если $\alpha = \frac{\pi}{2}$, так как $\cos \frac{\pi}{2} = 0$.

Сила, перпендикулярная перемещению, работу не совершает.

Работа потенциальных сил.

Потенциальные силы — это силы, работа которых зависит только от начального и конечного положений движущегося тела.

Следовательно, работа потенциальных сил не зависит от формы траектории движения.

Работа потенциальной силы при замкнутой траектории всегда равна нулю.

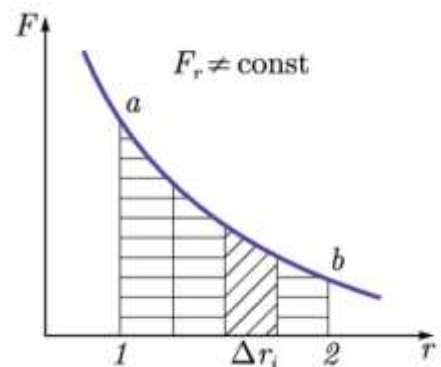
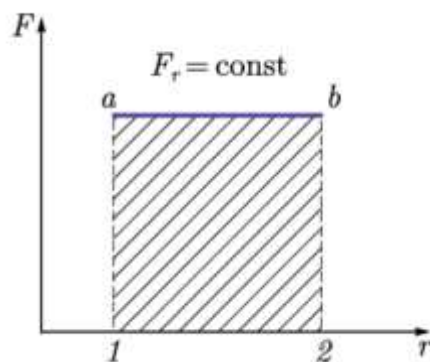
К потенциальным силам относятся силы упругости и силы тяготения

$$A_{\text{упр}} = F_{\text{ср}} \Delta l = \frac{k \Delta l^2}{2} \quad \text{работа силы упругости}$$

$$A = mgh \quad \text{работа при подъеме тела массой } m \text{ на высоту } h$$

Не потенциальные силы — это силы, работа которых зависит от формы траектории (например, силы трения).

Если известен график зависимости $F_r = F_r(\Delta r)$, то работа силы на перемещении $1-2$ равна площади фигуры $1aB2$



Мощность

Величина, характеризующая скорость выполнения работы, называется *мощностью*.

Если машина работает неравномерно, т.е. мощность изменяется с течением времени, то формула определяющая среднюю мощность:

$$N_{\text{cp}} = \frac{A}{\Delta t}.$$

Единица мощности – ватт (Вт); $1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$

Средняя мощность N_{cp} численно равна отношению работы A к промежутку времени Δt , за который она совершается:

1 Вт равен мощности, при которой работ в 1 Дж совершается за время 1 с.

Подставляя A , получаем

$$N_{\text{cp}} = \frac{F \Delta S \cos \alpha}{\Delta t} = F \frac{\Delta S}{\Delta t} \cos \alpha = F v_{\text{cp}} \cos \alpha$$

$$\text{где } v_{\text{cp}} = \frac{\Delta S}{\Delta t}.$$

Мгновенная мощность. Мгновенная мощность — мощность в данный момент — определяется по формуле:

$$N = Fv \cos \alpha,$$

где v — мгновенная скорость.

Мгновенная мощность равна произведению модуля вектора силы на модуль вектора мгновенной скорости и на косинус угла между направлениями этих векторов.

Мощность, как и работа, — величина скалярная.

Энергия

Термин «энергия» в современном смысле появился в начале XIX в. Английский физик Г. Юнг (1773-1829) первый определил энергию как работоспособность движущихся масс (1807)

Энергия — скалярная физическая величина, являющаяся единой мерой различных форм движения и взаимодействия материи (механической, внутренней, ядерной и др)

В процессе взаимодействия тел форма движения материи может изменяться, например при трении тела нагреваются, при этом изменяется и вид энергии, т.е. механическая энергия переходит во внутреннюю. Изменение вида энергии обусловлено действием на тело сил и связано с совершением работы.

Энергия — физическая величина, характеризующая способность тела или системы тел совершать работу.

Единица энергии, как и единица работы, — джоуль (Дж).

Работа A , совершенная телом или системой тел при этом, является мерой изменения их энергии ΔE :

$$A = \Delta E, \text{ или } A = E_2 - E_1.$$

Если система тел совершает работу над внешними телами, то энергия системы тел уменьшается.

Если внешние силы (внешние тела) совершают работу над системой тел, то энергия системы тел увеличивается.

Механическая энергия — физическая величина, которая является функцией скоростей и взаимного расположения тел.

Кинетическая энергия

Кинетическая (от греч. *kinetikos* —приводящий в движение) энергия E_k материальной точки (тела) является мерой механического движения и зависит от скорости движения точки (тела) в данной инерциальной системе отсчета.

Кинетическая энергия при поступательном движении тела равна половине произведения массы тела на квадрат его скорости:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} \quad \text{или} \quad E_k = \frac{p^2}{2m}$$

где $p = mv$. – импульс тела

Кинетическая энергия тела равна квадрату импульса тела, деленному на удвоенную массу тела.

Кинетическая энергия тела зависит от выбора системы отсчета, и не может быть отрицательна, т. е. $E_k > 0$.

- действие на тело сил, работа которых на данном перемещении положительна, приводит к увеличению кинетической энергии тела;
- действие на тело сил, работа которых на данном перемещении отрицательна, приводит к уменьшению кинетической энергии тела.

Изменение кинетической энергии тела ΔE_k при переходе из одного положения в другое равно работе всех сил, действующих на тело

$$\Delta A = E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_k \text{ - теорема о кинетической энергии}$$

Потенциальная энергия

Потенциальная энергия — это энергия взаимодействия.

Понятие потенциальной энергии относится к системе взаимодействующих объектов.

Мерой изменения потенциальной энергии при переходе системы из одного состояния в другое является работа потенциальных сил,

осуществляющих взаимодействие между телами системы или частями одного и того же тела.

Работа потенциальных сил A_n равна убыли потенциальной энергии системы ($E_{n1} - E_{n2}$).

$$A_n = E_{n1} - E_{n2} = -\Delta E_n$$

В зависимости от выбора нулевого уровня потенциальная энергия может быть положительной ($E_n > 0$), отрицательной ($E_n < 0$) или равной нулю ($E_n = 0$)

Принято потенциальную энергию взаимодействия относительно нулевого уровня отсчета считать положительной, если при взаимодействии тела отталкиваются, например, одноименно заряженные тела.

Если при взаимодействии тела притягиваются, например, разноименно заряженные тела, или при гравитационном взаимодействии, то их потенциальная энергия отрицательна относительно нулевого уровня отсчета.

Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия системы двух материальных точек массами m и M , находящихся на расстоянии r друг от друга, равна:

$$E_n = -\frac{GmM}{r}$$

Тело, поднятое на высоту h относительно поверхности Земли, обладает потенциальной энергией:

$$E_n = mgh$$

Минимальная потенциальная энергия у тела, находящегося на поверхности Земли.

Потенциальная энергия упругодеформированного тела.

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

Потенциальная энергия упругодеформированного тела равна работе силы упругости при переходе из деформированного состояния в недеформированное состояние.

Начало отсчета потенциальной энергии ($E_{\text{п}} = 0$) соответствует такому состоянию системы, при котором сила упругого взаимодействия равна нулю ($F_{\text{упр}} = 0, l = l_0, \Delta l = 0$).

Полная энергия тела.

Полная механическая энергия тела (системы тел) равна сумме кинетической и потенциальной энергий всех тел, входящих в систему,

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}}$$

В зависимости от сил, действующих на тела, входящие в систему, различают консервативные и неконсервативные системы тел:

- если внутренние и внешние силы, действующие на тела системы, являются потенциальными (например, гравитационными или упругими силами), то систему тел называют консервативной;
- если наряду с потенциальными действуют и непотенциальные силы (например, силы трения), то систему тел называют неконсервативной.

Полная механическая энергия замкнутой консервативной системы не изменяется, т.е. сохраняется.

E-const

Предположим, что система тел является неконсервативной (например, замкнутая система, в которой наряду с потенциальными силами действуют и силы трения).

Изменение полной механической энергии системы равно работе внутренних непотенциальных сил

Законы сохранения — фундаментальные законы природы

- позволяют решать ряд сложных задач без рассмотрения действующих на тела сил и не прослеживая движения системы тел.
- выходят далеко за рамки механики (законы сохранения, открытые в механике).
- «работают» в микро-, макро- и мегамире, т.е. применимы к системам всех материальных объектов, независимо от их размеров
- помогают совершать новые открытия (например, предсказано существование элементарной частицы — *нейтрино*,

Применение законов сохранения

Столкновение тел.

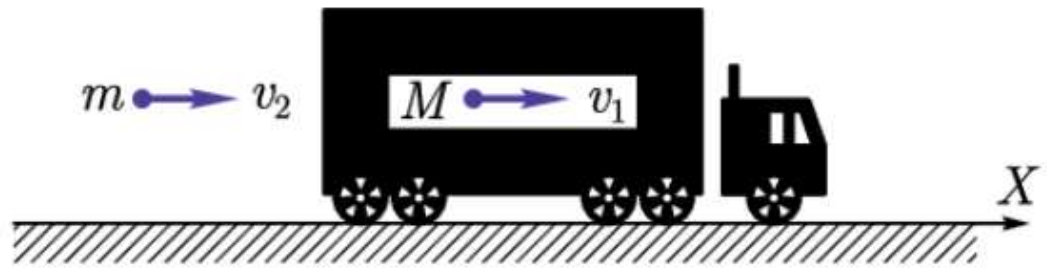
Столкновения, или удары, тел подразделяют на абсолютно неупругие и абсолютно упругие.

Абсолютно неупругий удар — столкновение тел, при котором между телами действуют непотенциальные силы и после взаимодействия тела движутся как единое целое.

Абсолютно упругий удар — столкновение тел, при котором силы взаимодействия соударяющихся тел являются потенциальными и в результате взаимодействия механическая энергия системы не изменяется.

Абсолютно неупругий и абсолютно упругий удары являются физическими моделями для описания реальных столкновений.

Абсолютно неупругий удар.



Эта система тел неконсервативна и незамкнута, но для нее выполняется закон сохранения проекции импульса на ось X , так как в этом направлении на тело не действуют силы:

$$Mv_{1x} + mv_{2x} = (M + m)U_x.$$

Или с учетом направления векторов \mathbf{v}_1 , \mathbf{v}_2 и оси X

$$Mv_1 + mv_2 = (M + m)U,$$

откуда

$$U = \frac{Mv_1 + mv_2}{M + m}.$$

Скорость U системы $(M+m)$ после неупругого столкновения сонаправлена со скоростями v_1 и v_2 .

При неупругих ударах происходит изменение механической, в данном случае кинетической, энергии системы, поскольку при ударе между телами действуют непотенциальные силы:

$$\Delta E_k = E_{k2} - E_{k1};$$

$$E_{k2} = \frac{(M + m)U^2}{2}; \quad E_{k1} = \frac{Mv_1^2}{2} + \frac{mv_2^2}{2}.$$

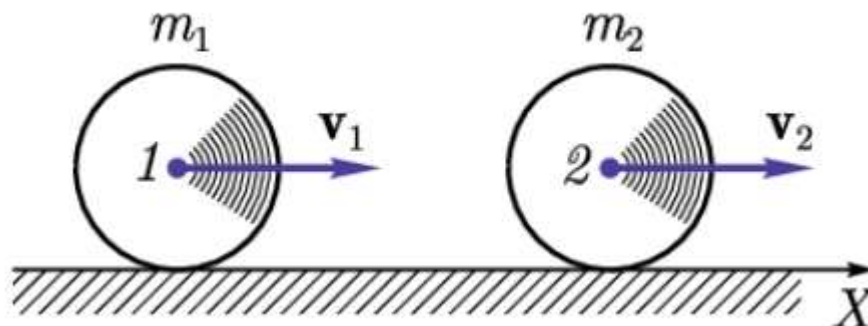
Учитывая U

$$\Delta E_k = -\frac{Mm}{2(M + m)}(v_1 - v_2)^2.$$

Знак «минус» свидетельствует об уменьшении кинетической энергии

Абсолютно упругий удар

Рассмотрим центральное соударение двух шаров массами m_1 и m_2 , движущихся поступательно вдоль оси X со скоростями v_1 и v_2



$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 U_1 + m_2 U_2 \quad - \text{ЗСИ}$$

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 U_1^2}{2} + \frac{m_2 U_2^2}{2} \quad - \text{ЗСЭ}$$

Решив совместно уравнения, выражающие законы сохранения импульса и энергии, получим

$$U_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2 v_2}{m_1 + m_2}; \quad U_2 = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1 v_1}{m_1 + m_2}.$$

Вопросы для самоконтроля и повторения:

1. Сформулируйте определение работы силы. В каких единицах измеряется работа?
2. При каких условиях работа силы положительная? отрицательная? равна нулю?
3. Какие силы называются потенциальными? Приведите примеры.
4. Чему равна работа, совершаемая упругой силой? Силой тяжести при подъеме тела на высоту h ?
5. Дайте определение мощности. В каких единицах измеряется мощность?

6. Сформулируйте определение энергии. В каких единицах измеряется энергия?

7. Что является мерой изменения энергии систем тел?

8. Дайте определение кинетической энергии тела.

9. Сформулируйте теорему о кинетической энергии.

10. Приведите определение потенциальной энергии систем тел.

Почему потенциальная энергия не зависит от выбора системы отсчета?

11. Чему равна потенциальная энергия упругодеформированного тела?

12. Чему равна полная механическая энергия системы тел?

13. Дайте определения консервативных и неконсервативных систем тел.

14. При каких условиях полная механическая энергия системы сохраняется?

15. Чему равно изменение полной механической энергии системы?

16. Какой удар называют абсолютно неупругим? абсолютно упругим?

Лекция 9

Равновесие материальной точки и твердого тела. Движение жидкостей и газов.

Равновесие материальной точки и твердого тела

Статика — раздел механики, изучающий условия равновесия тел. **Равновесием** механической системы, находящейся под действием сил, называется такое состояние этой системы, при котором все ее точки покоятся относительно выбранной системы отсчета.

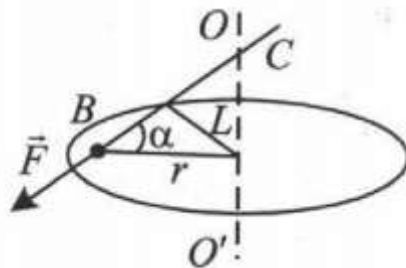
Любое движение можно представить как суперпозицию двух типов движения: поступательного и вращательного, поэтому рассмотрим условия равновесия для каждого типа движения в отдельности.

■ Поступательно движущееся тело находится в состоянии равновесия (покоится или движется прямолинейно и равномерно), если

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N = 0, \quad (\vec{a} = 0).$$

■ Вращающееся тело, имеющее неподвижную ось вращения, находится в покое или равномерно вращается, если $M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_N = 0$, где M — момент силы относительно оси вращения тела, величина которого численно равна $M = F \cdot L = F \cdot r \cdot \sin\alpha$.

Здесь L (рис. 14.1) — кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы (плечо силы);



- OO' — ось вращения;
 r — расстояние от оси вращения до точки приложения силы;
 BC — линия действия силы;
 α — угол между r и BC ;
 B — точка приложения силы.

Момент силы считают положительным, если сила вращает тело против часовой стрелки, отрицательным — если сила вращает тело по часовой стрелке. (Как правило, обратный выбор знаков на решении задачи не отражается.)

Алгоритм определения момента силы:

- 1) определить положение оси вращения тела;
- 2) продлить в обе стороны линию действия силы;
- 3) восстановить перпендикуляр от оси вращения до линии действия силы и определить его длину (плечо);
- 4) определить величину момента по формуле $M = F \cdot L$ с учетом знака.

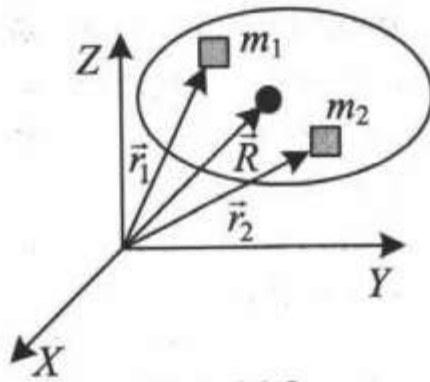
В общем случае, когда твердое тело совершает поступательное и вращательное движения, условия равновесия тела записываются так:

$$\sum \vec{F}_N = 0; \quad \sum M_N = 0.$$

Центр тяжести — точка, через которую проходит равнодействующая всех сил тяжести, действующих на отдельные элементы тела при любом положении тела в пространстве. В большинстве случаев центр тяжести совпадает с центром масс (когда размеры тела много меньше радиуса Земли).

$$\vec{R} = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 + \dots + m_N \vec{r}_N}{m} \quad \text{— радиус-вектор, характеризующий}$$

положение центра масс (рис. 14.2), здесь m_1, m_2, \dots, m_N — массы элементов системы, положения которых задаются посредством соответствующих радиусов-векторов: $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N$.



Если элементы или их центры масс расположены вдоль прямой (например, грузы на спице), то координата центра масс системы

$$x_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_N x_N}{m_1 + \dots + m_N}.$$

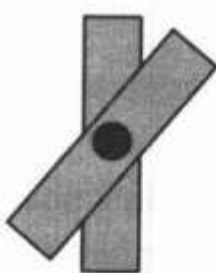
Виды равновесия:

■ Равновесие тел с закрепленной осью вращения:

а) если ось проходит через центр масс (рис. 14.3, а), то тело находится в **безразличном равновесии** при любом положении тела;

б) ось выше точки центра тяжести (рис. 14.3, б) — это **устойчивое равновесие**;

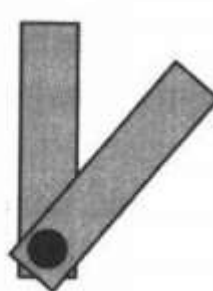
в) ось ниже точки центра тяжести (рис. 14.3, в) — это **неустойчивое равновесие**.



а)



б)



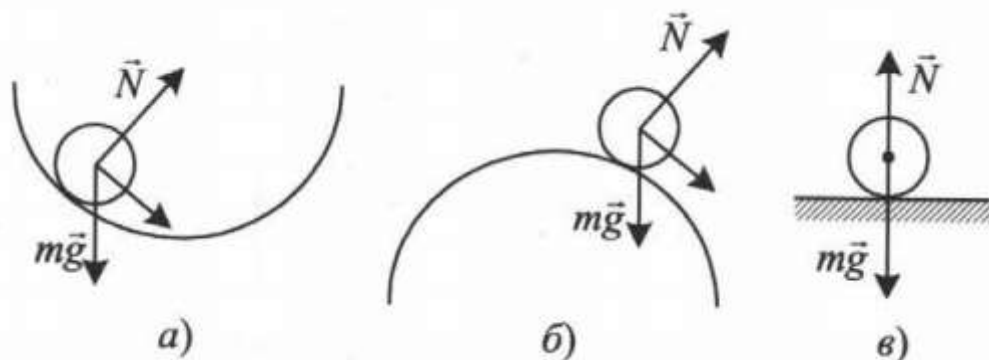
в)

■ **Равновесие тела, имеющего точку опоры:**

а) если равнодействующая всех сил направлена к положению равновесия (рис. 14.4, а) — это тело находится в **устойчивом** положении;

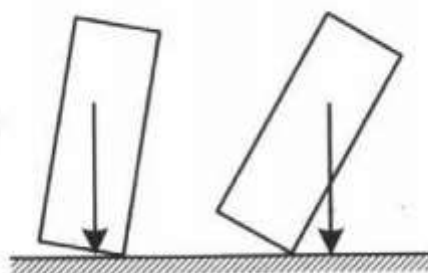
б) если равнодействующая всех сил направлена от положения равновесия (рис. 14.4, б) — это тело находится в **неустойчивом** равновесии;

в) если $F = 0$ (рис. 14.4, в) — это равновесие является **безразличным**.

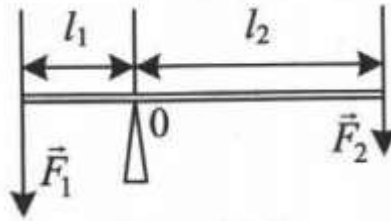


■ **Равновесие тел, имеющих площадь опоры.**

Если вертикаль, проведенная через центр тяжести тела, пересекает площадь его опоры, то равновесие тела **устойчивое**, если не пересекает (рис. 14.5) — тело падает, равновесие **неустойчивое**.



Одним из простых механизмов является **рычаг** — жесткий стержень с закрепленной осью вращения. Пусть точки приложения сил F_1 и F_2 находятся на расстояниях l_1 и l_2 от оси вращения (рис. 14.6).



Условие равновесия рычага: рычаг будет находиться в состоянии равновесия, если алгебраическая сумма моментов сил (относительно оси вращения) равна нулю или $F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2$ (момент сил, вращающих рычаг против часовой стрелки равен моменту сил, вращающих его в противоположном направлении).

Давление в жидкости и газе. Гидравлический пресс

Жидкости и газы в отличие от твердого тела не имеют собственной формы, а принимают форму сосуда, в котором находятся. Газы при этом заполняют весь объем сосуда, а жидкости сохраняют объем, являясь практически несжимаемыми.

Физическая величина, определяемая нормальной составляющей силы F , действующей со стороны жидкости на единицу площади S , называется давлением p жидкости

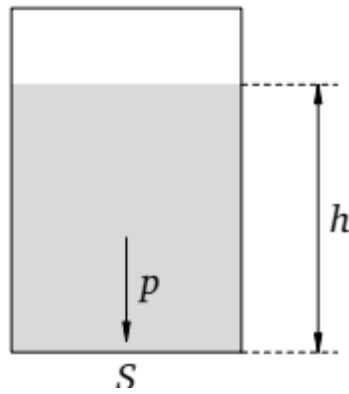
$$p = \frac{|\vec{F}|}{S}$$

Единицей измерения давления служит *паскаль* (Па). 1 Па — это давление, производимое силой 1 Н на поверхность площадью 1 м².

Например, тело, находящееся на наклонной плоскости с углом наклона α , оказывает давление на ее поверхность, равное

$$p = \frac{N}{S} = \frac{mg \cos \alpha}{S}$$

Гидростатическим называется давление неподвижной жидкости, вызванное силой тяжести.



$$F = mg = \rho Shg$$

$$p = \rho gh$$

Давление при равновесии жидкостей (газов) подчиняется закону Паскаля

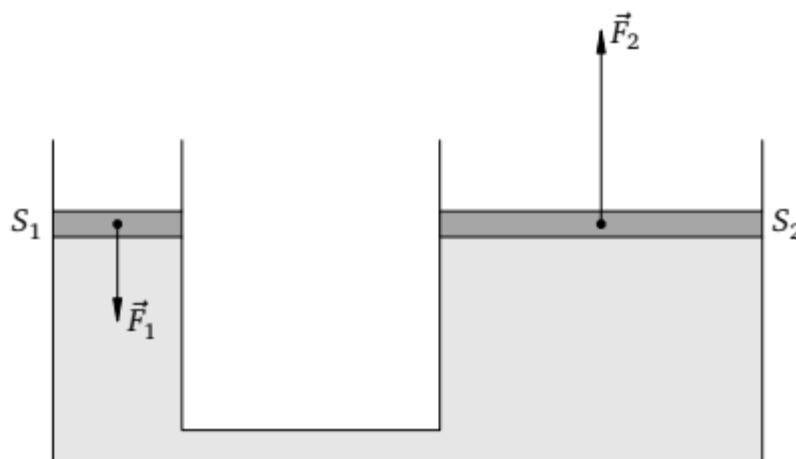
Закон Паскаля. Давление, оказываемое на жидкость или газ, передаётся в любую точку этой среды без изменения по всем направлениям.

Вы ежедневно пользуетесь законом Паскаля, когда выдавливаете зубную пасту из тюбика. А именно, вы сжимаете тюбик в поперечном направлении, а паста двигается перпендикулярно вашему усилию — в продольном направлении. Почему? Ваше давление передаётся внутри тюбика по всем направлениям, в частности — в сторону отверстия тюбика. Туда-то паста и выходит.

Закон Паскаля объясняет действие важного технического устройства — гидравлического пресса.

Гидравлический пресс — это устройство, дающее выигрыш в силе.

Что значит «выигрыш в силе»? Имеется в виду, что, прикладывая сравнительно небольшую силу в одном месте данного устройства, мы можем получить значительно большее усилие в другом его месте.



Принцип действия гидравлического пресса очень прост и основан на законе Паскаля.

Пусть S_1 — площадь малого поршня, S_2 — площадь большого поршня. Надавим на малый поршень с силой F_1 . Тогда под малым поршнем в жидкости возникнет давление

$$p = F_1/S_1 .$$

Согласно закону Паскаля это давление будет передано без изменения по всем направлениям в любую точку жидкости, в частности— непосредственно под большой поршень. Следовательно, на большой поршень со стороны жидкости будет действовать сила

$$F_2 = pS_2 = F_1 S_2/S_1 .$$

Полученное соотношение можно переписать и так: $F_2/F_1 = S_2/S_1$.

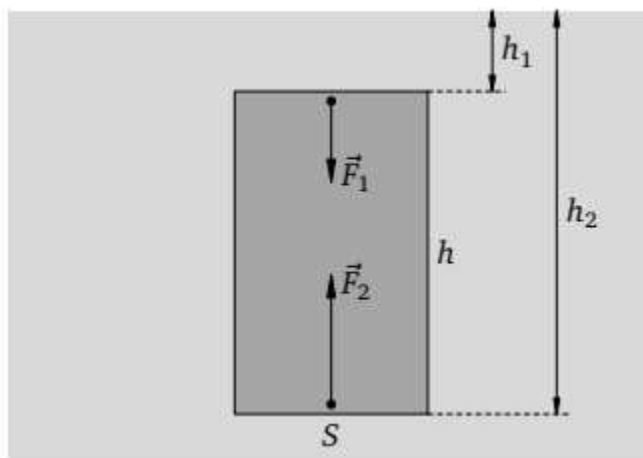
Мы видим, что F_2 больше F_1 во столько раз, во сколько S_2 больше S_1 .

Вот таким образом гидравлический пресс даёт выигрыш в силе.

Закон Архимеда

Мы знаем, что дерево в воде не тонет. Следовательно, сила тяжести уравновешивается какой-то другой силой, действующей на кусок дерева со стороны воды вертикально вверх. Эта сила называется ***выталкивающей*** или ***архимедовой*** силой. Она действует на всякое тело, погружённое в жидкость или газ.

Выясним причину возникновения архимедовой силы. Рассмотрим цилиндр площадью поперечного сечения S и высотой h , погружённый в жидкость плотности ρ . Основания цилиндра горизонтальны. Верхнее основание находится на глубине h_1 , нижнее — на глубине $h_2 = h_1 + h$



На боковую поверхность цилиндра действуют силы давления, которые приводят лишь к сжатию цилиндра. Эти силы можно не принимать во внимание.

На уровне верхнего основания цилиндра давление жидкости равно $p_1 = \rho g h_1$. На верхнее основание действует сила давления $F_1 = p_1 S = \rho g h_1 S$, направленная вертикально вниз.

На уровне нижнего основания цилиндра давление жидкости равно $p_2 = \rho g h_2$. На нижнее основание действует сила давления $F_2 = p_2 S = \rho g h_2 S$, направленная вертикально вверх (закон Паскаля!).

Так как $h_2 > h_1$, получаем, что $F_2 > F_1$, и поэтому возникает равнодействующая сил давления, направленная вверх. Это и есть архимедова сила F_A . Имеем

$$F_A = F_2 - F_1 = \rho g h_2 S - \rho g h_1 S = \rho g S (h_2 - h_1) = \rho g S h.$$

Но произведение Sh равно объёму цилиндра V . Окончательно получаем

$$F_A = \rho g V$$

Это и есть формула для архимедовой силы.

Возникает архимедова сила вследствие того, что давление жидкости на нижнее основание цилиндра больше, чем на вернее.

Формулу можно интерпретировать следующим образом. Произведение ρV — это масса жидкости m , объём которой равен V : $\rho V = m$. Но тогда $\rho g V = mg = P$, где P — вес жидкости, взятой в объёме V . Поэтому наряду с формулой имеем

$$F_A = P.$$

Иными словами, архимедова сила, действующая на цилиндр, равна весу жидкости, объём которой совпадает с объёмом цилиндра.

До сих пор мы рассматривали случай полного погружения тела. Чему равна архимедова сила при частичном погружении? На ту часть тела, которая находится над поверхностью жидкости, никакая выталкивающая сила не действует. Если эту часть мысленно срезать, то величина архимедовой силы не изменится. Но тогда мы получим целиком погружённое тело, объём которого равен объёму погружённой части исходного тела.

Значит, на частично погружённое в жидкость тело действует выталкивающая сила, равная весу жидкости, объём которой равен объёму погружённой части тела. Формула справедлива и в этом случае, только объём всего тела V нужно заменить на объём погружённой части $V_{\text{погр}}$:

$$F_A = \rho g V_{\text{погр}}.$$

на всякое тело, погружённое в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом среды.

Плавание тел

Рассмотрим тело плотности ρ и жидкость плотности ρ_0 . Допустим, что тело полностью погрузили в жидкость и отпустили.

Сразу после отпускания на тело действуют лишь сила тяжести mg и архимедова сила F_A . Если объём тела равен V , то

$$mg = \rho g V, F_A = \rho_0 g V.$$

Имеются три возможности дальнейшего движения тела.

1. Сила тяжести больше архимедовой силы: $mg > F_A$, или $\rho > \rho_0$. В этом случае тело тонет.

2. Сила тяжести равна архимедовой силе: $mg = F_A$, или $\rho = \rho_0$. В этом случае тело остаётся неподвижным в состоянии *безразличного равновесия*.

3. Сила тяжести меньше архимедовой силы: $mg < F_A$, или $\rho < \rho_0$. В этом случае тело всплывает, достигая поверхности жидкости. При дальнейшем всплытии начнёт уменьшаться объём погружённой части тела, а вместе с ним и архимедова сила. В какой-то момент архимедова сила сравняется с силой тяжести (положение равновесия). Тело по инерции всплывёт дальше, остановится, снова начнёт погружаться... Возникнут затухающие колебания, после которых тело останется плавать в положении равновесия ($mg = F_A$), частично погрузившись в жидкость.

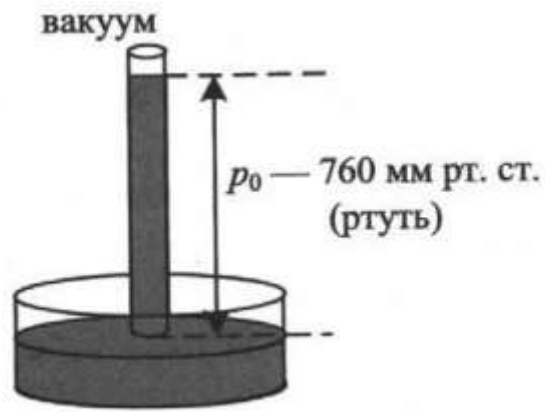
Таким образом, *условие плавания* тела можно записать в виде неравенства $\rho \leq \rho_0$. Например, лёд ($\rho = 900 \text{ кг/м}^3$) будет плавать в воде ($\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$), но утонет в спирте ($\rho_0 = 800 \text{ кг/м}^3$).

Земля окружена воздушной оболочкой — **атмосферой**. Слои воздуха, расположенные выше, давят на лежащие ниже слои, результатом является **атмосферное давление**:

$$p_0 = 1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101\,325 \text{ Па.}$$
$$p_0 S = mg = \rho_{\text{рт.}} Vg = \rho_{\text{рт.}} ghS, p_0 = \rho_{\text{рт.}} gh.$$

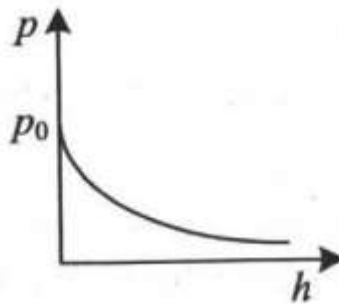
рис. 16.1

Для измерения атмосферного давления служат **барометры** («бар» означает давление): ртутный барометр Торричелли (рис. 16.2) и металлический барометр-анероид.



Для измерения давлений в жидкостях и газах, больших или меньших атмосферного, используются **манометры**.

Зависимость давления от высоты h над поверхностью Земли (рис. 16.1) можно найти по формуле: $p = p_0 \cdot e^{-\frac{Mgh}{RT}}$, где p_0 — давление на поверхности Земли, M — молярная масса воздуха, T — его абсолютная температура.



Движение жидкости по трубам. Уравнение Бернулли

Движение жидкости называется течением, а совокупность частиц движущейся жидкости — потоком.

Если форма потока, а также скорость в каждой точке жидкости не меняется со временем, то такое течение называется установившимся (стационарным).

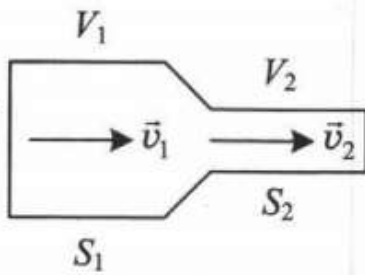


Рис. 18.1

Рассмотрим стационарный (скорость в данной точке не изменяется со временем) поток идеальной (нет внутреннего трения) несжимаемой жидкости. В этом случае выполняется закон сохранения массы. Пусть за время t через сечение трубы S_1 проходит жидкость массой m_1 (рис. 18.1):

$m_1 = \rho V_1 = \rho S_1 v_1 t$. Тогда через сечение S_2 за то же время проходит жидкость массой m_2 : $m_2 = \rho V_2 = \rho S_2 v_2 t$. Так как жидкость несжимаема, $m_1 = m_2$, то $S_1 v_1 = S_2 v_2$ или $\frac{v_2}{v_1} = \frac{S_1}{S_2}$ (уравнение неразрывности струи). Т.е. в меньшем сечении трубы скорость жидкости больше и наоборот (если $S_1 > S_2$, то $v_1 < v_2$).

Заметим, что обсуждаемые в этом разделе законы применимы и для несжимаемых газов (газ считается несжимаемым, если его скорость много меньше скорости звука).

Зависимость давления жидкости от скорости ее течения:

Зависимость давления жидкости от скорости ее течения:

Зависимость давления жидкости от скорости ее течения:

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho g h_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} = \text{const} \quad \text{—}$$

уравнение Бернулли. Здесь p — статическое, $\rho g h$ — гидростатическое, $\frac{\rho v^2}{2}$ — динамическое давление, индексы 1 и 2 относятся к точкам, находящимся на разных уровнях сосуда с изменяющейся площадью сечения (рис. 18.2).

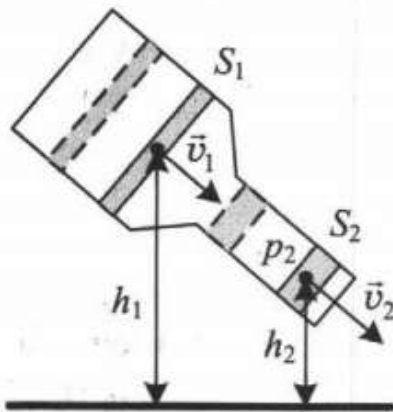


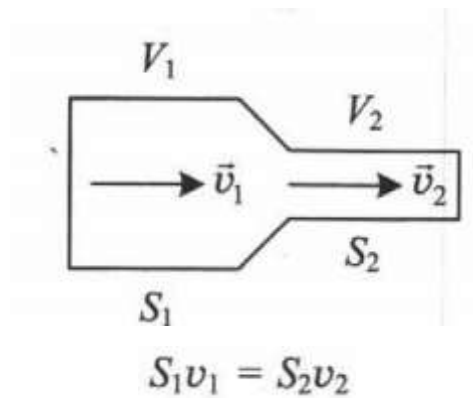
Рис. 18.2

Для горизонтальной трубы $h_1 = h_2$, тогда

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

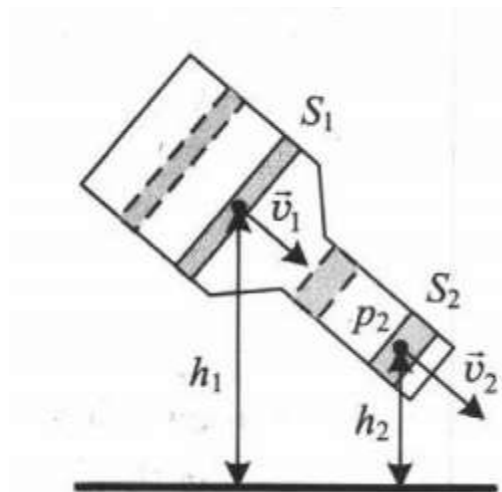
Таким образом, если $S_2 < S_1$, то, согласно закону постоянства потока жидкости, $v_2 > v_1 \Rightarrow p_2 < p_1$.

В случае несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$) через любое сечение в потоке за одну секунду проходит одинаковый объем жидкости, поэтому



Выражение называется уравнением неразрывности для несжимаемой жидкости. Согласно этому уравнению через сечение меньшей площади жидкость течет быстрее и наоборот.

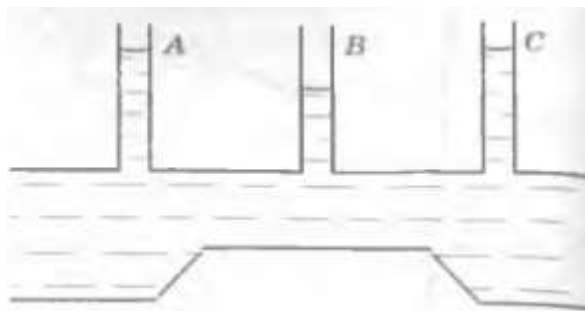
Для произвольных сечений S_1 и S_2 применительно к установившемуся потоку жидкости плотностью ρ справедливо уравнение Бернулли



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

Уравнение Бернулли получено на основании закона сохранения энергии для стационарного течения жидкости, в которой отсутствуют силы внутреннего трения.

Из уравнения Бернулли и уравнения неразрывности следует, что скорость жидкости v больше в местах сужения потока, а статическое давление p больше в более широких местах, где скорость меньше. В этом можно убедиться, установив вдоль потока ряд манометров



В соответствии с теоретическими выводами давление в манометрической трубке В (узкая часть потока) ниже, чем в трубках А и С (широкая часть потока).

Вопросы для самоконтроля и повторения:

1. Какие виды равновесия вам известны?
2. Дайте определение устойчивого равновесия; неустойчивого равновесия;
3. безразличного равновесия.
4. Сформулируйте закон Паскаля. Приведите примеры проявления закона Паскаля.
5. Гидравлический пресс дает выигрыш в силе. Дает ли он выигрыш в работе?
6. Сформулируйте закон Архимеда.
7. В каком случае тело тонет? всплывает?
8. Где лучше учиться плавать — в море или пресном озере?
9. Что такое установившееся (стационарное) течение?
10. Где статическое давление меньше — в широких или узких участках трубы

Вывод Уравнения Бернулли

При течении жидкости ее отдельные слои в общем случае текут с разными скоростями, скользят друг относительно друга, вследствие чего между ними возникают силы трения. Эти силы называют силами внутреннего трения. Они возникают не только в жидкостях, но и в газах.

Жидкость, в которой внутреннее трение (вязкость) полностью отсутствует, называется **идеальной**.

Выделим в стационарно текущей идеальной жидкости трубку тока, ограниченную сечениями S_1 и S_2 , по которой слева направо течет жидкость (рис.). Пусть в месте сечения S_1 заданы: скорость течения v_1 , давление p_1 и высота h_1 , на которой расположено это сечение. Аналогично, в месте сечения S_2 заданы скорость течения v_2 , давление p_2 и высота h_2 .

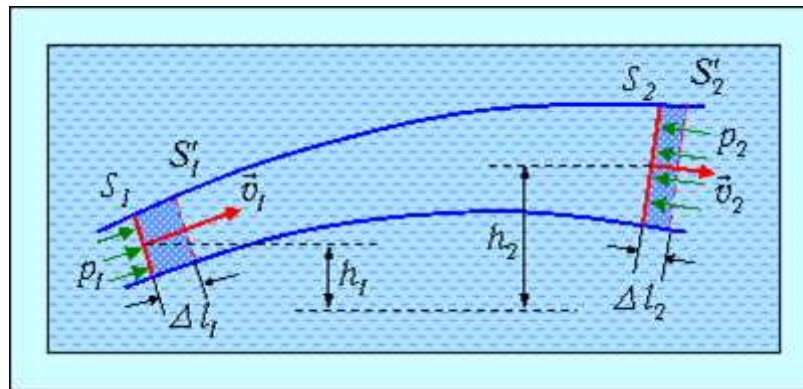


Рис. . К выводу уравнения Бернулли

За время Δt объём жидкости переместится вдоль трубки тока, причем сечение S_1 переместится в положение S_1' , пройдя путь Δl_1 , сечение S_2 переместится в положение S_2' , пройдя путь Δl_2 . В силу уравнения непрерывности струи заштрихованные объёмы будут иметь одинаковую величину: $\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V$.

Энергия каждой частицы жидкости складывается из её кинетической энергии и потенциальной энергии в поле сил тяжести. Полная энергия потока, протекающего за время Δt через сечение S_1 , равна

$$E_1 = \left(\frac{\rho \Delta V_1 v_1^2}{2} + \rho \Delta V_1 g h_1 \right) = \Delta V \left(\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 \right).$$

Аналогичное выражение для энергии потока имеем для сечения S_2 :

$$E_2 = \left(\frac{\rho \Delta V_2 v_2^2}{2} + \rho \Delta V_2 g h_2 \right) = \Delta V \left(\frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 \right)$$

При стационарном течении между сечениями S_1 и S_2 энергия не накапливается. В идеальной жидкости силы трения отсутствуют, так что механическая энергия никуда не исчезает. Следовательно, изменение полной энергии жидкости равно работе, совершенной внешними силами

$$\Delta E = E_2 - E_1 = A.$$

Силы давления на боковую поверхность трубки тока перпендикулярны в каждой точке к направлению перемещения частиц, вследствие чего работы не совершают. Отлична от нуля лишь работа сил давления, приложенных к сечениям S_1 и S_2 . Эта работа равна

$$A = p_1 S_1 \cdot \Delta l_1 - p_2 S_2 \cdot \Delta l_2 = (p_1 - p_2) \Delta V.$$

Приравнивая изменение энергии потока ΔE работе сил давления A , находим:

$$\Delta V \left(\frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 \right) - \Delta V \left(\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 \right) = (p_1 - p_2) \Delta V.$$

Сократив на ΔV и перенеся члены с одинаковыми индексами в одну часть равенства, получаем:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2.$$

Сечения S_1 и S_2 были взяты совершенно произвольно. Поэтому можно утверждать, что

В стационарно текущей идеальной несжимаемой жидкости в любом сечении трубки тока величина

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho g h + p = \text{const.}$$

имеет одно и то же значение, другими словами, вдоль трубки тоже эта величина постоянна

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho g h + p = \text{const.}$$

Полученное нами соотношение называется **уравнением Бернулли**. Это уравнение выражает собой закон сохранения механической энергии при стационарном течении несжимаемой идеальной жидкости.

В частном случае **горизонтального течения** жидкости $h = const$ уравнение Бернулли принимает вид

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = const.$$

Из уравнения непрерывности

$$Sv = const$$

следует, что в месте сужения потока его скорость возрастает, а из уравнения Бернулли — что в этом месте падает давление.

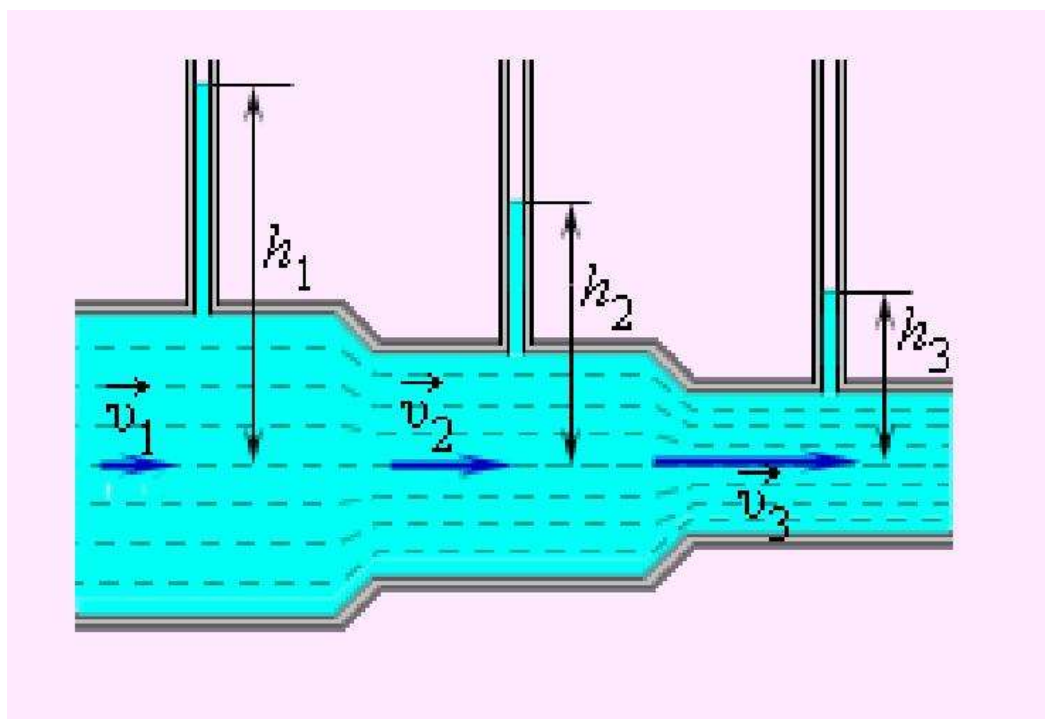


Рис. Скорости жидкости и давление в зависимости от сечения трубки

Когда идущие параллельными курсами корабли находятся слишком близко друг к другу, давление между ними падает и давление внешнего потока их сближает, и может привести к столкновению судов.

Лекция 10

Основы молекулярно-кинетической теории. Идеальный газ.



МКТ	термодинамика
изучает свойства макроскопических тел и процессы, происходящие в них, на основе представлений о том, что все тела состоят из большого числа частиц	изучает тепловые процессы, происходящие с макроскопическими телами (термодинамическими системами), не заглядывая вовнутрь вещества, а опираясь на общие законы.

История атомистических учений началась 2500 лет назад, когда древнегреческие философы Левкипп и Демокрит предположили, что все тела состоят из мельчайших частиц – атомов. Но их высказывания не были научной теорией. Позже учёные Галилей, Декарт, Ньютон, Ломоносов тоже считали, что материя состоит из мельчайших неделимых частиц – корпускул (или атомов), но количественного описания этой теории дано не было. Научную теорию атомистического учения дали Дальтон, Гей-Люссак, Авогадро в начале 19 столетия.

Основные положения МКТ

В основе МКТ лежат 3 основных положения (утверждения):

№	утверждение	комментарии	доказательства
1	Все тела состоят из отдельных частиц (атомы, молекулы, ионы), между которыми есть промежутки –	Простые вещества состоят из одинаковых атомов(молекул)-C, Al, O ₂ Сложные-молекулы состоят из атомов	- Получены фотографии молекул с помощью ионного микроскопа - растворимость веществ - механическое дробление

	дискретное строение вещества	различных химических элементов– H_2O , $CH_4, NaCl$	- постепенное испарение жидкостей
2	Частицы непрерывно хаотично движутся	Молекулы (атомы) участвуют в тепловом движении, которое никогда не прекращается. Характер движения в различных состояниях вещества разный. Скорость движения определяет температуру тела	- диффузия (перемешивание молекул различных веществ) в газах, жидкостях и твёрдых телах - броуновское движение (движение растворённых в жидкости или газе макроскопических частиц: споры плауна, частицы пыли, дыма в воздухе, жира в молоке и т.д.) - испарение жидкостей
3	Частицы взаимодействуют между собой	Природа взаимодействия – электромагнитная, обусловлена взаимным притяжением и отталкиванием заряженных частиц в атоме	- свойство газов легко менять объём - несжимаемость жидкостей - возникновение упругих деформаций - форма и объём твёрдых тел - склеивание

Масса и размеры молекул

Атомом называют наименьшую частицу данного химического элемента.

Каждому химическому элементу соответствуют вполне определенные атомы, сохраняющие химические свойства данного элемента.

Молекулой называют наименьшую устойчивую частицу данного вещества, обладающую его основными химическими свойствами.

Масса молекул. Массы отдельных молекул и атомов очень малы, например абсолютное значение массы молекулы воды порядка $3 \cdot 10^{-26}$ кг. Массы отдельных молекул экспериментально определяют с помощью специального прибора — масс-спектрометра.

Масса и размеры молекул

$V = 1 \text{ мм}^3$

$S = 0,6 \text{ м}^2$

$d = \frac{V}{S}$

$d = 1,7 \cdot 10^{-10} \text{ м}$

Масса и размеры молекул

В 1 г воды содержится $3,7 \cdot 10^{22}$ молекул.

$$m_{0(\text{воды})} = \frac{1 \text{ г}}{3,7 \cdot 10^{22}} = 2,7 \cdot 10^{-23} \text{ г}$$

Массы молекул в макроскопических масштабах чрезвычайно малы.

В молекулярной физике принято характеризовать массы атомов и молекул не их абсолютными значениями (в кг), а относительными безразмерными величинами, называемыми относительной атомной массой A и относительной молекулярной массой M_r .

1. Относительная молекулярная масса.

Относительной молекулярной (атомной) массой вещества называется величина, равная отношению массы молекулы (атома) данного вещества к $1/12$ массы атома углерода

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

По международному соглашению в качестве атомной единицы массы (а. е. м.) m_0 принимается $1/12$ массы изотопа углерода ^{12}C

$$m_0 = 1/12 m_{0C} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1 \text{ а. е. м}$$

Правило для расчёта относительной молекулярной массы:

Чтобы определить относительную молекулярную массу вещества, надо сложить атомные массы всех химических элементов, входящих в молекулу. Атомную массу элемента найдём в таблице Менделеева.

Например,

$$M_r(\text{O}_2) = 16 \cdot 2 = 32$$

$$M_r(\text{H}_2\text{O}) = 1 \cdot 2 + 16 = 18$$

$$M_r(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1 \cdot 2 + 32 + 16 \cdot 4 = 98$$

2.Количество вещества

Количество вещества - это величина, характеризующая количество частиц в веществе.

- обозначение, единица измерения в СИ: ν [моль]

1 моль – это такое количество вещества, в котором содержится столько же частиц (атомов или молекул), сколько частиц содержится в 0,012 кг углерода

Постоянная Авогадро

Исходя из определения 1 моля следует, что в 1 моле любого вещества содержится одинаковое количество частиц. Это число частиц называют числом Авогадро и обозначают N_A

$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ - столько частиц (молекул, атомов) содержится в 1 моле
любого вещества

3. Молярная масса вещества.

Молярная масса вещества – это масса 1 моля вещества

- обозначение, единица измерения в СИ: M [кг/моль]

- **правило для определения M :**

Чтобы определить молярную массу вещества, надо относительную молекулярную массу умножить на 10^{-3}

- формула для расчёта: $M = M_r \cdot 10^{-3}$

Формулы для расчёта:

$$M = M_r \cdot 10^{-3}$$

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

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

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

Броуновское движение. Диффузия

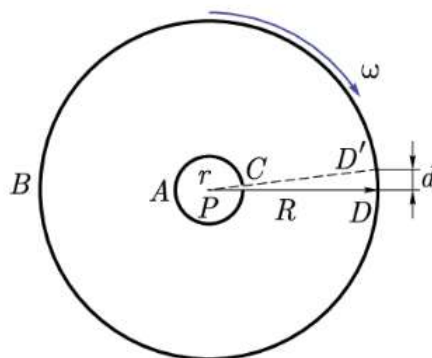
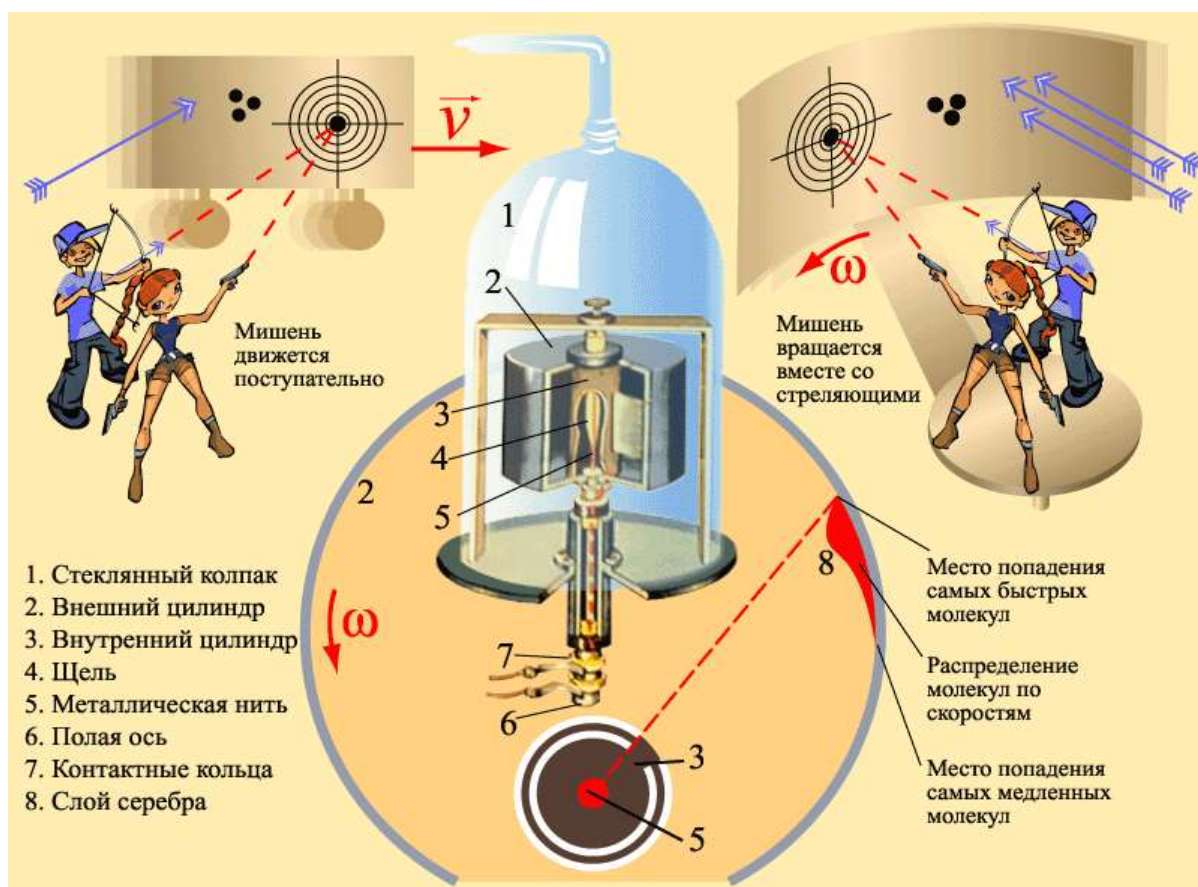
Тепловое движение взвешенных в жидкости (газе) частичек получило название *броуновского движения*.



Диффузией называют явление самопроизвольного проникновения одного вещества в другое.

Скорость протекания процесса диффузии зависит от рода диффундирующих веществ и температуры. Диффузия в жидкостях происходит медленнее, чем в газах, но быстрее, чем в твердых телах, потому что чем плотнее вещество, тем ближе друг к другу расположены в нем молекулы.

Скорости движения молекул и их измерение

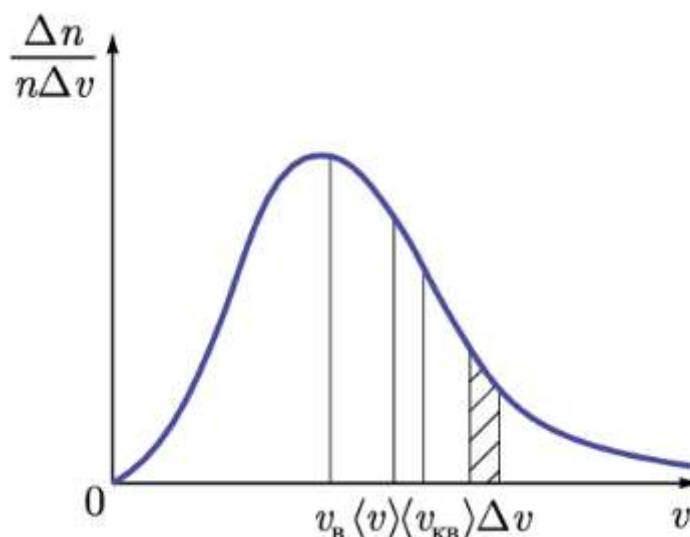


Действительно, если скорость внешнего цилиндра u , а время пролета молекулы от внутреннего цилиндра до внешнего t , то расстояние на поверхности цилиндра $d = ut = \omega R t$, а скорость молекулы $v = (R - r)/t$. Исключив из обоих уравнений t , получим

$$v = \frac{\omega R (R - r)}{d}$$

Средняя скорость атомов серебра в опыте оказалась равной 650 м/с. Характерно, что слой серебра на внешнем цилиндре получился размытым. Это означает, что скорости движения атомов различны.

Распределение молекул по скоростям. Закон распределения скоростей молекул в газе был получен Дж. К. Максвеллом. Ввиду сложности закона здесь представлен лишь его графическое изображение



Площадь заштрихованной полосы с основанием Δv показывает, какая часть от общего числа молекул имеет скорости, лежащие в данном интервале. Максимум кривой распределения, представленной на рис. , соответствует *наиболее вероятной скорости* v_B

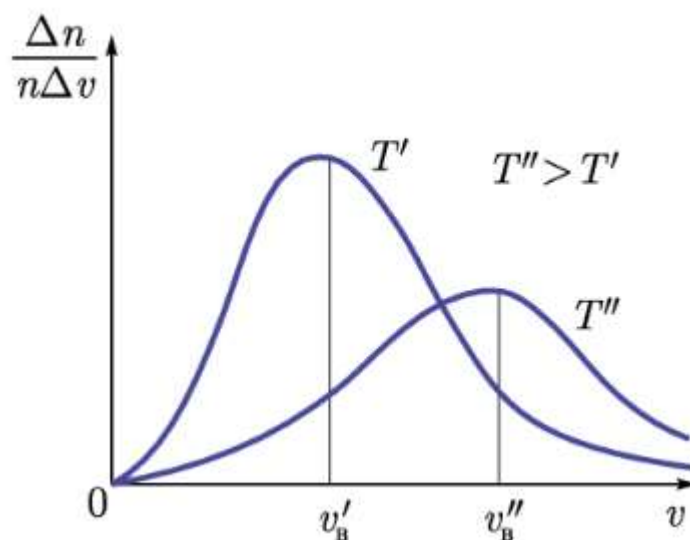
Площадь заштрихованной полосы с основанием Δv показывает, какая часть от общего числа молекул имеет скорости, лежащие в данном интервале. Максимум кривой распределения, представленной на рис. , соответствует *наиболее вероятной скорости* v_B

$$\langle v \rangle = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_n}{n}$$

средней арифметической скоростью

$$\langle v_{\text{КВ}} \rangle = \sqrt{v_{\text{КВ}}^2} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n}};$$

средней квадратической скоростью (корень квадратный из среднего значения квадрата скорости)



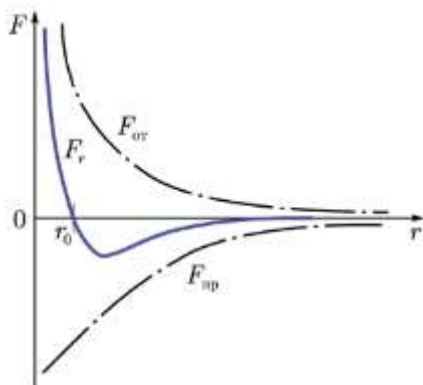
С повышением температуры наиболее вероятная скорость возрастает, максимум распределения молекул по скоростям сдвигается в сторону больших скоростей. С повышением температуры увеличивается относительное число Молекул, обладающих большими скоростями.

Силы и энергия межмолекулярного взаимодействия

При изучении строения вещества было установлено, что между молекулами одновременно действуют силы притяжения и отталкивания, называемые **молекулярными силами**. Способность твердых тел сопротивляться растяжению, особые свойства поверхности жидкости и другие явления приводят к выводу, что между молекулами действуют силы **притяжения**. Малая сжимаемость весьма плотных газов и особенно жидкостей и твердых тел означает, что между молекулами существуют силы **отталкивания**.

Межмолекулярное взаимодействие – это взаимодействие электрически нейтральных молекул или атомов.

Между электронами одной молекулы и атомными ядрами другой действуют силы притяжения $F_{пр}$, которые условно принято считать отрицательными. Одновременно между электронами молекул и их ядрами действуют силы отталкивания $F_{от}$, которые условно считают положительными. На расстоянии $r = r_0$, как видно из рис.



результатирующая сила равна нулю ($F_r = 0$), т. е. силы притяжения уравнивают силы отталкивания. Этому соответствует наиболее устойчивое расположение взаимодействующих молекул. При $r > r_0$ сила притяжения превосходит силу отталкивания,

при $r < r_0$ — наоборот.

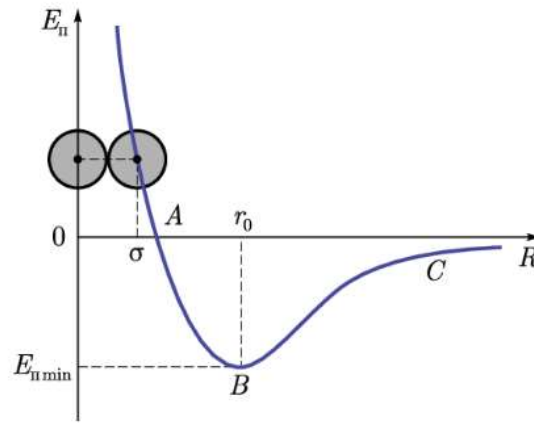
При растяжении твердого тела происходит удаление частиц друг от друга на расстояние $r > r_0$; при этом начинают действовать силы притяжения между частицами, стремящиеся вернуть частицу в исходное положение ($r = r_0$).

Атомы и молекулы взаимодействуют и, следовательно, обладают потенциальной энергией $E_{п}$

Потенциальная энергия считается положительной при отталкивании молекул, отрицательной — при притяжении.

Потенциальную энергию тяготеющих тел, находящихся на бесконечном расстоянии друг от друга, условились считать равной нулю.

При сближении молекул потенциальная энергия их будет уменьшаться и достигнет минимального значения при $r = r_0 (F_r = 0)$. Дальнейшее сближение молекул возможно только за счет работы, совершаемой против сил отталкивания. При этом потенциальная энергия молекул начнет резко возрастать. Итак, потенциальная энергия взаимодействия молекул имеет минимум при $r = r_0$. Следовательно, **положение устойчивого равновесия молекул соответствует минимуму их потенциальной энергии.**



Строение газообразных, жидких и твердых тел

	В Е Щ Е С Т В О		
	газообразное	жидкое	твёрдое
Характер упаковки частиц	Частицы распределяются по всему предоставленному объёму	Несколько более рыхлая упаковка чем в кристаллах	Частицы плотно упакованы
Среднее расстояние между молекулами	Велико (для идеального газа 3,3 нм)	Мало (0,2-0,3нм)	Очень мало (0.1нм)
Силы сцепления	Очень малы	Несколько меньше, чем в твёрдых телах	велики
Степень порядка	хаос	Ближний порядок	Дальний порядок
модели	Рой мошек	Стадо обезьян	Каркас сборного дома
Характер теплового движения частиц	Поступательное движение, равное длине свободного пробега	Колебательное движение около положения равновесия и медленное перемещение внутри жидкости. Время оседлой жизни	Колебательное движение около положения равновесия. Время оседлой жизни порядка часов, суток, лет

		$10^{-10} - 10^{-12}$ с	
Основные свойства вещества	1. газы полностью занимают любые предоставленные им объёмы 2. легко меняют свой объём и форму 3. все газы легко и самопроизвольно перемешиваются между собой в любых пропорциях	1. Жидкости занимают нижнюю часть предоставленного им объёма 2. При изменении температуры или давления объём жидкости меняется незначительно, форма меняется 3. не все жидкости смешиваются в любых пропорциях между собой	1. для твёрдых тел характерны строгие форму и жёсткость 2. не меняют объём, но вследствие деформации могут изменить форму 3. самопроизвольно не перемешиваются

Идеальный газ. Основное уравнение МКТ

Идеальный газ – это газ, в котором

- **Частицы – материальные точки**
- **Частицы взаимодействуют только при соударениях**
- **Удары абсолютно упругие**

Состояние некоторой массы газообразного вещества характеризуют зависимыми друг от друга физическими величинами, называемыми **параметрами** состояния. К ним относятся объём V , давление p и температура T .

Объём газа *всегда совпадает с вместимостью того сосуда, который он занимает. Единица объёма в СИ — кубический метр (m^3).*

Давление — *физическая величина, равная отношению силы F , действующей на элемент поверхности нормально к ней, к площади S этого элемента:*

Единица давления в СИ — *паскаль* ($1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па}$).

Двигаясь хаотично, молекулы (атомы) газа постоянно сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда. Т.к. они имеют импульс, то при столкновении происходит передача импульса, т.е. молекулы действуют с силой и производят давление.

Рудольф Клаузиус доказал, что давление газа зависит от массы молекулы, концентрации и скорости движения молекул. Эта зависимость выражается формулой

$$P = \frac{1}{3} m_0 n \bar{v}^2$$

и называется основным уравнением МКТ.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории определяет макроскопическую величину — давление газа через концентрацию n молекул, массу m_0 отдельных молекул и среднюю квадратическую скорость их движения/

Т.к. $E_k = \frac{m_0 v^2}{2}$, то $P = \frac{2}{3} n E_k$ - основное уравнение МКТ. Оно связывает макроскопический параметр давление (его можно измерить прибором) с микроскопическими параметрами. (Величины, характеризующие свойства *отдельных молекул* вещества, называют *микроскопическими* параметрами. Это, например, массы молекул, их скорости, концентрация (число молекул в единице объема).

$$m_0 n = m_0 \frac{N}{V} = \frac{m}{V} = \rho$$

$$p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2$$

Температура и тепловое равновесие

При соприкосновении тел с различной степенью нагретости между ними происходит теплообмен: более нагретые тела передают энергию менее нагретым. Если теплообмена не происходит, значит тела нагреты одинаково, т.е. находятся в состоянии **теплового равновесия**.

Тепловое равновесие – это состояние, при котором макроскопические параметры остаются неизменными сколь угодно долго.

- Любое макроскопическое тело или группа макроскопических тел при неизменных внешних условиях самопроизвольно переходит в состояние теплового равновесия.
- Все тела системы, находящиеся друг с другом в тепловом равновесии имеют одну и ту же температуру.

Вместе с изменением температуры меняются другие параметры – объём, давление, электрическое сопротивление. На этом основана работа термометра жидкостного, газового, металлического, полупроводникового (термометр сопротивления — [электронный прибор](#), предназначенный для измерения температуры).

Для однозначного определения температуры необходим выбор термометрического тела и температурного параметра.

Температурный параметр должен изменяться при изменении температуры непрерывно и монотонно, т.е. он не должен иметь одинаковых значений при разных температурах.

Показания термометров, использующих различные термометрические тела, обычно несколько различаются.

Но точное определение температуры не должно зависеть от вещества, заполняющего термометр. С этой целью применяют термодинамическую шкалу температур. (Кельвина)

Определение температуры



$$p = \frac{2}{3} n E_k = \frac{2 N}{3 V} E_k$$

$$\frac{2}{3} E_k = \frac{pV}{N} = const$$

$$\frac{2}{3} E_k = \Theta$$

При тепловом равновесии средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул всех газов одинакова.

Определение температуры



$[\Theta] = \text{Дж}$
 Θ - Энергетический эквивалент температуры.

$$\left(\frac{pV}{N}\right)_t = \Theta_t = \text{const}$$

$$\Theta_0 = 3,76 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$$

$$\Theta_{100} = 5,10 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$$

$$\Theta \sim T$$

Определение температуры



$\Theta = kT$

$$k = \frac{\Theta_{100} - \Theta_0}{100 - 0}$$

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

- постоянная
Больцмана

Термодинамическая температура пропорциональна средней кинетической энергии хаотического движения молекул газа

Термодинамическая температура – мера средней кинетической энергии движения молекул газа.

Температура – мера средней кинетической энергии молекул

$$\left. \begin{array}{l} \Theta = kT \\ \frac{2}{3} \bar{E}_k = \Theta \end{array} \right\} E_k = \frac{3}{2} kT$$

$$[T] = \text{К (кельвин)}$$

$$T = t + 273$$

$$t = T - 273$$

$$\Delta t = \Delta T$$

Средние кинетические энергии молекул разных газов, находящихся при одинаковой температуре, равны между собой.

Зависимость давления газа от температуры и концентрации молекул газа

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_k &= \frac{3}{2}kT \\ p &= \frac{2}{3}n\bar{E}_k \end{aligned} \right\} p = nkT$$

Давление газа пропорционально произведению числа молекул в единице объема на его термодинамическую температуру.

Средняя квадратичная скорость

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_{k0} &= \frac{3}{2}kT \\ \bar{E}_{k0} &= \frac{m_0 \langle v_{кв} \rangle^2}{2} \end{aligned} \right\} \langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

Средняя квадратическая скорость молекул пропорциональна корню квадратному из термодинамической температуры.

При $T = 0$ К отсутствует поступательное движение молекул.

Уравнение Менделеева-Клапейрона

Используя зависимость давления газа от концентрации его молекул и температуры можно получить уравнение Клапейрона-Менделеева.

Уравнение состояния идеального газа

(ур-е Менделеева – Клапейрона)

$$\left. \begin{aligned} p &= nkT = \frac{N}{V}kT \\ N &= \nu N_A = N_A \frac{m}{M} \end{aligned} \right\}$$

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

$$N_A \cdot k = R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \quad \text{- универсальная газовая постоянная}$$

Уравнение состояния идеального газа

(ур-е Менделеева – Клапейрона)

Если в ходе процесса масса газа остается неизменной, то

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} R = const$$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p_3 V_3}{T_3} = \dots$$

Газовые законы

Всякое изменение состояния газа называется *термодинамическим процессом*.

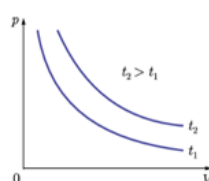
В любом термодинамическом процессе изменяются параметры, определяющие состояние газа.

Нет ни одного процесса, при котором изменялся бы только один параметр. Изменение одного параметра ведет к изменению остальных. Процесс, при котором один из параметров остается постоянным, а два других изменяются, называют **изопроцессом**.

Изотермический процесс

- Процесс, происходящий с газом неизменной массы при постоянной температуре называется изотермическим.
- Изотермический процесс описывается **законом Бойля – Мариотта** (конец 17 века):

$$pV = const \quad p_1 V_1 = p_2 V_2$$



Изобарный процесс

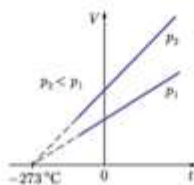
- Процесс, происходящий с газом неизменной массы при постоянном давлении называется изобарным.
- Изобарный процесс описывается **законом Гей-Люссака (1802 г.)**:

Закон Гей-Люссака: объем газа данной массы при постоянном давлении возрастает линейно с увеличением температуры:

$$V = V_0(1 + \alpha t)$$

$$V = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right)$$

где V – объем газа при температуре t , °C; V_0 – его объем при 0 °C; α – **температурный коэффициент объемного расширения** (для всех газов $\alpha = 1/273$ °C).



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

Изохорный процесс

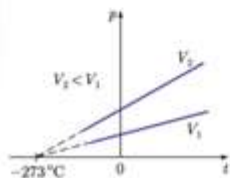
- Процесс, происходящий с газом неизменной массы при постоянном объеме называется изохорным.
- Изохорный процесс описывается **законом Шарля (1787 г.)**:

Закон Шарля: давление газа данной массы при постоянном объеме возрастает линейно с увеличением температуры:

$$p = p_0(1 + \gamma t)$$

$$p = p_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right)$$

где p – давление газа при температуре t , °C; p_0 – его давление при 0 °C; γ – **температурный коэффициент давления**. Его значение не зависит от природы газа; для всех газов $\gamma = 1/273$ °C⁻¹. Таким образом,



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

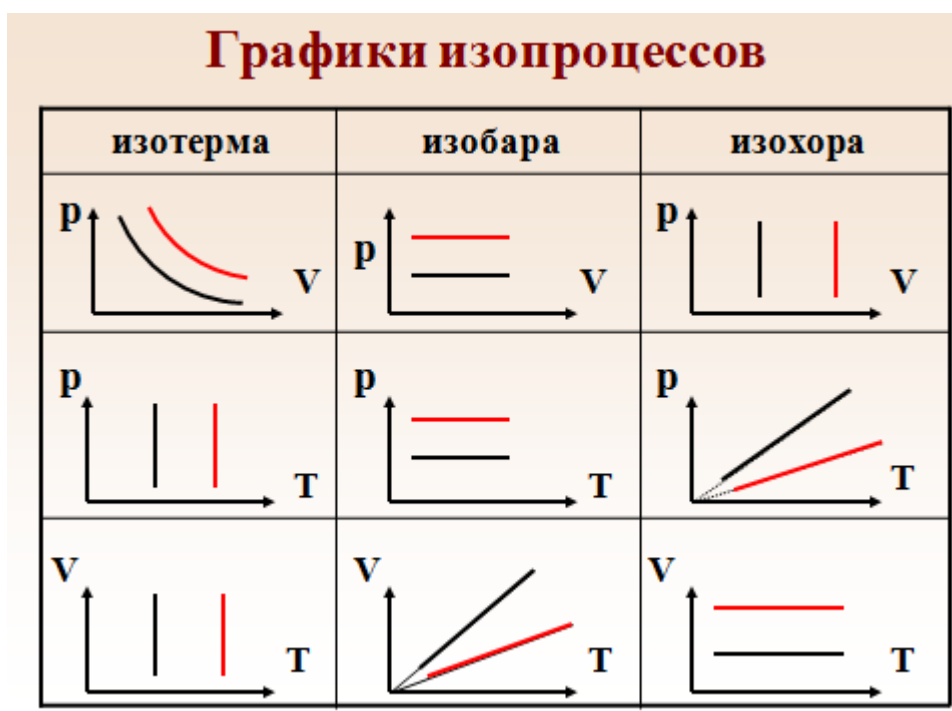
Абсолютный нуль температуры.

Если изохору продолжить в область отрицательных температур, то в точке пересечения с осью абсцисс имеем

$$p = p_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right) = 0.$$

Отсюда $t = -273 \text{ }^\circ\text{C}$ (точнее, $-273,16^\circ\text{C}$), что соответствует нулю по термодинамической шкале. Эту температуру называют *нулем Кельвина* (или *абсолютным нулем*).

Термодинамическая шкала температур была предложена английским ученым У. Кельвином. За начало отсчета на этой шкале принята температура нуль Кельвина (0 К). Нуль Кельвина — это предельная температура, при которой давление идеального газа равно нулю. Температура ниже 0 К невозможна; 0 К — это самая низкая температура в природе. Существование ее предсказал М. В. Ломоносов. За единицу температуры по термодинамической шкале принят *кельвин* (К); 1 К соответствует $1 \text{ }^\circ\text{C}$



Вопросы для самоконтроля и повторения

1. Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетической теории.
2. Что такое молекула?

3. Что такое атом?
4. Что такое относительная молекулярная масса?
5. Что называется количеством вещества? Единица измерения.
6. Каков физический смысл постоянной Авогадро?
7. В чем измеряется молярная масса?
8. Чем обусловлено броуновское движение?
9. Что такое диффузия?
10. Каков характер зависимости сил межмолекулярного взаимодействия от расстояния между молекулами?
11. Изобразите зависимость потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними.
12. Какие агрегатные состояния вещества существуют?
13. Какими скоростями характеризуют движение молекул газа?
14. Какой газ называют идеальным?
15. Назовите параметры состояния газа.
16. Что такое давление газа? Чем оно обусловлено?
17. Какими приборами измеряют давление газа?
18. Дайте определение вакуума.
19. Запишите основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов.
20. Что называется термодинамическим процессом? изопроцессом?
21. Сформулируйте законы Бойля - Мариотта, Гей-Люссака, Шарля.
22. Какая температура называется термодинамической?
23. Какой физический смысл имеют молярная газовая постоянная и постоянная Больцмана?
24. Какова связь между кинетической энергией поступательного движения молекул газа и его термодинамической температурой?
25. Выведите уравнение Клапейрона - Менделеева из основного уравнения молекулярно-кинетической теории.

Лекция 11

Основы термодинамики

Основные понятия и определения

Термодинамика относится к феноменологическим теориям физики, которые имеют следующие общие черты: 1) они не рассматривают атомную структуру материи; 2) используют величины, которые определяются только для макроскопической системы; 3) построение теории основывается на известных опытных данных; 4) свойства вещества выражаются в форме характеристических параметров (плотность, вязкость и т.д.)

Термодинамика изучает тепловые свойства макроскопических систем, не обращаясь к микроскопическому строению тел, составляющих систему. Она строится на базе нескольких основных принципов — начал термодинамики, которые представляют собой обобщение известных многочисленных опытных данных.

Основные определения.

Физическая система, состоящая из большого числа частиц — атомов или молекул, которые совершают тепловое движение и, взаимодействуя между собой, обмениваются энергиями, называется *термодинамической системой*.

Состояние термодинамической системы определяется *макроскопическими параметрами*, например удельным объемом, давлением, температурой.

Термодинамика рассматривает только равновесные состояния, т. е. состояния, в которых параметры термодинамической системы не меняются со временем.

Термодинамическим процессом называется переход системы из начального состояния в конечное через последовательность промежуточных состояний.

Процессы бывают обратимыми и необратимыми.

Обратимым процессом называется такой процесс, при котором возможен обратный переход системы из конечного состояния в начальное через те же промежуточные состояния, чтобы в окружающих телах не произошло никаких изменений. Обратимый процесс является физической абстракцией.

Любой процесс, сопровождаемый трением или теплопередачей от нагретого тела к холодному, называется *необратимым процессом*. Примером необратимого процесса является расширение газа, даже идеального, в пустоту. Расширяясь, газ не преодолевает сопротивления среды, не совершает работы, но для того чтобы вновь собрать все молекулы газа в прежний объем, т. е. привести газ в начальное состояние, необходимо затратить работу. Таким образом, все реальные процессы являются необратимыми

Внутренняя энергия

Внутренняя энергия — это сумма энергий молекулярных взаимодействий и энергии теплового движения молекул.

Внутренняя энергия системы зависит только от ее состояния и является однозначной функцией состояния.

Началом отсчета внутренней энергии считается такое состояние системы, при котором внутренняя энергия равна нулю. Обычно считают, что внутренняя энергия равна нулю при $T = 0 \text{ K}$.

При переходе системы из одного состояния в другое практический интерес представляет изменение внутренней энергии ΔU , поэтому выбор начала отсчета внутренней энергии не имеет значения.

Поэтому часто для удобства, употребляя понятие внутренней энергии, имеют в виду не всю внутреннюю энергию данной системы, а только ту ее часть, которая существенна для рассмотрения данного явления.

Понятие энергии относится всегда к системе тел. Нельзя считать, что энергией может обладать какое-нибудь одно тело или одна частица без связи с другими телами и с другими частицами.

$$[U] = \text{Дж}$$

$$U = N \cdot E_k + N \cdot E_n$$

Внутренняя энергия идеального газа.

Газ, состоящий из отдельных атомов, а не молекул, называется *одноатомным*. К одноатомным газам относятся инертные газы — гелий, неон, аргон. В случае идеальных газов пренебрегают силами Взаимодействия молекул, т. е. их потенциальная энергия полагается равной нулю, поэтому внутренняя энергия идеального газа представляет собой кинетическую энергию теплового движения молекул

Внутренняя энергия
В идеальном газе частицы не взаимодействуют между собой, следовательно их потенциальные энергии равны нулю.

$$\left. \begin{aligned} U &= N \cdot E_k \\ N &= N_A \frac{m}{\mu} \\ \bar{E}_k &= \frac{3}{2} kT \\ N_A \cdot k &= R \end{aligned} \right\} \begin{aligned} U &= \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} RT \\ U &= \frac{3}{2} \nu RT \\ U &= \frac{3}{2} pV \end{aligned}$$

Внутренняя энергия

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

- Коэффициент $\frac{3}{2}$ применим только для одноатомного газа.
- В общем случае используется коэффициент $\frac{i}{2}$, где i — число степеней свободы движения частицы.

Одноатомный газ (неон, аргон, гелий) — $i = 3$.
 Двухатомный газ (водород, азот) — $i = 5$.
 Трехатомный газ (углекислый газ, озон) — $i = 6$.

Внутренняя энергия идеального газа пропорциональна массе газа и его термодинамической температуре.

Степени свободы молекулы

Молекула одноатомного газа принимается за материальную точку, так как масса атома сосредоточена в основном в ядре, **размеры** которого малы. Положение одноатомной молекулы в пространстве **однозначно** задается тремя координатами. Говорят, что одноатомный газ имеет **три** степени свободы ($i=3$). Эта молекула движется только поступательно. **Вследствие** того что молекула находится в хаотическом движении, все направления ее движения являются равноправными, т. е. средняя кинетическая энергия

хаотического теплового движения молекулы равномерно распределена между **тремя** степенями свободы.

На каждую степень свободы поступательного движения одноатомной молекулы приходится одинаковая кинетическая энергия, равная $1/2kT$

Молекула двухатомного газа представляет собой *два атома, жестко связанных между собой*. Эти молекулы не только движутся поступательно, но и вращаются.

Такая молекула кроме трех степеней свободы поступательного движения имеет две степени свободы вращательного движения, т.е. $i=5$. Если газ многоатомный, то $i=6$

Работа и теплота как формы передачи энергии

Способы изменения внутренней энергии:

- **Совершение работы (Механический способ)**

Работа в термодинамике



$$\left. \begin{aligned} A_z &= F \cdot h \\ F &= p \cdot S \\ S \cdot h &= \Delta V \end{aligned} \right\} A_z = p \cdot \Delta V$$

$$A_z = \frac{m}{\mu} R \Delta T$$

Данные выражения подходят только для расчета работы газа в ходе изобарного процесса.

Работа в термодинамике

- Если процесс не изобарный, используется графический метод: работа равна площади фигуры под графиком процесса в осях pV.
- Работа газа считается положительной, если объем газа увеличивается и отрицательной, если объем газа уменьшается.



- В случае изохорного процесса работа газа равна нулю.

- **Передача теплоты (Теплообмен.)**

Количество теплоты

Количество теплоты – это энергия полученная или отданная телом в процессе теплопередачи.

Виды теплопередачи:

- Теплопроводность
- Конвекция
- излучение

$$[Q] = \text{Дж}$$

Теплота и работа являются не видом энергии, а формой ее передачи, они существуют лишь в процессе передачи энергии.

Теплоемкость. Удельная теплоемкость.

Уравнение теплового баланса

Теплоемкость. *Теплоемкостью тела* называют отношение количества теплоты Q , необходимого для повышения его температуры от T_1 до T_2 , к разности этих температур $\Delta T = T_2 - T_1$

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

Теплоемкость, таким образом, характеризует то количество теплоты, которое нужно сообщить телу, чтобы нагреть его на 1 К (при охлаждении на 1 К тело выделяет то же количество теплоты, что и поглощает при нагревании)

Нагревая тела с одинаковыми массами, но состоящие из различных веществ, можно обнаружить, что для повышения их температуры на 1 К требуются различные количества теплоты; следовательно,

Теплоемкость тела зависит от его природы.

Теплоемкость тела пропорциональна его массе. Поэтому характеристикой тепловых свойств вещества является его *удельная теплоемкость* c — величина, равная отношению теплоемкости тела к его массе:

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m\Delta T}$$

В СИ удельная теплоемкость вещества выражается в *джоулях на килограмм-кельвин* [Дж/(кг·К)]

Количество теплоты

потребляется

нагревание

$$Q = cm(t_2 - t_1)$$

$$t_2 > t_1 \Rightarrow \Delta t > 0$$

выделяется

охлаждение

$$Q = cm(t_2 - t_1)$$

$$t_2 < t_1 \Rightarrow \Delta t < 0$$

c – удельная теплоемкость вещества – величина равная энергии, необходимой для нагревания тела массой 1 кг на 1 К.

$$[c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Количество теплоты

потребляется

плавление

$$Q = \lambda m$$

выделяется

кристаллизация

$$Q = -\lambda m$$

λ – удельная теплота плавления вещества – величина равная энергии, необходимой для того, чтобы тело массой 1 кг, взятое при температуре плавления полностью расплавилось.

$$[\lambda] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

Количество теплоты

потребляется

парообразование

$$Q = Lm$$

выделяется

конденсация

$$Q = -Lm$$

L – удельная теплота парообразования вещества – величина равная энергии, необходимой для того, чтобы жидкость массой 1 кг, взятая при температуре кипения полностью перешла в газообразное состояние.

$$[L] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

Количество теплоты

потребляется

выделяется

Сгорание топлива

$$Q = -qt$$

q – удельная теплота сгорания топлива – величина равная энергии, которая выделяется при сгорании данного вида топлива массой 1 кг.

$$[q] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

Для измерения и сравнения теплоемкостей различных тел пользуются *калориметром* — прибором, в котором происходит теплообмен между телами изолированными от воздействия окружающей среды. Простейший калориметр представляет собой металлический стакан с крышкой.

Зная начальные температуры, массы всех тел и удельные теплоемкости жидкости c_3 и материала калориметра c_2 , можно вычислить неизвестную теплоемкость c_x твердого тела исходя из *уравнения теплового баланса*, по которому количество теплоты Q_1 отданное телом, равно количеству теплоты, полученному калориметром (Q_2 —сосудом, Q_3 —жидкостью):

$$Q_1 = Q_2 + Q_3.$$

Если в замкнутой системе, состоящей из нескольких тел, имеющих первоначально различные температуры, происходит теплообмен, то работы внутри системы не совершается.

Поэтому уравнение теплового баланса для замкнутой системы имеет вид

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0,$$

Первое начало термодинамики

Первое начало термодинамики (закон сохранения и превращения энергии): при разнообразных процессах, протекающих в природе, энергия не возникает из ничего и не уничтожается, но превращается лишь из одних видов в другие.

В общем случае внутренняя энергия тела может возрасть как в результате механической работы внешних сил, так и вследствие теплообмена.

Первый закон термодинамики

$$\Delta U = Q + A$$

Изменение внутренней энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе.

$$A = -A_2 \quad Q = \Delta U + A_2$$

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

Применение первого закона термодинамики к различным процессам

Изотермический процесс

$$Q = \Delta U + A_z$$

$$\Delta U = 0, \text{ т.к. } \Delta T = 0$$

$$Q = A_z$$

В ходе изотермического процесса все полученное системой количество теплоты идет на совершение работы.

Первое начало термодинамики формулируют в виде следующего утверждения: невозможно построить перпетуум мобиле первого рода.

Построить машину, которая производила бы работу, не потребляя эквивалентного количества энергии; такую машину назвали *вечным двигателем* (от лат. *perpetuum mobile* непрерывное движение) *первого рода*.

Изобарный процесс

$$\begin{aligned} Q &= \Delta U + A_z & \Delta U &= \frac{3}{2} A_z \\ \Delta U &= \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T & Q &= \frac{5}{2} A_z \\ A_z &= \frac{m}{\mu} R \Delta T & Q &= \frac{5}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T \end{aligned}$$

Данный способ расчета внутренней энергии и количества теплоты подходит только для одноатомного газа.

Изобарный процесс

Если газ не одноатомный, то

$$Q = cm(t_2 - t_1), \quad A_z = \frac{m}{\mu} R \Delta T$$

$$\Delta U = Q - A_z$$

Можно воспользоваться следующими выражениями:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T \quad Q = \frac{i+2}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T$$

i – число степеней свободы движения частиц.

Изохорный процесс

$$Q = \Delta U + A_2$$

$$A_2 = 0, \text{ т.к. } \Delta V = 0$$

$$Q = \Delta U$$

В ходе изохорного процесса все полученное системой количество теплоты идет на изменение внутренней энергии системы.

Адиабатный процесс

Процесс, который происходит без теплообмена с внешней средой называется адиабатным.

$$Q = 0$$

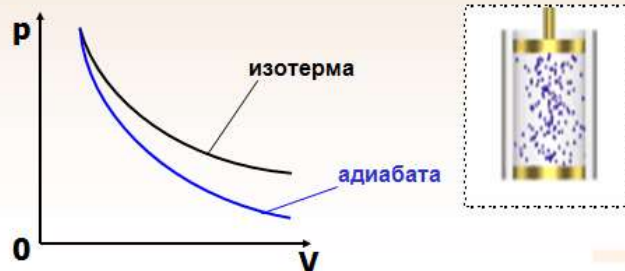
$$0 = \Delta U + A_2$$

$$\Delta U = -A_2$$

В ходе адиабатного процесса газ совершает работу за счет изменения внутренней энергии.

Адиабатный процесс

$$\Delta U = -A_2 \begin{cases} \text{если } \Delta V > 0, \text{ то } \Delta T < 0 \\ \text{если } \Delta V < 0, \text{ то } \Delta T > 0 \end{cases}$$



Принцип действия тепловой машины.

КПД теплового двигателя

Тепловой двигатель. Тепловой двигатель представляет собой устройство, превращающее внутреннюю энергию топлива в механическую.

Любой тепловой двигатель состоит из трех основных частей: рабочего тела, нагревателя и холодильника.

Тепловой двигатель должен работать циклически. Если тело из начального состояния A переводится в конечное состояние B , а затем через другие промежуточные состояния возвращается в начальное состояние A , то говорят, что совершается *круговой процесс*, или цикл

После окончания цикла тело возвращается в свое первоначальное состояние, его внутренняя энергия принимает начальное значение

Цикл Карно. Различают *прямой* (цикл тепловой машины) и *обратный* (цикл холодильной машины) *циклы*.

От нагревателя идеальный газ получил количество теплоты Q_n , холодильнику отдал Q_x ; следовательно, согласно первому началу термодинамики, в работу превращено количество теплоты, равное $Q_n - Q_x$.
Величина

$$\eta = \frac{Q_n - Q_x}{Q_n}$$

называется коэффициентом полезного действия (КПД) тепловой машины.

КПД цикла Карно можно выразить через температуры нагревателя T_n и холодильника T_x

$$\eta = \frac{T_n - T_x}{T_n}$$

Коэффициент полезного действия определяется лишь температурами нагревателя и холодильника и не зависит от рода рабочего вещества.

I. Для повышения КПД тепловой машины нужно увеличивать температуру нагревателя и уменьшать температуру холодильника.

2. КПД тепловой машины всегда меньше 1

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} 100 \% \approx 62 \%$$

Второе начало термодинамики

Первое начало термодинамики устанавливает количественное соотношение между количеством теплоты, работой и изменением внутренней энергии тела, но оно не определяет направления течения процессов. С точки зрения первого начала термодинамики, одинаково возможен переход энергии в форме теплоты как от более нагретого к менее нагретому телу, так и наоборот.

Второе начало термодинамики определяет направление процессов, происходящих в природе и связанных с превращением энергии.

Превращение теплоты в работу возможно только при наличии нагревателя и холодильника; во всех тепловых машинах полезно используется только часть энергии, передаваемая от нагревателя к холодильнику.

Второе начало термодинамики:

1. «Коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины определяется только температурами теплоотдатчика и теплоприемника» (С. Карно).

2. «В природе невозможен процесс, единственным результатом которого был бы переход теплоты полностью в работу» (М.Планк).

3. «Теплота не может сама собой переходить от тела с более низкой температурой к телу с более высокой температурой» (Р. Клаузиус).

Таким образом, второе начало термодинамики утверждает невозможность построения вечного двигателя второго рода, т.е. двигателя, работающего за счет охлаждения какого-либо одного тела

Вопросы для самоконтроля и повторения

1. Какие методы исследования свойств макроскопических систем применяются в молекулярной физике? В чем состоит различие этих методов?
2. Что называют термодинамической системой?
3. Что называют термодинамическим процессом?
4. Дайте определение обратимого и необратимого процессов.
5. Дайте определение внутренней энергии системы.
6. От чего зависит внутренняя энергия идеального газа?
7. Какие формы передачи энергии вам известны? Расскажите о них.
8. Какова разница между теплоемкостью тела и удельной теплоемкостью?
9. В чем смысл уравнения теплового баланса и какое отношение оно имеет к закону сохранения энергии?
10. Сформулируйте первое начало термодинамики.
11. Дайте определение адиабатного процесса.
12. От чего зависит КПД тепловой машины?
13. Сформулируйте второе начало термодинамики.
14. Что такое термодинамическая шкала температур?
15. Приведите примеры известных вам тепловых двигателей.
16. Наносит ли ущерб природе работа тепловых двигателей?

Лекция 12

Агрегатные состояния вещества

В зависимости от условий тела могут находиться в различных агрегатных состояниях.

Фазами вещества называют его однородные части, различающиеся по физическим свойствам, отделенные друг от друга границами раздела. Лед и вода, в которой он плавает, — пример твердой и жидкой фазы. Вода и водяной пар в чайнике — пример жидкой и газообразной фазы.

В школьных задачах под фазой мы будем понимать именно агрегатное состояние. Переход из одного агрегатного состояния в другое называется **фазовым переходом**.

Однако следует знать, что понятие фаз является более общим понятием, чем понятие об агрегатных состояниях, которыми считаются твердое, жидкое или газообразное вещество. Различные фазы могут существовать и в пределах одного и того же агрегатного состояния. Твердое состояние одного и того же вещества может быть в разных фазах. Известными примерами являются графит и алмаз, белое олово с тетрагональной структурой, которое при атмосферном давлении и температуре ниже 140С переходит в серое олово (этот переход известен как «оловянная чума»).

Переход вещества из одного агрегатного состояния в другое называют **Фазовым переходом**. Фазовый переход, сопровождающийся поглощением или выделением энергии (например, плавление, кристаллизация), называют фазовым переходом первого рода. Эти переходы характеризуются постоянством температуры и изменением объема. Например, при плавлении телу необходимо сообщить некоторое количество теплоты, чтобы вызвать разрушение кристаллической решетки. Подводимая при плавлении теплота идет не на нагрев тела, а на разрыв межатомных связей, поэтому плавление протекает при постоянной температуре.



Свойства паров

Парообразование – переход вещества из жидкого состояния в газообразное

Парообразование



испарение	кипение
Процесс парообразования со свободной поверхности жидкости	Процесс парообразования по всему объёму жидкости
<p>Особенности процесса:</p> <ul style="list-style-type: none"> - жидкость покидают более быстрые молекулы, поэтому внутренняя энергия жидкости уменьшается → $T \downarrow$ - скорость испарения зависит от: <ul style="list-style-type: none"> температуры жидкости наличия ветра площади поверхности жидкости атмосферного давления от рода вещества - испарение происходит при любой температуре - испаряются не только жидкости, но и твердые тела. <p>Испарение твердых тел называется <i>сублимацией</i>, или <i>возгонкой</i>.</p>	<p>Особенности процесса:</p> <ul style="list-style-type: none"> - жидкость нагревается постепенно - процесс парообразования происходит не только с поверхности жидкости, но и во внутрь пузырьков воздуха, которые всегда содержатся в ней - с увеличением температуры давление насыщенного пара в пузырьках увеличивается и объём их растёт - выталкивающая сила увеличивается → пузырьки поднимаются кверху → пар конденсируется → пузырьки лопаются → жидкость закипает <p>Процесс кипения начинается при</p>

	<p>температуре, при которой давление насыщенного пара внутри пузырька равно давлению внутри жидкости</p> <p>- в процессе кипения температура жидкости не меняется</p> <p>- температура, при которой кипит жидкость – температура кипения.</p> <p>Она зависит от внешнего давления: $P \uparrow, T \uparrow$ и наоборот</p>
--	--

Конденсация – переход вещества из газообразного состояния в жидкое. Внутренняя энергия жидкости меньше, чем у газов, поэтому при конденсации выделяется теплота (выпадение росы, образование облаков, туман)

Количество теплоты

<p>потребляется</p> <p>парообразование</p> $Q = Lm$	<p>выделяется</p> <p>конденсация</p> $Q = -Lm$
---	--

L - удельная теплота парообразования вещества – величина равная энергии, необходимой для того, чтобы жидкость массой 1 кг, взятая при температуре кипения полностью перешла в газообразное состояние.

$$[L] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

Конденсация и парообразование происходят только в процессе обмена энергией между окружающей средой и веществом.

Насыщенный пар и его свойства

В закрытом сосуде наряду с процессом испарения жидкости идёт процесс конденсации. Если количество испарившихся молекул равно количеству сконденсированных, то это означает, что пар насыщен. Количество жидкости при этом не меняется.

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью называется **насыщенным**

Когда испарение преобладает над конденсацией, то этот пар – **ненасыщенный**. Свойства ненасыщенного пара близки к идеальному газу и подчиняются газовым законам. Давление **ненасыщенного** пара линейно растёт с ростом температуры $P \sim T$: $T \uparrow P \uparrow$

Давление, при котором пар находится в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется **давлением насыщенного пара**

Зависимость давления **насыщенного** пара от температуры нелинейна: с ростом температуры оно растёт не только из-за увеличения скорости молекул, но и за счёт увеличения концентрации молекул пара: $P = nkT$
 $P \sim n, T$

Влажность воздуха – содержание водяного пара в атмосфере

Характеристики влажности

←	→
Абсолютная влажность -	Относительная влажность-
плотность водяного пара или его парциальное давление при данной температуре ρ_0 [кг/м ³]; P_0 [Па] Прибор: конденсационный гигрометр	Величина, равная отношению парциального давления водяного пара к давлению насыщенного пара при той же температуре φ [%] $\varphi = \frac{\rho_0}{\rho_H} 100\%$

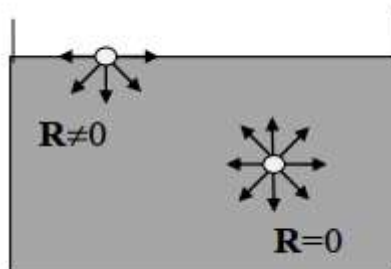
	$\varphi = \frac{P_0}{P_H} 100\%$ <p>Прибор: волосной гигрометр, психрометрический гигрометр</p>
--	---

Точка росы – это температура, при которой водяной пар становится насыщенным

Значение влажности в жизни, технике, в природе

Строение и свойства жидкости

Молекулы в жидкости находятся ближе друг к другу, чем в газах, поэтому сильнее взаимодействуют. Это взаимодействие быстро убывает с увеличением расстояния, следовательно, в расположении молекул жидкости существует только ближний порядок. Молекулы поверхностного слоя жидкости взаимодействуют с меньшим количеством соседних молекул, чем глубинные молекулы. В результате для глубинных молекул $R = 0$, а для поверхностных $R \neq 0$, и направлена вглубь.



Поэтому число молекул на поверхности жидкости уменьшается до тех пор, пока свободная поверхность не достигнет минимального значения. А это есть **сферическая поверхность (капли дождя, росинки)**

Итак, вследствие притяжения молекул вглубь поверхность жидкости натягивается. Возникает сила, действующая вдоль поверхности жидкости и стремящаяся уменьшить её до минимума – сила поверхностного натяжения

$F = \sigma l$, где l – длина поверхностного слоя, σ – коэффициент поверхностного натяжения

Физический смысл σ : показывает силу натяжения, действующую на единицу длины границы поверхностного слоя. [Н/м]

σ зависит от рода жидкости и внешних условий (температуры)

Обычно поверхностное натяжение уменьшается с возрастанием температуры и при критической температуре, когда плотность жидкости и пара одинаковы, поверхностное натяжение жидкости равно нулю.

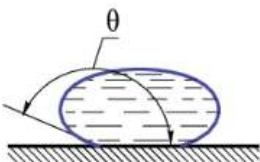
Иногда коэффициент поверхностного натяжения рассчитывают как *отношение потенциальной энергии поверхностного слоя к величине этой поверхности.*

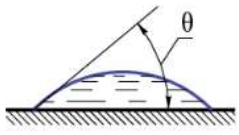
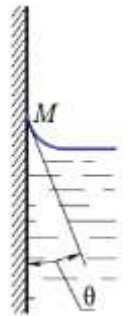
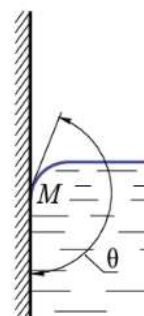
$$\sigma = \frac{W}{S}$$

Или *поверхностное натяжение равно отношению работы, которую нужно затратить при постоянной температуре, чтобы создать поверхность жидкости площадью S , к площади этой поверхности.*

Смачивание – явление, возникающее вследствие взаимодействия молекул жидкости с молекулами твёрдого тела и приводящее к искривлению поверхности жидкости

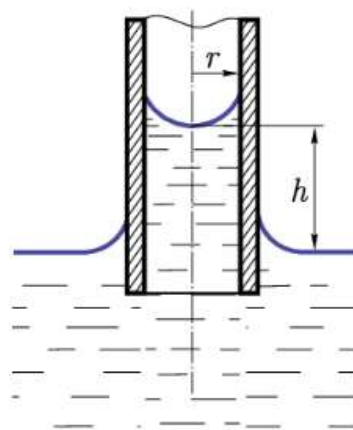
Если силы взаимодействия молекул твёрдого тела и молекул жидкости больше сил взаимодействия между молекулами жидкости, то жидкость смачивает твёрдое тело (ртуть—железо). В противном случае жидкость не смачивает твёрдого тела (ртуть—стекло).

	смачивающая	не смачивающая
По форме поверхности жидкости		

	 <p>Капля растекается по поверхности твёрдого тела</p>	Капля сохраняет свою форму
Краевой угол θ	острый	тупой
Мениск	 <p>вогнутый</p>	 <p>выпуклый</p>

Капилляры – это узкие трубки, диаметр которых меньше их длины.

Смачивающие и несмачивающие жидкости по – разному ведут себя в капиллярах: смачивающие поднимаются по капилляру, несмачивающие – опускаются.



Выпуклый поверхностный слой давит на нижние слои жидкости, а вогнутый – растягивает. Тем самым на жидкость со стороны изогнутого поверхностного слоя радиусом r оказывается избыточное давление, величина которого может быть рассчитана как

$$p = \pm \frac{2\sigma}{R}$$

знак «+» соответствует выпуклому мениску, а «-» – вогнутому мениску.

Избыточное давление вызывает заметное поднятие или опускание уровня жидкости в узких трубках (капиллярах). Высоту подъема жидкости в капиллярной трубке при полном смачивании ее стенок можно определить из соотношения

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

Явление капиллярности играет огромную роль в самых разнообразных процессах, происходящих в природе. Например, проникновение влаги из почвы в растения, в стебли и листья обусловлено капиллярностью. Клетки растения образуют капиллярные каналы, и, как видно из формулы, чем меньше радиус капилляра, тем выше по нему поднимается жидкость. Процесс кровообращения тоже связан с капиллярностью. Кровеносные сосуды являются капиллярами.

Особенно большое значение имеет капиллярность почвы. По мельчайшим сосудам влага из глубины перемещается к поверхности почвы. Если хотят уменьшить испарение влаги, то почву рыхлят, разрушая капилляры. В целях увеличения притока влаги из глубины почву укатывают, увеличивая количество капиллярных каналов. В технике капиллярные явления имеют большое значение в процессах сушки, в строительстве.

Механические свойства твердых тел.

Твёрдые тела сохраняют не только объём, но и форму и по внутреннему строению разделяются на кристаллические и аморфные.

	кристаллические	аморфные
примеры	Лёд, соли, сахар, графит, алмаз, хрусталь, слюда, кварц, металлы и т.д.	Стекло, пластмассы, смола, канифоль, сахарный леденец, резина и т.д.
Особенности строения	Имеют геометрически правильное внутреннее строение: атомы или молекулы занимают определённые положения на протяжении всего тела (сохраняется дальний порядок). Атомы размещаются в узлах геометрически правильной пространственной решётки, поэтому имеют правильную геометрическую форму (снежинка). Атомы и грани кристалла расположены симметрично.	Не имеют строгого порядка в расположении атомов, сохраняя только ближний порядок. С течением времени расположение атомов само по себе меняется, т.е. аморфные тела проявляют свойства жидкости - текучесть
Свойства	1.Анизотропия – зависимость физических свойств кристалла от выбранного направления: механическая прочность, тепло- и электропроводность, оптические свойства и звукопроводность зависят от ориентации атомов относительно оси симметрии	1.Аморфные тела изотропны – их свойства одинаковы по всем направлениям, т.к. не имеют порядка в расположении атомов 2. Нет определённой температуры плавления и кристаллизации.

	<p>кристалла. Анизотропными являются только монокристаллы (одиночные кристаллы), поликристаллические вещества (состоящие из множества монокристаллов) – изотропны (н-р, электропроводность металлов)</p> <p>2. Есть определённая температура плавления, при которой упорядоченная структура кристалла разрушается</p> <p>3. Механические свойства обеспечиваются равенством сил притяжения и отталкивания между соседними атомами кристалла</p>	<p>Переход из твёрдого состояния в жидкое имеет характер постепенного размягчения</p> <p>3. Механические свойства твёрдых тел сохраняются только при низких температурах. При повышении температуры их свойства приближаются к свойствам жидкости (вязкость, текучесть)</p>
--	---	--

Механические свойства твёрдых тел

Механические свойства твёрдых тел обусловлены их молекулярной структурой. Внешнее механическое воздействие на твёрдое тело может приводить к изменению его формы и объёма.

Изменение формы или объёма твёрдого тела называется **деформацией**. Деформация бывает упругая (тело возвращается в исходное состояние после прекращения действия силы - примеры) и пластическая (тело не возвращается в исходное состояние - примеры).

Виды упругой деформации

Вид деформации		Примеры деформации
Растяжение (сжатие)	Деформация, при которой увеличивается (уменьшается) размер тела	Деформация растяжения: тросы, канаты, подвески, струны музыкальных инструментов Деформация сжатия: фундаменты зданий, колонны, сваи, стены, межпозвонковые диски
Сдвиг	Деформация, при которой происходит смещение слоёв тела относительно друг друга	Заклёпки и болты, соединяющие металлические конструкции. Резание бумаги, картона, листового железа
Кручение	Деформация, при которой точки тела смещаются в противоположные стороны	Завинчивание гаек, болтов, работа сверла, валов машин
Изгиб	Деформация, при которой разные части тела одновременно испытывают деформацию сжатия и растяжения	Балки, мосты, крылья самолёта, лопасти пропеллера вертолёта, рессоры автомобиля

Упругие свойства твёрдых тел

Деформация растяжения (сжатия) характеризуется следующими величинами:

1. Абсолютное удлинение Δl , м $\Delta l = l - l_0$
2. Относительное удлинение $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$

3. Механическое напряжение – это сила упругости, приходящаяся на единицу площади сечения

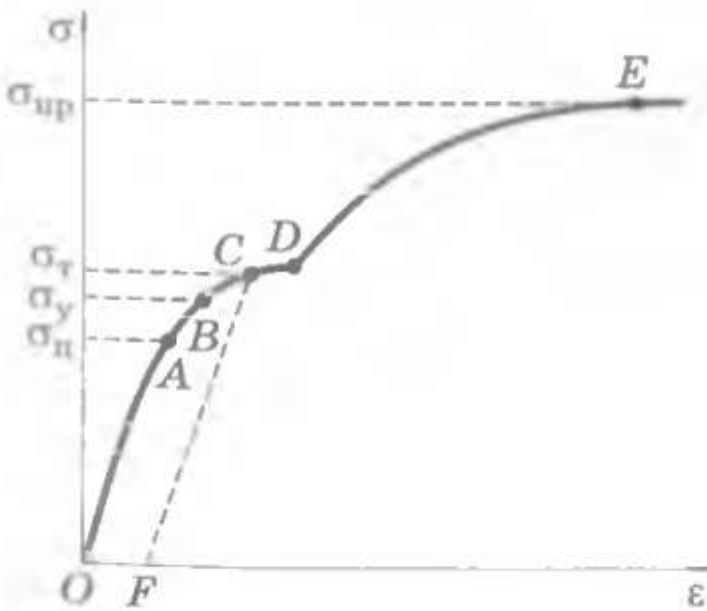
$$\sigma = \frac{F}{S} \quad \sigma \text{ [Па]}$$

Закон Гука: при малых деформациях механическое напряжение прямо пропорционально относительному удлинению:

$$\sigma = E|\varepsilon|$$

Здесь E – коэффициент пропорциональности - **модуль упругости (Модуль Юнга)**, который характеризует механические свойства материала. Его значение найдём в справочной таблице..

Механические свойства твёрдых тел



Линейная зависимость $\sigma(\varepsilon)$ закон Гука — выполняется лишь в очень узких пределах до предела пропорциональности σ_p . При дальнейшем увеличении напряжения деформация еще упругая (хотя зависимость $\sigma(\varepsilon)$ уже не линейная) и до предела упругости σ_y остаточные деформации не возникают. За пределом упругости в теле возникают остаточные деформации, и линия описывающая возвращение тела в первоначальное состояние после прекращения действия силы, будет соответствовать не

кривой CO, а прямой CF. Напряжение, при котором появляется заметная остаточная деформация (0,2 %), называют пределом текучести σ_T — точка C на кривой. В области CD деформация возрастает без увеличения напряжения, т.е. тело как бы течет. Эту область называют областью текучести (или областью пластических деформаций). Материалы, для которых область текучести значительна, называют вязкими, а для которых она практически отсутствует, — хрупкими. При дальнейшем растяжении (за точку D) происходит разрушение тела. Максимальное напряжение, возникающее в теле до разрушения, называют пределом прочности $\sigma_{пр}$.

Максимальное напряжение, при котором ещё не возникает остаточной деформации, называется **пределом упругости**. (A). При напряжениях, превышающем предел упругости, возникает остаточная деформация. (AB)

Наибольшее напряжение, которое может выдержать образец без разрушения, называется **пределом прочности**. (E)

При конструировании машин, механизмов, мостов, зданий и сооружений необходимо учитывать запас прочности — это отношение предела пропорциональности данного материала к максимальному напряжению, которое будет испытывать образец. Коэффициент безопасности обычно выбирают в пределах от 2 до 10

Пластичность материала.

Предел прочности многих материалов значительно больше предела упругости. Такие материалы называются **вязкими**. Они обладают и упругой, и пластической деформациями. К ним относятся медь, цинк, железо и др.

Материалы, у которых отсутствует область упругих деформации, относятся к **пластическим**, например воск, глина, пластилин.

Хрупкость материала.

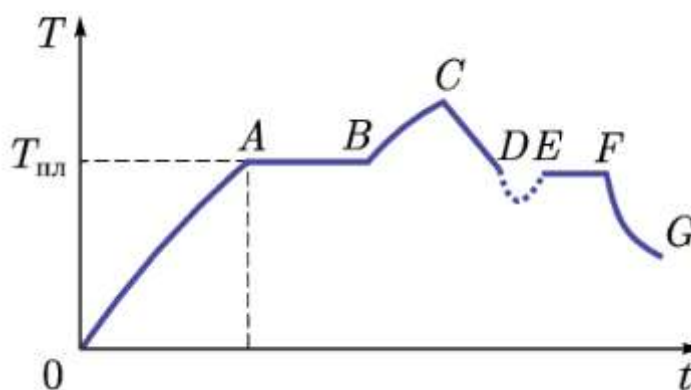
Кроме прочности в технике материалы различают по их **твердости**. Из двух материалов тот считается более твердым, который царапает другой. Резцы и сверла для резания металлов должны, очевидно, обладать большей твердостью, чем обрабатываемый материал. В современной технике для

резцов и сверл употребляют сверхтвердые сплавы. Из природных материалов наибольшей твердостью отличается алмаз.

Большое значение на практике имеет свойство твердых тел, называемое *хрупкостью*. Изделие называют хрупким, если оно разрушается при небольших деформациях. Например, изделия из стекла, фарфора — хрупкие. Чугун, мрамор, янтарь обладают повышенной хрупкостью, а сталь, медь, свинец не являются хрупкими. У хрупких материалов предел упругости и предел прочности почти одинаковы. Пластичные свойства у хрупких материалов практически не проявляются.

Плавление и кристаллизация

При нагревании твердого тела кинетическая энергия атомов (или молекул) возрастает. При этом амплитуды колебаний могут стать настолько большими, что уже будут сравнимы с периодом решетки, произойдет нарушение дальнего порядка, кристаллическая решетка начнет разрушаться. При дальнейшем увеличении температуры происходит *плавление твердых тел*, т. е. *переход вещества из твердого состояния в жидкое*. Этот процесс изотермический. При плавлении температура тела остается постоянной. Вся подводимая извне теплота идет на разрушение кристалла. После разрушения кристалла и образования жидкости подводимая извне теплота идет на нагревание жидкости. Диаграмма плавления кристаллического тела изображена на рисунке



При плавлении кристаллическое тело находится одновременно и в твердом, и в жидком состояниях. Температура плавления зависит от рода кристаллического тела. Для большинства кристаллических тел она повышается при увеличении атмосферного давления.

Отношение количества теплоты Q , необходимого для того, чтобы перевести твердое тело в жидкость при температуре плавления, к массе этого тела называют *удельной теплотой плавления*:

$$\lambda = Q/m.$$

В СИ удельная теплота плавления выражается в джоулях на килограмм (Дж/кг)

$$Q = \lambda m.$$

Вопросы для самоконтроля и повторения:

1. Что называется испарением? конденсацией?
2. От каких условий зависит скорость испарения жидкости?
3. Как объяснить испарение с точки зрения молекулярно-кинетической теории?
4. Приведите примеры насыщенных и ненасыщенных паров.
5. Объясните независимость давления насыщенного пара при постоянной температуре от объема.
6. Что такое абсолютная влажность воздуха? относительная влажность воздуха?
7. Объясните термин «точка росы».
8. Какой процесс называют кипением? Какова зависимость температуры кипения от давления.
9. От чего зависит поверхностное натяжение?
10. Какие явления можно наблюдать на границе жидкости с твердым телом.

11. Почему уровень однородной жидкости в различных капиллярных трубках сообщающихся сосудов различный?
12. Запишите формулу, по которой определяется высота поднятия (опускания) жидкости по капилляру.
13. На какие две группы можно разделить твердые тела?
14. Какие тела называют анизотропными, какие — изотропными?
15. Какие виды деформаций вы знаете?
16. Объясните причину возникновения упругих сил при деформации.
17. Сформулируйте закон Гука.
18. Дайте определение понятий упругости, прочности, пластичности
19. Объясните процесс плавления с точки зрения молекулярно-кинетической теории.
20. Как зависит температура плавления от давления?
21. Что называют удельной теплотой плавления?

Лекция 13

Предмет и задачи электродинамики.

Электродинамика – это раздел физики, изучающий электромагнитные взаимодействия

Электромагнитным взаимодействием называют силы особой, негравитационной (не зависящей от массы тел) природы, возникающие между некоторыми телами.

Тела, на которые действуют электромагнитные силы, называют заряженными или имеющими электрический заряд.

Силы, действующими между зарядами, неподвижными относительно выбранной инерциальной системы отсчета, называют электростатическими.

Электростатика – это раздел электродинамики, в котором рассматриваются свойства и взаимодействия неподвижных в инерциальной системе отсчета электрически заряженных тел и частиц, обладающих электрическими зарядами

Закон сохранения электрического заряда

Электрический заряд – это физическая величина и свойство тел и частиц вступать электромагнитные взаимодействия

В природе существуют электрические заряды двух разных видов, которые было предложено называть соответственно положительными и отрицательными

Положительно заряженными произвольно называли заряды, подобные тем, что возникают на стекле, потертом о шелк; отрицательно – на янтаре (эбоните, сургуче), потертом о шерсть

Электрический заряд неотделим от частицы, которой принадлежит.

Наименьшим (элементарным) равным зарядом обладают частицы электрон и протон.

Заряд протонов положителен, а заряд электронов отрицателен

Элементарными носителями являются протон

$$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$q_p = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Элементарными носителями являются электрон

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Электрический заряд обычно обозначается буквами q или Q . В системе СИ электрический заряд измеряется в Кулонах (Кл).

Один кулон (1 Кл) – это заряд, проходящий за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока 1А

Свободный заряд в 1 Кл – это гигантская величина заряда, практически не встречающаяся в природе. Как правило, Вам придется иметь дело с микрокулонами ($1 \text{ мкКл} = 10^{-6} \text{ Кл}$), нанокулонами ($1 \text{ нКл} = 10^{-9} \text{ Кл}$) и пикокулонами ($1 \text{ пКл} = 10^{-12} \text{ Кл}$).

Электрическому заряду частицы присущи следующие фундаментальные свойства:

1) существует элементарный (минимальный) электрический заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ (кулон (Кл) – единица электрического заряда в системе СИ).

2) электрический заряд существует в двух видах – положительный (носитель элементарного положительного заряда – протон, его масса $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$) и отрицательный (носитель элементарного отрицательного заряда – электрон, его масса $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$).

3) одноименные заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются.

4) электрический заряд является релятивистским инвариантом – его величина не зависит от системы отсчета, а, значит, не зависит от скорости заряженной частицы.

5) электрический заряд дискретен – заряд любого тела составляет целое кратное от элементарного электрического заряда e .

6) электрический заряд аддитивен – заряд любой системы тел (частиц) равен сумме зарядов тел (частиц), входящих в систему).

7) электрический заряд подчиняется закону сохранения заряда: *алгебраическая сумма электрических зарядов любой электрически изолированной системы остается неизменной, какие бы процессы ни происходили внутри данной системы.*

Электрические заряды не создаются и не исчезают, а только передаются

от одного тела к другому или перераспределяются внутри данного *тела*

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

Под электрически изолированной системой в данном случае понимают систему, которая не обменивается зарядами с внешними телами.

Закон сохранения электрического заряда утверждает, что в замкнутой системе тел не могут наблюдаться процессы рождения или исчезновения зарядов только одного знака. Из закона сохранения заряда так же следует, если два тела одного размера и формы, обладающие зарядами q_1 и q_2 (совершенно не важно какого знака заряды), привести в соприкосновение, а затем обратно развести, то заряд каждого из тел станет равным:

$$q' = \frac{q_1 + q_2}{2}$$

При электризации тел происходит перераспределение зарядов между телами

Электризация (процесс заряджения) какого-либо тела представляет собой либо перенос на это тело, либо увод с него некоторого количества электронов или ионов.

Тело считается **наэлектризованным**, если на нем создан избыток положительных или отрицательных зарядов.

Очевидно, что при электризации тел ядерных реакций не происходит. Поэтому в любых электрических явлениях число протонов не меняется, изменяется только число электронов. Так, сообщение телу отрицательного заряда означает передачу ему лишних электронов. А сообщение положительного заряда, вопреки частой ошибке, означает не добавление

протонов, а отнимание электронов. Заряд может передаваться от одного тела к другому только порциями, содержащими целое число электронов.

Закон Кулона

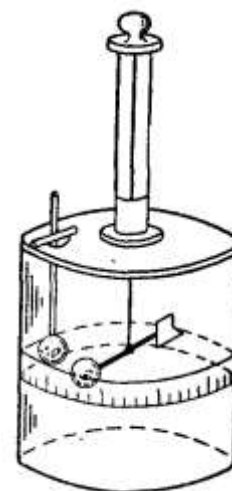
Начало количественного изучения электрических явлений относится к концу XVIII века, когда Кулон установил на опыте закон взаимодействия электрических зарядов.

Для заряженных тел произвольных размеров такой закон в общей форме дать нельзя, так как сила взаимодействия протяженных тел зависит от их формы и взаимного расположения. Однако форма тел и их взаимная ориентировка перестают сказываться, если размеры тел весьма малы по сравнению с расстоянием между ними. ***Поэтому закон взаимодействия, имеющий общее значение, можно установить только для точечных зарядов.***

Так как электрические заряды всегда распределены в объеме, то никаких конечных зарядов в математической точке, разумеется, быть не может. ***Под точечным зарядом в физике всегда понимают протяженное заряженное тело, размеры которого весьма малы по сравнению с расстоянием от других зарядов.***

Точечным зарядом называют заряженное тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.

Ш. Кулон проводил эксперименты с помощью крутильных весов. По углу закручивания упругой нити он измерял силу отталкивания одноименно заряженных шариков, а по шкале прибора – расстояние между ними. В результате этих опытов Кулон заключил, что сила взаимодействия двух точечных зарядов направлена вдоль линии, соединяющей оба заряда, и обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядами:



$$F \sim \frac{1}{r^2}.$$

Никаких способов измерения величины электрических зарядов в то время еще не было. Однако это не помешало Кулону найти вид зависимости силы F от q_1 и q_2 . Он использовал следующий факт: если заряженный проводящий шарик привести в соприкосновение с точно таким же незаряженным шариком, то заряд первого равномерно распределится между обоими шариками. Иными словами, заряд каждого из них будет вдвое меньше исходного. Точно так же можно уменьшить заряд шарика в четыре, восемь раз и т. д. Таким образом, не зная абсолютных значений зарядов q_1 и q_2 , их можно уменьшать в известное число раз.

Опыты, поставленные Кулоном, показали, что при постоянных r и q_1 сила взаимодействия F между заряженными шариками изменяется пропорционально величине заряда q_2 второго шарика, а при постоянных r и q_2 — пропорционально величине заряда q_1 первого шарика. Этим было доказано, что сила F пропорциональна произведению $q_1 q_2$.

Т. о., сила взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме равна

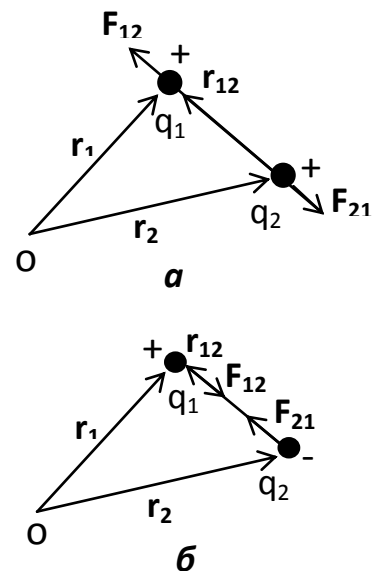
$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Здесь k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц заряда, расстояния и силы.

Закон Кулона в системе единиц СИ записывают в виде

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где вместо коэффициента пропорциональности k , написано $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/(Н·м²) — электрическая постоянная.



Для того чтобы выразить не только модуль силы, но и ее направление, закон Кулона можно представить в векторной форме:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^3} \vec{r}_{12},$$

где \vec{F}_{12} — вектор силы, действующей на заряд 1 со стороны заряда 2, а \vec{r}_{12} — радиус-вектор, направленный от заряда 2 к заряду 1 (рис. а и б).

Соответственно сила \vec{F}_{21} , действующая на заряд 2 со стороны заряда 1, равна

$$\vec{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{21}^3} \vec{r}_{21},$$

где $\vec{r}_{21} = -\vec{r}_{12}$ - радиус-вектор, направленный от заряда 1 к заряду 2.

По закону Кулона:

Одноименные заряды отталкиваются (сила отталкивания положительная);

Разноименные заряды притягиваются (сила притяжения отрицательная)

Если взаимодействие происходит не в вакууме, то закон Кулона имеет вид:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{\epsilon r_{12}^3} \vec{r}_{12},$$

где ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Еще раз отметим, что закон Кулона справедлив только для взаимодействия точечных электрических зарядов, т.е. таких заряженных тел, линейными размерами которых можно пренебречь по сравнению с расстоянием между ними. Кроме того, он выражает силу взаимодействия между неподвижными зарядами, т.е. это закон электростатический. Закон Кулона можно сформулировать следующим образом: сила электростатического взаимодействия между двумя точечными электрическими зарядами пропорциональна произведению

величин зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена вдоль соединяющей их прямой так, что одноименные заряды притягиваются, а разноименные отталкиваются.

Всякое заряженное тело можно рассматривать как совокупность точечных зарядов аналогично тому, как в механике всякое тело можно считать совокупностью материальных точек. Поэтому электростатическая сила, с которой одно заряженное тело действует на другое, равна векторной сумме сил, приложенных ко всем точечным зарядам второго тела со стороны каждого точечного заряда первого тела.

Расчеты показывают, что закон Кулона справедлив также и для взаимодействия заряженных тел шарообразной формы, если заряды q_1 и q_2 распределены равномерно по всему объему или по всей поверхности этих тел. При этом радиусы тел могут быть соизмеримы с расстоянием r между их центрами.

Кулон изучал взаимодействие между зарядами, находящимися в воздухе. Дальнейшие экспериментальные исследования показали, что при прочих равных условиях сила электростатического взаимодействия между двумя точечными зарядами зависит от свойств среды, в которой эти заряды находятся, и имеет вид:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{\epsilon r_{12}^3} \vec{r}_{12},$$

где ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Опыты Кулона не являются единственным доказательством справедливости закона обратных квадратов. В настоящее время имеется большое количество других экспериментальных данных, показывающих, что закон Кулона выполняется очень точно и притом как для очень больших, так и для очень малых расстояний. В частности, исследования атомных явлений позволяют заключить, что он справедлив, по крайней мере, вплоть до расстояний порядка 10^{-15} м.

Вопросы для самоконтроля и повторения:

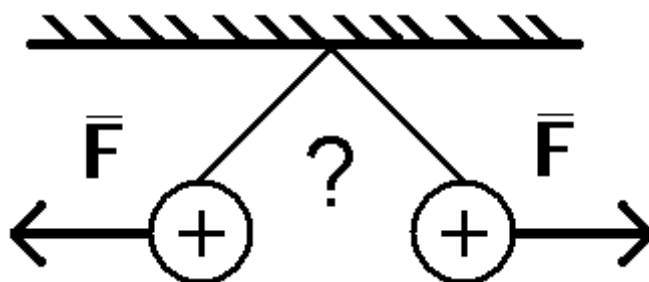
1. Какое взаимодействие называют электромагнитным?
2. Что изучает электростатика?
3. Что представляет собой электрический заряд?
4. Перечислите свойства электрического заряда.
5. Сформулируйте закон сохранения зарядов.
6. Как называется единица электрического заряда?
7. Чему равно значение элементарного заряда?
8. Опишите модель точечного заряда.
9. Сформулируйте и напишите закон Кулона в системе СИ.
10. Что такое электрическая постоянная и чему она равна в СИ?
11. Как влияет диэлектрическая среда на взаимодействие помещенных в нее двух точечных зарядов?

Лекция 14

Электрическое поле, его силовая характеристика. Принцип суперпозиции полей.

Электрическое поле и его свойства.

Почему и как заряды взаимодействуют?



Теория действия на расстоянии - взаимодействие между заряженными телами, передается мгновенно на любые расстояния через пустоту. (Кулон)

Теория близкодействия - определяет взаимодействие между заряженными телами с помощью промежуточной среды (**посредством электрического поля** - Фарадей, Максвелл).

Победила ТЕОРИЯ БЛИЗКОДЕЙСТВИЯ !!

По современным представлениям, электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждое заряженное тело создает в окружающем пространстве **электрическое поле**. Это поле оказывает силовое действие на другие заряженные тела. Главное свойство электрического поля – действие на электрические заряды с некоторой силой. Таким образом, взаимодействие заряженных тел осуществляется не непосредственным их воздействием друг на друга, а через электрические поля, окружающие заряженные тела.

Свойства.

1. Электрическое поле реально, материально, существует независимо от нас и наших знаний о нем.

2. Источником электрического поля являются заряды. Поле неподвижных зарядов называется электростатическим.

3. Электростатическое поле с силой \vec{F} действует на заряды и приводит их в движение.

4. Электростатическое поле пронизывает различные диэлектрические среды, но отражается от металла.

5. В воздухе и вакууме распространяется со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с

Напряженность электрического поля

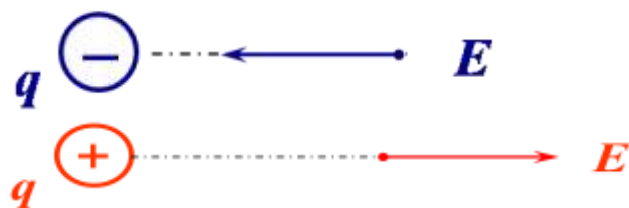
Электрическое поле, окружающее заряженное тело, можно исследовать с помощью так называемого **пробного заряда** – небольшого по величине точечного заряда, который не вносит заметного перераспределения исследуемых зарядов.

Для количественного определения электрического поля вводится силовая характеристика - **напряженность электрического поля E** .

Напряженностью электрического поля называют физическую величину, равную отношению силы, с которой поле действует на пробный заряд, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad \boxed{\vec{F} = q\vec{E}}$$

Напряженность электрического поля – векторная физическая величина. Направление вектора напряженности совпадает в каждой точке пространства с направлением силы, действующей на положительный пробный заряд.



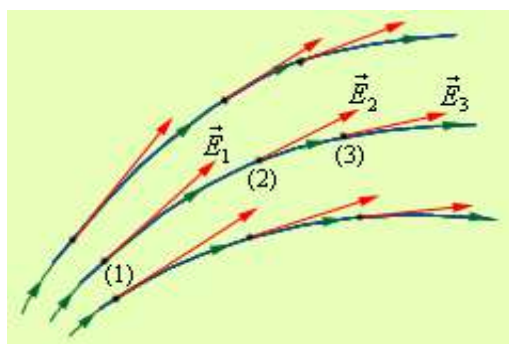
Напряженность E пропорциональна величине заряда q . По мере удаления от заряда поле ослабевает $\sim 1/r^2$.

$$|\vec{E}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{r^2}$$

Электрическое поле неподвижных и не меняющихся со временем зарядов называется электростатическим.

Графическое изображение электрических полей

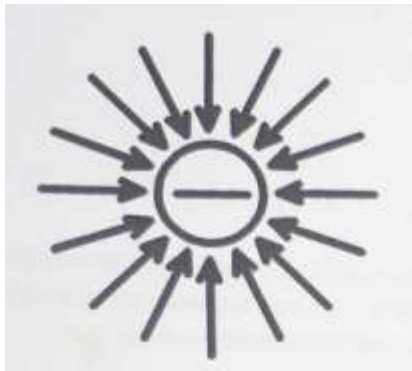
Для наглядного представления электрического поля используют **силовые линии**. Эти линии проводятся так, чтобы направление вектора напряженности в каждой точке совпадало с направлением касательной к силовой линии.



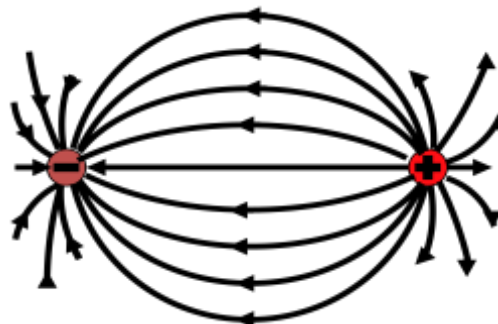
Силовые линии обладают следующими свойствами.

- Силовые линии электростатического поля никогда не пересекаются.
- Силовые линии электростатического поля всегда направлены от положительных зарядов к отрицательным.
- При изображении электрического поля с помощью силовых линий их густота должна быть пропорциональна модулю вектора напряженности поля.
- Силовые линии начинаются на положительном заряде или бесконечности, а заканчиваются на отрицательном или бесконечности. Густота линий тем больше, чем больше напряжённость.

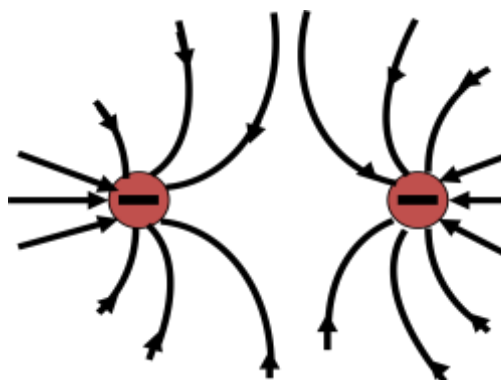
- В данной точке пространства может проходить только одна силовая линия, т.к. напряжённость электрического поля в данной точке пространства задаётся однозначно.



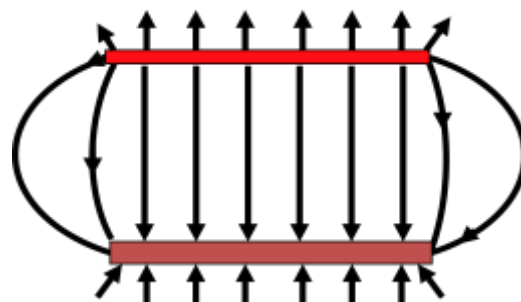
Силовые линии отрицательного заряда.



Силовые линии разноимённых зарядов.



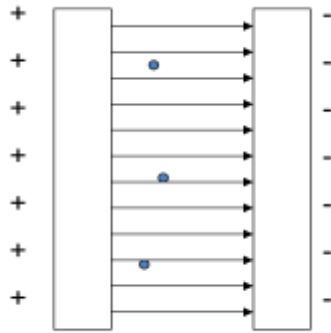
Силовые линии одноимённых зарядов.



Силовые линии параллельных разноимённых пластин.

Электрическое поле называют однородным, если вектор напряжённости одинаков во всех точках поля. Например, однородное поле создаёт плоский конденсатор – две пластины, заряженные равным по величине и противоположным по знаку зарядом, разделённые слоем диэлектрика, причём расстояние между пластинами много меньше размеров пластин.

Однородное поле изображается системой параллельных силовых линий



$$E_A = E_B = E_C$$

одинаковой густоты

Во всех точках однородного поля на заряд q , внесённый в однородное поле с напряжённостью E , действует одинаковая по величине и направлению сила, равная $F = Eq$. Причём, если заряд q положительный, то направление силы совпадает с направлением вектора напряжённости, а если заряд отрицательный, то вектора силы и напряжённости противоположно направлены.

Силовые линии не следует отождествлять с траекторией движения в электростатическом поле очень легких заряженных частиц, так как по касательной к силовой линии направлена не скорость частицы (как у траектории), а сила, действующая на частицу, т.е. ее ускорение, которые вовсе не всегда совпадают даже для однородного поля.

Принцип суперпозиции

Основной задачей электростатики является нахождение напряженности \vec{E} электрического поля по известному распределению в пространстве электрических зарядов. Эта задача может быть решена на основе принципа суперпозиции электрических полей (принципа независимости действия электрических полей).

Рассмотрим электрическое поле двух точечных зарядов q_1 и q_2 . Пусть \vec{E}_1 – напряженность поля в точке a , создаваемая зарядом q_1 (когда заряда q_2 нет вовсе), а \vec{E}_2 – напряженность поля заряда q_2 (когда нет заряда q_1). Опыт показывает, что напряженность \vec{E} результирующего поля (при наличии

обоих зарядов) может быть найдена по правилу сложения векторов (по правилу параллелограмма). Или, иначе, напряженность результирующего электрического поля есть векторная сумма напряженностей полей, создаваемых отдельными зарядами.

Правило векторного сложения электрических полей справедливо не только для двух, но и для какого угодно числа зарядов.

Если в данной точке пространства различные заряды создают различные электрические поля с напряженностями соответственно E_1 , E_2 и т.д., то результирующая напряженность поля в этой точке равна геометрической сумме всех напряженностей.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$

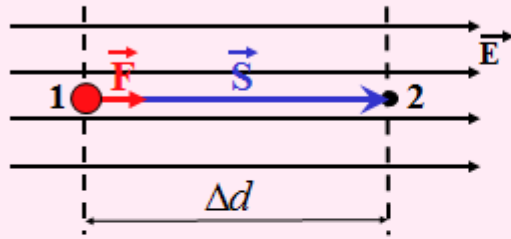
Итак, если в задаче требуется определить напряженность поля системы зарядов, то надо действовать по следующему **алгоритму**:

1. Нарисовать рисунок.
2. Изобразить напряженность поля каждого заряда по отдельности в нужной точке. Помните, что напряженность направлена к отрицательному заряду и от положительного заряда.
3. Вычислить каждую из напряженностей по соответствующей формуле.
4. Сложить вектора напряженностей геометрически (т.е. векторно).

Работа электрического поля по перемещению зарядов

Вычислим работу однородного электрического поля по перемещению положительного заряда из одной точки поля в другую.

Работа эл. поля по перемещению эл. заряда



$$A = F \cdot S \cdot \cos \alpha$$

$$F = E \cdot q$$

$$S = \Delta d$$

$$\cos \alpha = 0$$

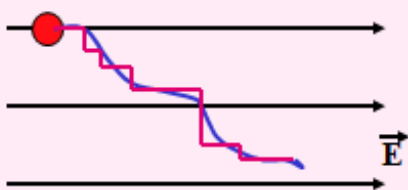
$$A = Eq\Delta d$$

Работа однородного электростатического поля по перемещению электрического заряда.

При любом выборе начальной и конечной точек работа не зависит от формы пути, а определяется только положениями этих точек.

Работа эл. поля по перемещению эл. заряда

Работа эл. поля не зависит от траектории движения заряда, а только от начального и конечного положения заряда.



$$A = A_{гор} + A_{верт}$$

$$A = F \cdot S \cdot \cos \alpha$$

$$A_{верт} = Eqh \cdot 0$$

$$A_{верт} = 0$$

$$A_{гор} = Eq \cdot (d_1 + d_2 + \dots + d_n) \cdot 1$$

$$A = Eq\Delta d$$

$$A_{гор} = Eq\Delta d \quad \Delta d = d_1 + d_2 + \dots + d_n$$

Силовые поля, удовлетворяющие такому условию, называются потенциальными или консервативными. Следовательно, электростатическое поле есть поле потенциальное.

Работа электростатического поля по перемещению заряда

\vec{F} , действующая на заряд, перемещает его, совершая работу:

$$A = |\vec{F}| |\vec{s}| \cos \alpha$$

$$|\vec{F}| = q \cdot |\vec{E}| = qE$$

$$|\vec{s}| = d_1 - d_2$$

$$\cos \alpha = 1$$

\Rightarrow Π -потенциальная энергия заряда в электростатическом поле

$$A = qE(d_1 - d_2) = qEd_1 - qEd_2 = - (qEd_2 - qEd_1) =$$

$$= -(\Pi_2 - \Pi_1) = -\Delta\Pi$$

- работа поля равна изменению потенциальной энергии заряда, взятому с противоположным знаком

Работа поля равна изменению потенциальной энергии заряда взятому с противоположенным знаком.

Электрический заряд q перемещается по замкнутой траектории 1-2-3-4-1 как показано на рисунке в однородном электростатическом поле. Определите работу поля при данном перемещении заряда.

$$A = A_{1,2} + A_{2,3} + A_{3,4} + A_{4,1}$$

$$A_{1,2} = Fs_{1,2} \cos \alpha = qEs_{1,2}$$

$$A_{2,3} = Fs_{2,3} \cos \alpha = 0$$

$$A_{3,4} = Fs_{3,4} \cos \alpha = -qEs_{3,4}$$

$$A_{4,1} = Fs_{4,1} \cos \alpha = 0$$

$$A = A_{1,2} + A_{2,3} + A_{3,4} + A_{4,1} = qEs_{1,2} + 0 + (-qEs_{3,4}) + 0 = 0$$

- работа поля не зависит от формы траектории и на замкнутой траектории равна нулю

I. Работа положительна $A > 0$, если положительный заряд перемещается от «+» к «-».

II. Работа отрицательна $A < 0$, если положительный заряд перемещается от «-» к «+».

III. Работа равна $A = 0$, если заряд перемещается перпендикулярно силовым линиям.

IV. Работа равна $A = 0$, если заряд перемещается по замкнутой траектории.

Потенциал. Разность потенциалов. Напряжение

Электростатическое поле обладает важным свойством: **работа сил электростатического поля при перемещении заряда из одной точки поля в другую не зависит от формы траектории, а определяется только положением начальной и конечной точек и величиной заряда.**

Следствием независимости работы от формы траектории является следующее утверждение: работа сил электростатического поля при перемещении заряда по любой замкнутой траектории равна нулю.

Свойство потенциальности (независимости работы от формы траектории) электростатического поля позволяет ввести понятие потенциальной энергии заряда в электрическом поле.

В любой точке поля потенциальная энергия Π заряда численно равна работе, которую необходимо затратить для перемещения заряда в эту точку.

$$\Pi = qEd$$

Отношение потенциальной энергии Π заряда q , помещенного в данную точку поля, к величине этого заряда не зависит от его значения, и, следовательно, является энергетической характеристикой электростатического поля, названной потенциалом:

$$\varphi = \frac{W}{q} \quad \varphi = \int dE$$

Потенциал электростатического поля является величиной скалярной и определяет потенциальную энергию единичного положительного пробного заряда в данной точке поля.

Потенциал φ является энергетической характеристикой электростатического поля. В Международной системе единиц (СИ) единицей потенциала (а значит и разности потенциалов, т.е. напряжения) является вольт [В].

$$\left[\frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}} = 1 \text{ В} \right]$$

Во многих задачах электростатики при вычислении потенциалов за опорную точку, где значения потенциальной энергии и потенциала обращаются в ноль, удобно принять бесконечно удаленную точку. В этом случае понятие потенциала может быть определено следующим образом: *потенциал поля в данной точке пространства равен работе, которую совершают электрические силы при удалении единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность.*

Вспомнив формулу для потенциальной энергии взаимодействия двух точечных зарядов и разделив ее на величину одного из зарядов в соответствии с определением потенциала получим, что **потенциал φ поля точечного заряда Q** на расстоянии r от него относительно бесконечно удаленной точки вычисляется следующим образом:

$$\varphi = \frac{kQ}{\epsilon r}$$

Потенциал рассчитанный по этой формуле может быть положительным и отрицательным в зависимости от знака заряда создавшего его. Эта же формула выражает потенциал поля однородно заряженного шара (или сферы) при $r \geq R$ (снаружи от шара или сферы), где R – радиус шара, а расстояние r отсчитывается от центра шара.

Принцип суперпозиции для потенциалов

Если поле создано несколькими зарядами то для них выполняется принцип суперпозиции потенциалов

Потенциал результирующего поля в данной точке пространства равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых в этой точке отдельными зарядами.

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n$$

Величина потенциала считается относительно выбранного нулевого уровня.

Эквипотенциальная поверхность

Для наглядного представления электрического поля наряду с силовыми линиями используют **эквипотенциальные поверхности**. Поверхность, во всех точках которой потенциал электрического поля имеет одинаковые значения, называется эквипотенциальной поверхностью или поверхностью равного потенциала.

Силовые линии электрического поля всегда перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

Эквипотенциальные поверхности кулоновского поля точечного заряда – концентрические сферы.

Силовые линии направлены в сторону убывания потенциала.



Разность потенциалов

Но! Практическое значение имеет не сам потенциал, а разность потенциалов, которую в быту называют «напряжением».

Разность потенциалов

$$A = qEd_1 - qEd_2 = q(Ed_1 - Ed_2) = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Разность потенциалов между точками 1 и 2 равна отношению работы поля при перемещении заряда из точки 1 в точку 2 к величине этого заряда:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}$$

Разность потенциалов называют напряжением и обозначают U :

$$U = \frac{A}{q} \quad \left[1B = \frac{1Дж}{1Кл} \right]$$

Если разность потенциалов равна 1 В, то при перемещении заряда в 1 Кл из одной точки в другую электрическое поле совершает работу 1 Дж.

В однородном электрическом поле существует связь между напряженностью поля и напряжением:

Связь между напряжением и напряженностью

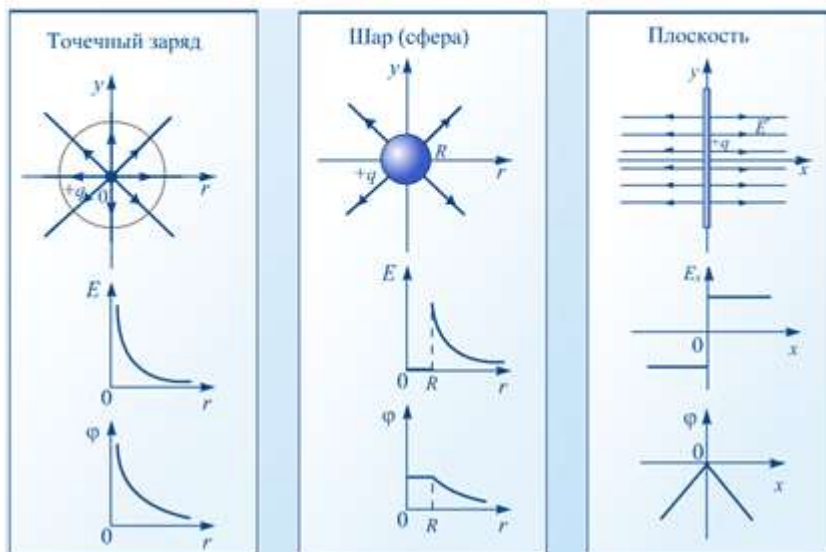
$$U = \frac{A}{q} = \frac{qEd}{q} = Ed$$

Соотношение между напряженностью и напряжением:

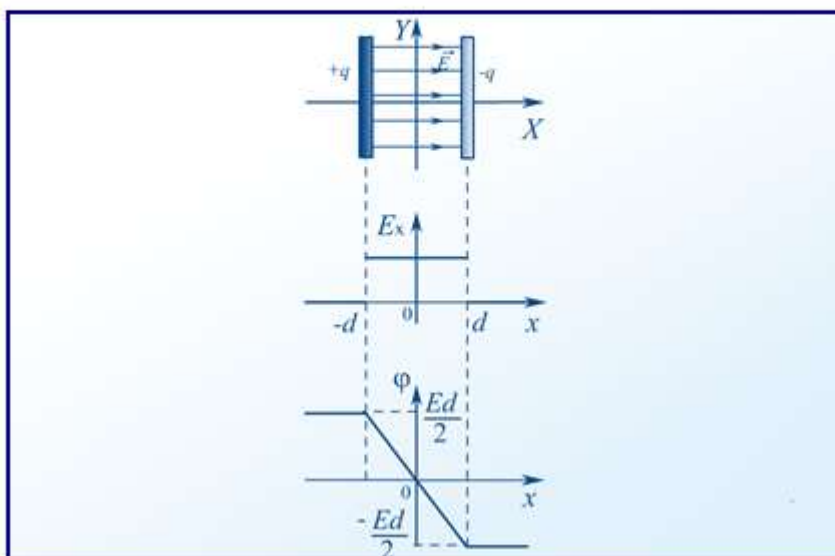
$$E = \frac{U}{d} \quad \left[1 \frac{В}{Кл} = 1 \frac{В}{м} \right]$$

Напряженность поля направлена в сторону убывания потенциала.

Напряженность и потенциал точечного заряда, сферы и плоскости



Напряженность и потенциал плоского конденсатора



Вопросы для самоконтроля и повторения:

1. Каково определение напряженности электрического поля и какова формула для ее расчета?
2. Для расчета напряженности существует две формулы:

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

$$E = k \frac{q}{\epsilon r^2}$$

- а) какая из них векторная, а какая – скалярная?
- б) Назовите физические величины, входящие в эти формулы, и их размерности.
3. Зарисуйте вектор напряжённости в точке электрического поля, если заряд:
- а) положительный
- б) отрицательный
4. В чем состоит принцип суперпозиции?
5. Зарисуйте результирующий вектор напряженности \mathbf{E} в точке А, созданный двумя точечными зарядами q_1 и q_2 .
6. Что называют силовыми линиями электрического поля?
7. Зарисуйте силовые линии (линии напряженности):
- а) Положительно заряженного шарика
- б) Отрицательно заряженного шарика
- в) Двух разноименно заряженных шариков
- г) Двух одноименно заряженных шариков
- д) Двух пластин, заряды которых равны по модулю и противоположны по знаку
8. Какое электрическое поле считается однородным, а какое – неоднородным?
9. Запишите формулу для расчета работы электрического поля из одной точки поля, в другую и назовите физические величины, входящие в формулу, и их размерности.
10. Чему равна работа по перемещению заряда по замкнутому контуру?
11. Чему равна потенциальная энергия заряженной частицы в однородном электрическом поле? Запишите формулу и единицы измерения.

12. Что характеризует физическая величина, называемая потенциалом?
13. Дайте определение потенциала.
14. Какова формула для расчёта потенциала? Какие величины она связывает? Назовите единицы их измерения.
15. Почему справедливо утверждение: «Потенциал -энергетическая характеристика электрического поля»?
16. Почему практическое значение имеет не сам потенциал в точке, а изменения потенциала?
17. Чему равно разность потенциалов(напряжение)между двумя точками поля? Запишите формулу и назовите единицы измерения параметров.
18. Как связана разность потенциалов с напряженностью электрического поля? Запишите формулу.
19. Что понимают под эквивалентной поверхностью?
20. Что представляют собой эквиповерхности однородного поля и поля точечного заряда?

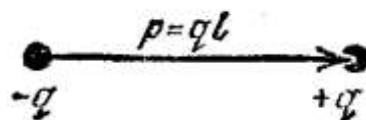
Лекция 15.

Проводники и диэлектрики в электрическом поле. Конденсаторы, их виды, способы соединения.

Диэлектрики в электрическом поле

Диэлектрики – это вещества, не содержащие свободных заряженных частиц (т. е. таких заряженных частиц, которые способны свободно перемещаться по всему объему тела). Существует два основных вида диэлектриков: неполярные и полярные, а так же кристаллические, слабополярные, диэлектрики характеризующиеся ионной структурой. (NaCl, KCl и т.д.)

Прежде, чем мы объясним разницу между ними, дадим одно определение: совокупность равных по величине, но противоположных по знаку двух точечных зарядов $-q$ и $+q$, сдвинутых друг относительно друга на некоторое расстояние l , называется электрическим диполем. Пусть \vec{l} – радиус-вектор, проведенный от отрицательного заряда к положительному. Вектор $\vec{p} = q\vec{l}$ называется электрическим моментом диполя или дипольным моментом.



При отсутствии поля

У молекулы неполярного диэлектрика (эбонит, янтарь) при отсутствии внешнего электрического поля центр тяжести отрицательных зарядов внутри молекулы совпадает с центром тяжести положительных зарядов внутри молекулы. Такая молекула не обладает дипольным моментом и называется неполярной.

Молекула полярного диэлектрика и при отсутствии внешнего электрического поля обладает дипольным моментом и называется полярной. У полярных диэлектриков (вода, спирт, твердый сероводород H₂S) при отсутствии внешнего поля, благодаря тепловому движению, моменты молекул ориентированы хаотично и суммарный дипольный момент равен 0.

При наличии внешнего электрического поля диполи **полярных** диэлектриков частично повернутся по полю, сумма моментов $\sum_i \vec{p}_i$ станет отличной от нуля и тем более отличной, чем сильнее поле. Диэлектрик с ориентированными в той или иной степени дипольными моментами окажется поляризованным.

Поляризация – возникновение суммарного, отличного от нуля, дипольного момента молекул диэлектрика при внесении его в электростатическое поле.

У **неполярных** диэлектриков первоначально молекулы не обладают дипольным моментом (неполярные молекулы), но под влиянием внешнего электрического поля заряды в них смещаются, и у них появляются дипольные моменты \vec{p}_i . И в этом случае сумму моментов можно считать пропорциональной напряженности поля, т. к. $\sum_i \vec{p}_i$ будет возрастать по двум причинам: благодаря увеличению моментов молекул \vec{p}_i и благодаря их ориентации. Таким образом, последнее соотношение справедливо для молекул любого типа.

Описание поля в диэлектриках

Если диэлектрик помещают в электрическом поле, то любой элемент его объема ΔV , содержащий достаточно большое число молекул, остается нейтральным. Не так обстоит дело в тонком слое у поверхности диэлектрика. Благодаря повороту молекул у той границы, где входят линии напряженности, получится избыток отрицательных концов молекул, а у той границы, где линии напряженности выходят, – избыток положительных концов молекул.

Поверхностные заряды, возникающие при поляризации диэлектрика, носят название связанных. Все прочие заряды (не обусловленные явлением поляризации) носят название свободных.

Связанные заряды появляются только при наличии в диэлектрике электрического поля. Таким образом, первичным источником поля всегда являются свободные заряды.

Однако при наличии в поле куска диэлектрика на первичное поле, вызванное свободными зарядами, налагается еще добавочное поле связанных зарядов. Это добавочное поле отлично от нуля как в самом диэлектрике, так, вообще говоря, и вне его. Для того чтобы найти результирующую напряженность поля \vec{E} , надо сложить напряженность поля свободных зарядов \vec{E}_0 с напряженностью поля связанных зарядов \vec{E}' :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' .$$

Можно показать, что напряженность электрического поля \vec{E} в однородном диэлектрике, создаваемая рассматриваемыми зарядами при условии, что однородный диэлектрик целиком заполняет все пространство, где поле отлично от нуля, в ε раз меньше напряженности поля \vec{E}_0 , тех же зарядов в пустоте:

$$\vec{E} = \frac{1}{\varepsilon} \vec{E}_0 .$$

ε - диэлектрическая проницаемость вещества.

Проводники в электрическом поле

Равновесие зарядов на проводнике.

Проводниками называют вещества, содержащие свободные заряженные частицы. Носители заряда в проводнике способны перемещаться под действием сколь угодно малой силы. Поэтому равновесие зарядов на проводнике может наблюдаться лишь при выполнении следующих **условий**:

1. Напряженность поля всюду внутри проводника должна быть равна нулю

$$\vec{E} = 0 .$$

Но т. к. $E = -\frac{\Delta\varphi}{d}$, то это означает, что потенциал внутри проводника

должен быть постоянным ($\varphi = const$).

2. Напряженность поля на поверхности проводника должна быть в каждой точке направлена по нормали к поверхности

$$E = E_n.$$

(Если $E_\tau \neq 0$ на поверхности, то будет существовать движение зарядов по поверхности). Следовательно, в случае равновесия зарядов поверхность проводника будет эквипотенциальной.

Если проводящему телу сообщить некоторый заряд q , то он распределится так, чтобы соблюдались условия равновесия. **При равновесии ни в каком месте внутри проводника не может быть избыточных зарядов – все они расположатся по поверхности проводника с некоторой плотностью σ .**

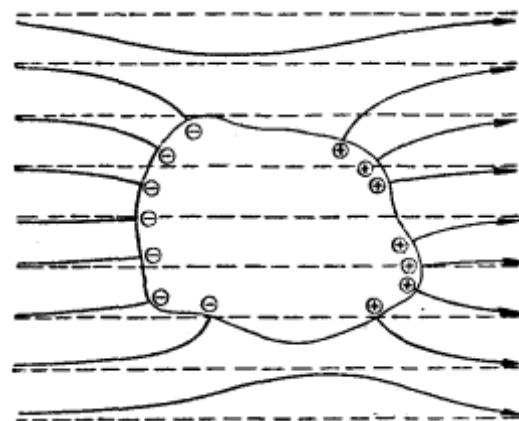
Так как в состоянии равновесия внутри проводника избыточных зарядов нет, удаление вещества из некоторого объема, взятого внутри проводника, никак не отразится на равновесном расположении зарядов. Таким образом, избыточный заряд распределяется на полой проводнике так же, как и на сплошном, т. е. по его наружной поверхности. На поверхности полости в состоянии равновесия избыточные заряды располагаться не могут. Этот вывод вытекает также из того, что одноименные элементарные заряды, образующие данный заряд q , взаимно отталкиваются и, следовательно, стремятся расположиться на наибольшем расстоянии друг от друга.

Проводник во внешнем электрическом поле.

При внесении незаряженного проводника в электрическое поле носители заряда приходят в движение: положительные в направлении вектора \vec{E} , отрицательные – в противоположную сторону. В результате у концов проводника возникают заряды противоположного знака, называемые индуцированными зарядами.

Электростатическая индукция – появление электрических зарядов разного знака на противоположных участках поверхности проводника при внесении его в электростатическое поле.

Поле этих зарядов направлено противоположно внешнему полю. Таким образом, накапливание зарядов у концов проводника приводит к ослаблению в нем поля. Перераспределение носителей заряда происходит до тех пор, пока не будут выполнены условия равновесия зарядов на проводнике, т. е. пока напряженность поля внутри проводника не станет равной нулю, а линии напряженности вне проводника перпендикулярными к его поверхности. Следовательно, нейтральный проводник, внесенный в электрическое поле, разрывает часть линий напряженности – они заканчиваются на отрицательных индуцированных зарядах и вновь начинаются на положительных.



Индукцированные заряды распределяются по внешней поверхности проводника. Если внутри проводника имеется полость, то при равновесном распределении индуцированных зарядов поле внутри нее также обращается в нуль. На этом основывается электростатическая защита. Когда какой-то прибор хотят защитить от воздействия внешних полей, его окружают проводящим футляром (экраном). Внешнее поле компенсируется внутри экрана возникающими на его поверхности индуцированными зарядами. Подобный экран действует хорошо и в том случае, если его сделать не сплошным, а в виде густой сетки.

Свойства проводника в электрическом поле

1. Внутри проводника напряженность поля всегда равна нулю.
2. Потенциал внутри проводника во всех точках одинаков и равен потенциалу поверхности проводника. Когда в задаче говорят, что

«проводник заряжен до потенциала ... В», то имеют в виду именно потенциал поверхности.

3. Снаружи от проводника вблизи от его поверхности напряженность поля всегда перпендикулярна поверхности.

4. Если проводнику сообщить заряд, то он весь распределится по очень тонкому слою вблизи поверхности проводника (обычно говорят, что весь заряд проводника распределяется на его поверхности). Это легко объясняется: дело в том, что сообщая заряд телу, мы передаем ему носители заряда одного знака, т.е. одноименные заряды, которые отталкиваются. А значит они будут стремиться разбежаться друг от друга на максимальное расстояние из всех возможных, т.е. скопятся у самых краев проводника. Как следствие, если из проводника удалить сердцевину, то его электростатические свойства никак не изменятся.

5. Снаружи проводника напряженность поля тем больше, чем кривее поверхность проводника. Максимальное значение напряженности достигается вблизи остриев и резких изломов поверхности проводника.

Емкость проводников.

Перейдем к рассмотрению весьма важного свойства проводников, называемого их емкостью или просто емкостью. Опыт показывает, что разные проводники, будучи заряжены одинаковым количеством электричества, принимают разные потенциалы; это указывает, что они отличаются друг от друга физическим свойством, которое характеризуется величиной, называемой емкостью.

Емкость проводника зависит от расположения окружающих тел, т. к. окружающие тела (даже нейтральные) могут электризоваться (посредством индукции) и менять поле вокруг проводника, а, следовательно, и распределение зарядов на проводнике (что ведет к изменению поля, создаваемого зарядами проводника, и, следовательно, к изменению потенциала, зависящего от данного поля). Потому сперва определим понятие

емкости уединенного проводника, т. е. *такого проводника, вблизи которого нет никаких других тел, которые могли бы повлиять на распределение на нем зарядов*. Потенциал уединенного проводника φ пропорционален величине заряда q , так как при увеличении заряда в определенное число раз увеличивается в такое же число раз напряженность поля, а, следовательно, и работа перемещения заряда от проводника в бесконечность:

$$q = C\varphi.$$

Коэффициент пропорциональности C зависит от формы и величины проводника, а так же свойств окружающей среды и называется его емкостью. Из последнего равенства имеем:

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Это соотношение указывает, что **емкость уединенного проводника есть физическая величина, численно равная количеству электричества, которое надо сообщить ранее не заряженному проводнику, чтобы потенциал его принял значение, равное единице (при $\varphi = 1$ имеем $C = q$)**. При этом мы считаем, что неопределенная постоянная в выражении потенциала выбрана так, что потенциалы бесконечно удаленных от проводника точек равны нулю.

В системе СИ за единицу емкости принято брать емкость такого проводника, увеличение на котором заряда на один кулон ведет к повышению его потенциала на один вольт. Такая единица называется фарад. [Ф]

Очевидно, *фарад* есть чрезвычайно большая единица емкости. В самом деле, это есть емкость уединенного шара радиусом 9 миллионов километров (в 1400 раз большим радиуса земного шара). Практически поэтому наряду с единицей емкости фарадой употребляют меньшую, называемую микрофарадой, равную одной миллионной доле фарады. Емкостью в одну микрофараду обладает уединенный шар радиусом 9 км, т. е.

тоже еще очень большой шар. Емкость проводника зависит от окружающих данный проводник тел.

Конденсаторы.

Уединенные проводники обладают малой емкостью. Даже шар таких размеров, как Земля, имеет емкость всего лишь 700 микрофард. Вместе с тем на практике бывает потребность в осуществлении системы проводников с большой емкостью, практически не зависящей от окружающих тел. Это оказывается возможным, если система защищена от влияния прочих тел. Примером таких систем являются конденсаторы.

Так называемый плоский конденсатор состоит из двух параллельных пластин A и B , расположенных друг от друга на расстоянии d , малом по сравнению с их собственными размерами. Будем считать, что между пластинами – пустота (практически это может быть воздух).

Под емкостью C конденсатора подразумевается величина, измеряемая отношением заряда на одной из пластин (положительной) к разности потенциалов между пластинами:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2},$$

Выразим емкость плоского конденсатора через величины, характеризующие его размеры. Так как размеры пластин велики по сравнению с расстоянием между ними, то напряженность поля между пластинами такая же, как и в случае двух бесконечных плоскостей, несущих равные по численному значению заряды противоположных знаков. Тогда имеем, что напряженность поля между пластинами E равна:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0},$$

где σ - поверхностная плотность зарядов. Обозначим площадь одной пластины через S , тогда $\sigma = \frac{q}{S}$ и

$$E = \frac{q}{\varepsilon_0 S},$$

откуда:

$$q = ES\varepsilon_0.$$

Напряженность поля E выразим через разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$:

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

Тогда найдем:

$$q = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)S\varepsilon_0}{d}$$

Воспользовавшись этим равенством и формулой для емкости плоского конденсатора C получим:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{S\varepsilon_0}{d}.$$

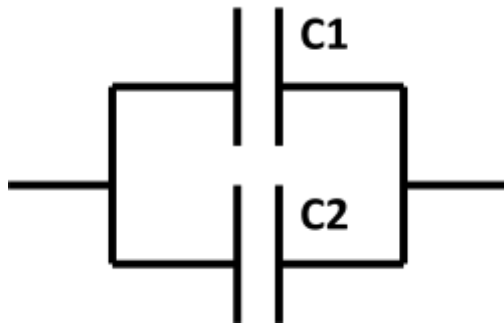
Из последней формулы видно, что емкость плоского конденсатора пропорциональна площади пластины S и обратно пропорциональна расстоянию между пластинами d . Чем ближе расположены пластины друг к другу, тем больше емкость образуемого ими конденсатора.

Если пространство между пластинами заполнить какой-либо непроводящей (диэлектрической) средой с относительной диэлектрической проницаемостью ε то емкость плоского конденсатора увеличится в ε раз:

$$C = \frac{S\varepsilon\varepsilon_0}{d}.$$

Если между обкладками конденсатора находится воздух, то полагаем $\varepsilon=1$.

Соединения конденсаторов

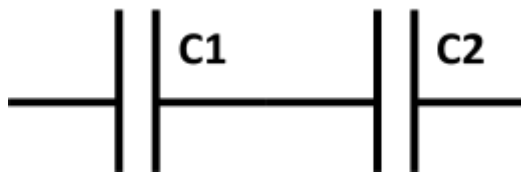


Параллельное соединение конденсаторов – для увеличения ёмкости. Конденсаторы соединены одноименно заряженными обкладками, как бы увеличивая площадь одинаково заряженных пластин. Напряжение на всех конденсаторах одинаковое, общий заряд равен сумме зарядов каждого из конденсаторов, и общая ёмкость также равна сумме емкостей всех конденсаторов соединенных параллельно. Выпишем формулы для параллельного соединения конденсаторов:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n$$

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$



При **последовательном соединении конденсаторов** общая ёмкость батареи конденсаторов всегда меньше, чем ёмкость наименьшего конденсатора, входящего в батарею. Применяется последовательное соединение для увеличения напряжения пробоя конденсаторов. Выпишем формулы для последовательного соединения конденсаторов. Общая емкость последовательно соединенных конденсаторов находится из соотношения:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Из закона сохранения заряда следует, что заряды на соседних обкладках равны:

$$q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_n$$

Напряжение равно сумме напряжений на отдельных конденсаторах.

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

Для двух последовательно соединённых конденсаторов формула выше даст нам следующее выражение для общей емкости:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Для N одинаковых последовательно соединённых конденсаторов:

$$C = \frac{C_1}{N}$$

Энергия заряженного проводника.

Заряд q , находящийся на некотором проводнике, можно рассматривать как систему точечных зарядов Δq . Такая система обладает энергией, равной работе, которую нужно совершить, чтобы перенести все заряды Δq из бесконечности и расположить на поверхности проводника.

Перенос из бесконечности на поверхность проводника первой порции заряда Δq не сопровождается совершением работы, так как потенциал проводника первоначально равен нулю. В результате сообщения проводнику заряда Δq его потенциал становится отличным от нуля, вследствие чего перенос второй порции Δq уже требует совершения некоторой работы. Так как по мере увеличения заряда на проводнике потенциал его растет, при перемещении каждой последующей порции заряда Δq должна совершаться все большая по величине работа

$$\Delta A = \varphi \Delta q = \frac{q}{C} \Delta q,$$

где φ – потенциал проводника, обусловленный уже имеющимся на нем зарядом q , C – емкость проводника.

Так как проводник ранее был не заряжен его первоначальный потенциал равен нулю. Если φ — конечный потенциал, то среднее значение потенциала составит $\varphi/2$. Работа, которая совершается против сил поля при

сообщении проводнику заряда q и потенциала φ , является мерой энергии заряженного проводника. Она может быть вычислена по формуле

$$W = \frac{q^2}{2C} + const.$$

Естественно считать энергию незаряженного проводника равной нулю. Тогда $const$ также обращается в нуль. Учтя соотношение между емкостью, зарядом и потенциалом проводника, можно написать

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{q\varphi}{2} = \frac{C\varphi^2}{2}.$$

Энергия заряженного конденсатора.

Процесс возникновения на обкладках конденсатора зарядов $+q$ и $-q$ можно представить так, что от одной обкладки последовательно отнимаются очень малые порции заряда Δq и перемещаются на другую обкладку. Работа переноса очередной порции равна

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

где U – напряжение на конденсаторе. Заменяя U в соответствии с формулой для емкости конденсатора

Аналогично рассуждениям для уединенного проводника

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2}.$$

Особое внимание обращайте на фразу: «Конденсатор подключён к источнику». Это означает, что напряжение на конденсаторе не изменяется. А фраза «Конденсатор зарядили и отключили от источника» означает, что заряд конденсатора не изменится.

Энергия электростатического поля.

Энергию конденсатора теперь можно выразить через величины, характеризующие электрическое поле в зазоре между обкладками. Сделаем это для плоского конденсатора:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 SU^2}{2d} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{2} \left(\frac{U}{d}\right)^2 Sd.$$

Данная формула связывает энергию конденсатора с зарядом на его обкладках.

Произведение Sd – объем V , занимаемый полем; $\frac{U}{d} = E$. Т. о, можно

написать

$$W = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} V.$$

Данная формула связывает энергию конденсатора с напряженностью поля. Логично поставить вопрос: где же локализована (т. е. сосредоточена) энергия, что является носителем энергии – заряды или поле? **Экспериментальные факты говорят о том, что носителем энергии является поле.**

Если поле однородно, т. е. если его напряженность одинакова по модулю и направлению в любой точке пространства (что имеет место в плоском конденсаторе), то заключенная в нем энергия распределяется в пространстве с постоянной плотностью w , равной энергии поля, деленной на заполняемой полем объем. Следовательно, плотность энергии электростатического поля

$$w = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}.$$

Данная формула справедлива и для неоднородного поля.

Вопросы для самоконтроля и повторения:

1. Какие вещества называют диэлектриками?
2. Какие два основных вида диэлектриков существует?
3. Какая система зарядов называется электрическим диполем? Каким параметром она характеризуется?

4. Что происходит с неполярными молекулами диэлектриков во внешнем электрическом поле?
5. Как действует электрическое поле на полярные молекулы?
6. В чем состоит различие в поляризации диэлектриков с полярными и неполярными молекулами?
7. Что характеризует диэлектрическая проницаемость вещества.
8. Какие вещества называют проводниками?
9. Каковы напряженность и потенциал поля, а также распределение зарядов внутри и на поверхности заряженного проводника.
10. В чем состоит электростатическая защита?
11. Что называется емкостью уединенного проводника и от чего она зависит?
12. Что называется емкостью конденсатора и от чего она зависит?
13. Чему равна емкость плоского конденсатора?
14. Приведите выражение для энергии заряженного проводника.
15. Приведите выражение энергии заряженного конденсатора.
16. Где сосредоточена электрическая энергия?
17. Чему равна объемная плотность энергии электростатического поля?

Лекция 16.

Постоянный электрический ток. Законы постоянного тока

Законы постоянного тока

Упорядоченное движение электрических зарядов называется **электрическим током**.

Для появления и существования тока проводимости необходимы *два условия*.

Первое – наличие в данной среде носителей заряда, т.е. заряженных частиц, которые могли бы в ней перемещаться.

В металлах могут свободно перемещаться только электроны. Поэтому электрический ток в металлах есть движение электронов проводимости. В проводящих растворах нет свободных электронов, а подвижными заряженными частицами являются ионы. В газах могут существовать в подвижном состоянии и ионы, и электроны.

Второе – наличие в данной среде электрического поля, энергия которого затрачивалась бы на перемещение электрических зарядов.

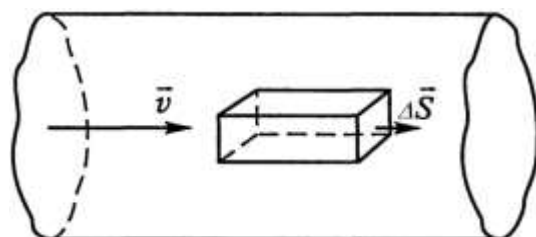
Для того чтобы ток был длительным, энергия поля должна все время пополняться, иными словами, нужен **источник электрической энергии** – устройство, в котором осуществляется преобразование какого-либо вида энергии в энергию электрического поля.

Направлением тока условились считать направление движения положительных частиц. Поэтому направление тока в металлах противоположно направлению движения электронов.

*Электрический ток, значение и направление которого не меняется с течением времени, называется **постоянным**.*

Сила и плотность тока.

Пусть концентрация свободных электронов в металле равна n , а заряд



каждого носителя равен e . Выделим внутри проводника прямоугольник с сечением площадью ΔS , перпендикулярным вектору скорости упорядоченного движения зарядов \vec{v} . Сечение характеризуется нормальным к нему вектором $\Delta \vec{S}$. Построим на этом сечении параллелепипед высотой, численно равной скорости \vec{v} . За 1 с через выделенное сечение пройдут те и только те заряды, которые находятся внутри параллелепипеда. Они перенесут заряд

$$j = nev.$$

Если рассматривать \vec{j} как вектор, то предыдущее выражение примет вид:

$$\vec{j} = ne\vec{v}.$$

Физическую величину \vec{j} называют плотностью тока; она численно равна заряду, проходящему в 1 с через единичное сечение проводника, перпендикулярное вектору скорости зарядов. Заметим, что при изменении знака заряда меняется и знак скорости, так что знак вектора плотности тока не изменяется.

При постоянном токе (скорость упорядоченного движения зарядов не меняется) вектор \vec{j} постоянен по всему выбранному сечению проводника. Поэтому, суммируя по сечению, получим:

$$nevS = I, \text{ где } j = \frac{I}{S} \text{ Единица измерения: } 1 \frac{A}{m^2}$$

I – сила тока, численно равная полному заряду q , проходящему через сечение проводника в единицу времени t

$$I = \frac{q}{t}.$$

При токе, меняющемся во времени, это определение заменяется более общим:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

Сила тока – скалярная характеристика процесса. Распространенное выражение «направление тока» имеет смысл только по отношению к вектору плотности тока.

Основной единицей в СИ является единица силы тока – ампер (А).

При силе тока 1 А через сечение проводника в 1 с проходит заряд, равный 1 Кл, следовательно, 1 Кл = 1 А · с.

Закон Ома для однородного участка цепи.

При токе заряды движутся, так как внутри проводника существует электрическое поле, характеризуемое напряженностью \vec{E} , которое вызывает и поддерживает упорядоченное движение зарядов. Поэтому между концами проводника с током существует разность потенциалов U (ее часто называют напряжением или падением напряжения на соответствующем участке). Сила тока является функцией этой разности потенциалов:

$$I = f(U).$$

Вид этой функции обычно довольно сложен. Но есть простой частный случай, очень важный практически (токи в металлах и жидкостях), когда при данных внешних условиях (в частности, температуре) отношение разности потенциалов U к силе тока I оказывается постоянным, не зависящим от U :

$$\frac{U}{I} = \frac{1}{G} = R = const, \text{ где } G - \text{ электрическая проводимость проводника,}$$

величина R называется сопротивлением проводника и выражается в *омах* (Ом):

$$1\text{Ом} = \frac{1\text{В}}{1\text{А}}.$$

т. е.

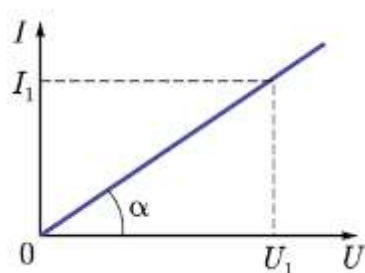
$$I = \frac{U}{R}.$$

Это известный закон Ома для участка цепи: **сила** тока в проводнике пропорциональна напряжению на его концах и обратно пропорциональна **сопротивлению**.

График, на котором изображена **зависимость** тока от приложенного напряжения, называется *вольт -амперной характеристикой* данного проводника и представляет собой прямую **линию** Угол наклона этой прямой

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{U_1}{I_1} = R.$$

зависит от сопротивления R участка **цепи**:



Причины сопротивления:

- Взаимодействие электронов проводимости с ионами кристаллической решетки
- Взаимодействие электронов проводимости с электронами, которые связаны с ионами кристаллической решетки
- Влияние дефектов и примесей

Сопротивление проводника прямо пропорционально его длине и обратно пропорционально площади его сечения.

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

Величину, характеризующую зависимость сопротивления проводника от рода вещества, из которого он сделан, называют **удельным сопротивлением**.

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

численно равно сопротивлению проводника, имеющего форму куба со стороной, равной 1 м. Единицей удельного сопротивления в СИ является Ом · метр. Последнее соотношение верно для проводников цилиндрической формы (для других форм зависимость от геометрии будет другой).

Величина $\sigma=1/\rho$, обратная удельному сопротивлению, называется *удельной электрической проводимостью проводника*.

Единица электрической проводимости — *сименс* (См). 1 См — *электрическая проводимость проводника сопротивлением 1 Ом, т.е. 1 См = 1 Ом⁻¹*.

При нагревании сопротивление проводника увеличивается.

Величину, характеризующую зависимость удельного сопротивления проводника при нагревании от рода вещества называют **температурным коэффициентом сопротивления**. Его измеряют числом, показывающим, на какую часть своей величины при 0° С изменится удельное сопротивление при нагревании на 1° С

$$\alpha = \frac{\Delta\rho}{\rho_0 t^0}$$

Сопротивление проводника при температуре t^0 находят по формуле

$$R_t = R_0(1 + \alpha * t^0),$$

где R_t - сопротивление при некоторой температуре t^0

R_0 - сопротивление при 0° С

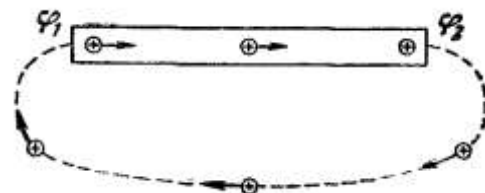
α - температурный коэффициент сопротивления – величина, характеризующая зависимость удельного сопротивления проводника при нагревании от рода вещества.

В 1911 году Камерлинг – Оннес обнаружил **явление сверхпроводимости**: при охлаждении проводника до сверхнизких температур его сопротивление резко падает до нуля

Электродвижущая сила источника тока.

Для существования постоянного тока необходимо наличие в электрической замкнутой цепи устройства, способного создавать и поддерживать разности потенциалов на участках цепи за счет работы сил неэлектростатического происхождения. Такие устройства называются **источниками постоянного тока**. Силы неэлектростатического происхождения, действующие на свободные носители заряда со стороны источников тока, называются **сторонними силами**.

Природа сторонних сил может быть различной. В гальванических элементах или аккумуляторах они возникают в результате электрохимических процессов, в генераторах постоянного тока сторонние силы возникают при движении проводников в магнитном поле. Под действием сторонних сил электрические заряды движутся внутри источника тока против сил электростатического поля, благодаря чему в замкнутой цепи может поддерживаться постоянный электрический ток.



Для описания их действия на заряды вводится понятие **напряженности сторонних сил \vec{E}_{cm}** . Напряженностью сторонних сил называется векторная физическая величина, равная отношению силы, действующей на положительный заряд, к этому заряду при неэлектростатическом взаимодействии.

Постулируется, что напряженность сторонних сил, так же как и напряженность электростатического поля, подчиняется принципу суперпозиции.

Следовательно, если на участке электрической цепи действуют, кроме электрических, сторонние силы, то результирующая напряженность будет определяться векторной суммой напряженности электрического поля \vec{E} и напряженности сторонних сил \vec{E}_{cm} . Тогда, полная работа A по перемещении

заряда на этом участке, совершаемая кулоновскими и сторонними силами, равна

$$A = A_{кул} + A_{ст},$$

где $A_{кул}$ – работа кулоновских сил, $A_{ст}$ – работа, совершаемая за счет действия неэлектрических источников энергии.

Разделив левую и правую части последнего равенства на величину перемещаемого заряда, получим

$$\frac{A}{q} = \frac{A_{кул}}{q} + \frac{A_{ст}}{q}.$$

Величина $\frac{A_{кул}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi$ – разность потенциалов, равная отношению работы, которую совершают кулоновские силы при перемещении некоторого заряда, к величине этого заряда.

Величина $\frac{A_{ст}}{q} = E$ – электродвижущая сила (или, сокращенно, ЭДС), равная отношению работы, совершаемой неэлектрическими источниками энергии при перемещении заряда, к величине этого заряда. Единицей ЭДС в СИ является *вольт*.

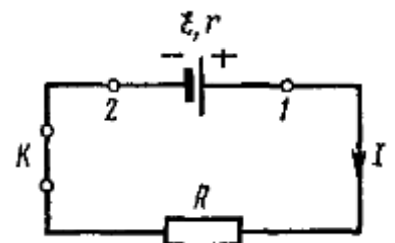
Величина $\frac{A}{q} = U$ – напряжение на данном участке цепи, равная отношению суммарной работы, совершаемой при перемещении заряда, к величине этого заряда.

Сопоставляя последние выражения, получим

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + E.$$

Итак, напряжение на участке цепи равно сумме разности потенциалов и электродвижущей силы.

Закон Ома для полной цепи.



Пусть замкнутая цепь состоит из источника электрической энергии с ЭДС E и внутренним сопротивлением r , а также внешней части цепи, имеющей сопротивление R . Силу тока в цепи найдем по закону Ома для полной цепи:

$$I = E / (R + r),$$

т.е., сила тока цепи пропорциональна действующей в цепи ЭДС и обратно пропорциональна сумме сопротивлений цепи и внутреннего сопротивления источника.

Разность потенциалов на электродах источника равна напряжению на внешней части цепи:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = RI = E - Ir.$$

Если с помощью ключа K цепь разомкнуть, то ток в ней прекратится и, как видно из последней формулы, разность потенциалов на клеммах источника будет равна его ЭДС.

ЭДС, как и сила тока, – величина алгебраическая. Если ЭДС способствует движению положительных зарядов в выбранном направлении, то она считается положительной. Если ЭДС препятствует движению положительных зарядов в выбранном направлении, то она считается отрицательной.

Следует иметь в виду, что формулой закона Ома для полной цепи можно пользоваться лишь в случае, когда ток идет внутри источника от отрицательного полюса к положительному, а во внешней цепи – от положительного к отрицательному.

Важно понять и запомнить: ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока не меняются, при подключении разных нагрузок.

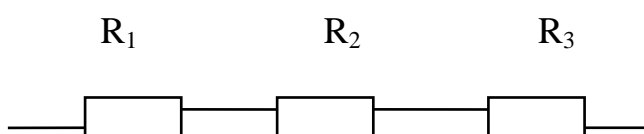
Если сопротивление нагрузки равно нулю (источник замыкается сам на себя) или много меньше сопротивления источника, то тогда в цепи потечет **ток короткого замыкания**:

$$I_{кз} = \frac{\mathcal{E}}{r}$$

Сила тока короткого замыкания – максимальная сила тока, которую можно получить от данного источника с электродвижущей силой ε и внутренним сопротивлением r . У источников с малым внутренним сопротивлением ток короткого замыкания может быть очень велик, и вызывать разрушение электрической цепи или источника. Например, у свинцовых аккумуляторов, используемых в автомобилях, сила тока короткого замыкания может составлять несколько сотен ампер. Особенно опасны короткие замыкания в осветительных сетях, питаемых от подстанций (тысячи ампер). Чтобы избежать разрушительного действия таких больших токов, в цепь включаются предохранители или специальные автоматы защиты сетей.

Соединение потребителей.

1. Последовательное соединение.



При последовательном соединении сила тока во всех потребителях одинаковая:

$$I = I_1 = I_2 = I_3$$

При последовательном соединении напряжение на внешнем участке цепи равно сумме напряжений на каждом потребителе:

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

При последовательном соединении сопротивление участка цепи равно сумме сопротивлений каждого потребителя:

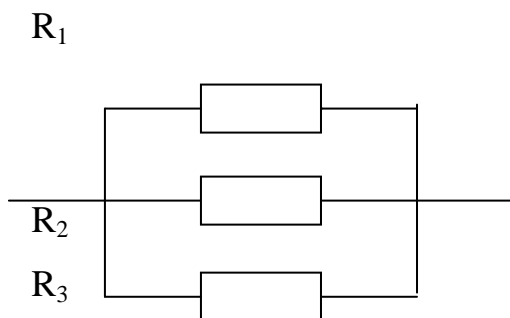
$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

Если все потребители одинаковые, т.е. $R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n = R$, то $R = nR$, где

n - число потребителей.

Последовательное соединение используют для увеличения сопротивления цепи.

Параллельное соединение потребителей



Точка, в которой сходится больше двух проводников, называется *узлом*.

(Все вместе параллельно соединённые проводники составляют *разветвление*, а каждый из них называется *ветвью*.)

При параллельном соединении *напряжение на каждой ветви одинаковое*:

$$U = U_1 = U_2 = U_3$$

При параллельном соединении *сила тока до разветвления равна сумме сил токов в каждом потребителе*: $I = I_1 + I_2 + I_3$

При параллельном соединении *обратная величина сопротивления участка цепи равна сумме обратных величин каждого сопротивления*:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Если все потребители одинаковые, т.е. $R_1=R_2=\dots=R_n=R$, то $R_{ц} = \frac{R}{n}$, n - число потребителей.

Для двух параллельно соединённых проводников (для дисциплины *электротехника*) $\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$

Параллельное соединение используют для уменьшения сопротивления в цепи.

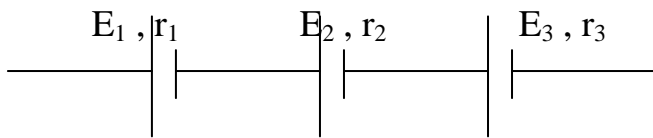
Для измерения силы тока на участке цепи, амперметр включают последовательно с нагрузкой.

Для измерения напряжения на участке цепи, вольтметр подключают параллельно к данному участку цепи.

Соединение источников цепи в батарею

1. Различают 2 типа соединений источников тока: последовательное и параллельное.

последовательное



1. При правильном (положительный полюс одного источника присоединяется к отрицательному другого) подключении источников общее ЭДС всех источников и их внутреннее сопротивление может быть найдено по формулам:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 \quad r = r_1 + r_2$$

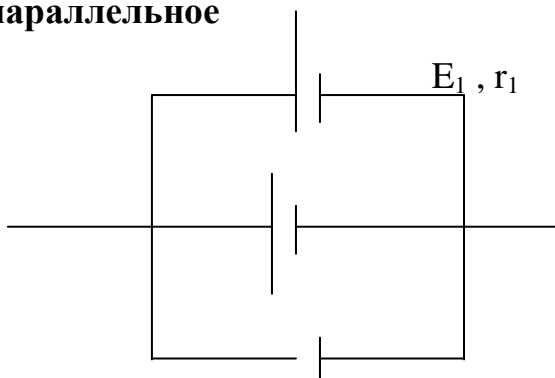
Заряд приобретает энергию в каждом источнике, поэтому $E = E_1 * n$; $r = r_1 * n$
Например, такое подключение источников осуществляется в пультах дистанционного управления, фотоаппаратах и других бытовых приборах, работающих от нескольких батареек.

2. При неправильном (источники соединяются одинаковыми полюсами) подключении источников их общее ЭДС и сопротивление рассчитывается по формулам:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 \quad r = r_1 + r_2$$

В обоих случаях общее сопротивление источников увеличивается.

параллельное



E_2, r_2

|
 E_3, r_3

Имеет смысл соединять источники только с одинаковой ЭДС, иначе источники будут разряжаться друг на друга. Таким образом суммарное ЭДС будет таким же, как и ЭДС каждого источника, то есть при параллельном соединении мы не получим батарею с большим ЭДС. При этом уменьшается внутреннее сопротивление батареи источников, что позволяет получать большую силу тока и мощность в цепи:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$$

Заряд приобретает энергию в 1 источнике, поэтому $E = E_1$; $r = \frac{r_1}{n}$

Увеличение ЭДС дает только последовательное соединение, его используют, когда внутреннее сопротивление много меньше внешнего. Параллельное соединение используют, когда внутреннее сопротивление много больше внешнего. Если внешнее и внутреннее сопротивление примерно равны, то используют смешанное соединение источников.

Работа и мощность тока.

При постоянной силе тока I через каждое сечение проводника за время t переносится электрический заряд $q = It$. Рассмотрим два сечения 1 и 2 в цепи постоянного тока. За время t через первое сечение в объем проводника между сечениями 1 и 2 войдет заряд q , и за это же время через второе сечение из этого объема выйдет такой же заряд q , что эквивалентно непосредственному переносу заряда q между сечениями 1 и 2 за время t . При

этом электрическое поле на участке 1-2 совершает работу A , равную произведению q на разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ между этими сечениями:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = I(\varphi_1 - \varphi_2)t = IUt,$$

здесь через U обозначена разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$.

Работа, совершаемая электрическим полем на определенном участке электрической цепи, называется работой тока.

Физическую величину, равную отношению работы тока A ко времени ее совершения t , называют мощностью тока. Мощность тока будем обозначать буквой N . По определению:

$$N = \frac{A}{t} = IU.$$

Единицей мощности в СИ служит *ватт* ($Вт$).

Закон Джоуля-Ленца.

Рассмотрим преобразование энергии на отдельном участке электрической цепи. Если участок не содержит ЭДС, то для него выполняется закон Ома $IR = U$. Умножив последний на It , получим

$$I^2Rt = IUt.$$

Правая часть представляет работу тока на рассматриваемом участке проводника. Согласно закону сохранения энергии эта работа расходуется на изменение внутренней энергии (нагревание) проводника и выделение некоторого количества теплоты в окружающую среду (при условии, что проводник неподвижен и в нем не происходит химических реакций). Так происходит до тех пор, пока проводник не нагреется до некоторой температуры T , при которой заканчивается его нагревание (внутренняя энергия перестает изменяться) и вся работа тока затрачивается на выделение теплоты Q в окружающую среду, т.е.

$$Q = IUt$$

или

$$Q = I^2 R t.$$

Т. о., количество теплоты, выделяемое в проводнике при протекании в нем постоянного тока, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения тока. Этот закон носит название закона Джоуля-Ленца.

Тепловое действие тока.

Технические применения теплового действия тока многообразны: лампы накаливания, электропечи и различные бытовые нагревательные приборы, дуговая и контактная электросварка, электронные лампы, измерительная техника и т. п.

Чтобы сосредоточить выделение мощности тока в нужном участке цепи, необходимо цепь тока составить так, чтобы сопротивление того участка, где должно быть сосредоточено тепловое действие тока, значительно превышало сопротивление всех остальных участков цепи. Действительно, когда проводники включены в цепь последовательно, то ток I в них одинаков и количество тепла, выделяемого в каждом проводнике каждую секунду, прямо пропорционально сопротивлению проводника. Поэтому нить лампочки накаливания, имеющая большое сопротивление, раскаляется, тогда как медные провода, ведущие к ней ток, остаются холодными. То же можно сказать о нагревательных приборах. По той же причине место плохого соединения двух проволок (плохой контакт) электрической сети сильно нагревается током (для предотвращения этого в электрических установках концы соединяемых проволок тщательно спаивают).

При параллельном соединении токи в проводниках будут разные, зато все они имеют общее напряжение; количества тепла, выделяемого каждую секунду, в этом случае обратно пропорциональны сопротивлениям, т. е. явление как раз противоположно тому, что наблюдается при последовательном соединении проводников. Поэтому если лампочки накаливания включены в цепь параллельно, как это и делается обыкновенно,

то лампочка с меньшим сопротивлением будет брать на себя больше энергии, чем лампочка с большим сопротивлением.

Электрический ток в различных средах

Электрический ток в электролитах.

Жидкий проводник называется электролитом.

Электролитами являются растворы солей, кислот и щелочей.

Электрический ток в электролитах проводят положительные и отрицательные ионы, которые образуются в результате электролитической диссоциации.

Прохождение электрического тока через электролит, сопровождающееся химическими превращениями вещества и выделением его на электродах, называется электролизом.

Закон Фарадея. Масса вещества **m**, выделившегося на электродах, прямо пропорциональна количеству электричества **q**, пройденного через электролит. **m=kq**

k - электрохимический эквивалент - показывает зависимость массы, выделившегося вещества от его рода (табличные значения).

Катод – *отрицательно заряженный электрод.*

Анод – *положительно заряженный электрод.*

Применение электролиза.

1. Гальваностегия (никелирование, серебрение)
2. Гальванопластика (изготовление копий).
3. Очистка металлов, полученных при выплавке из руды от примесей.
4. Промышленный способ получения кислорода и водорода.
5. Электрополировка поверхностей.

Электрический ток в газах.

Газы являются диэлектриками. Для того, чтобы газ проводил электрический ток, его необходимо ионизировать, т.е. образовать заряженные частицы из нейтральных атомов.

В газах электрический ток проводят положительные и отрицательные ионы и электроны.

Процесс протекания электрического тока через газ называется *газовым разрядом*.

Разряд в газе, который происходит под действием внешнего ионизатора (высокая температура, ультрафиолетовые, рентгеновские, γ -лучи), называется несамостоятельным разрядом.

Разряд в газе, который происходит без действия внешнего ионизатора, называется самостоятельным разрядом.

Виды самостоятельного разряда:

1. Первичная ударная ионизация - газ ионизирует сам себя. При высоком напряжении заряженные частицы движутся с большой скоростью и встречаясь с нейтральным атомом отрывает от него электрон.

2. Термоэлектронная эмиссия - с горячего катода (металла) вылетают электроны.

3. Вторичная ударная ионизация - при высоком напряжении положительные ионы, двигаясь с большой скоростью, ударяясь о катод выбивают из него электроны.

Прохождение электрического тока в газе при нормальном атмосферном давлении сопровождается ярким свечением.

Виды разрядов в газе при атмосферном давлении:

1. *Дуговой разряд* или электрическая дуга – разряд в газе, происходящем при раскаленном катоде или при высоком напряжении между электродами (прожектор, проекционная лампа, электросварка).

2. *Искровой разряд* – прерывистый разряд в газе, происходящий при высоком напряжении (молния).

3. *Коронный разряд* наблюдается в сильно неоднородных полях при сравнительно больших давлениях (у заряженного острия, около проводов при большом напряжении).

4. *Тлеющий разряд* – разряд в разряженных газах, сопровождающийся слабым свечением.

Тлеющий разряд используют в рекламных трубках и в лампах дневного света.

Газ в котором значительная часть атомов ионизирована называют плазмой.

Электрический ток в вакууме.

Вакуум является диэлектриком. *Электрический ток в вакууме проводят электроны, вылетевшие в результате термоэлектронной эмиссии.*

Вакуумная лампа с двумя электродами называется диодом.

Диод обладает односторонней проводимостью, т.е. проводит ток в одном направлении, и является выпрямителем переменного тока.

Электрический ток в полупроводниках.

Чистые полупроводники.

Полупроводниками называются вещества, которые при низкой температуре не проводят электрический ток, а при нормальной и выше и при освещении проводят называются полупроводниками.

Атомы, потерявшие электрон становится атомом с вакантным местом и играет роль положительно заряженной частицы и называется *дыркой*.

Электрический ток в полупроводниках проводят электроны и дырки.

В чистых полупроводниках число электронов равно числу дырок. Проводимость в чистых полупроводниках называют *собственной*.

Примесные проводники.

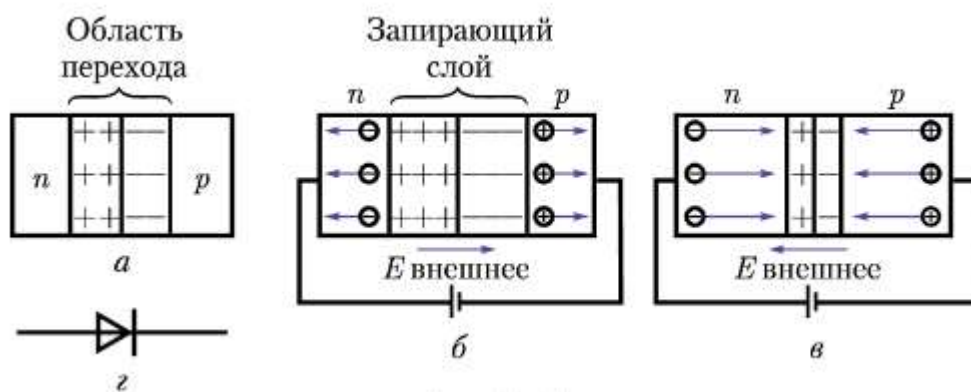
1.Донорная примесь. К полупроводникам добавляют элемент 5-ой группы.

Полупроводники, обладающие электронной проводимостью, называются полупроводниками *n-типа*.

2.Акцепторная примесь. К полупроводникам добавляют элемент 3-ей группы.

Полупроводники, обладающие дырочной проводимостью, называются полупроводниками *p-типа*.

Граница соприкосновения двух полупроводников, один из которых имеет электронную, а другой — дырочную проводимость, называется **электронно-дырочным переходом** или **p-n-переходом**.

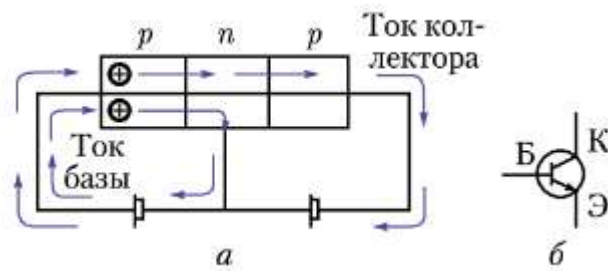


Полупроводник с p-n-переходом – называется полупроводниковым диодом.

Полупроводниковый диод обладает односторонней проводимостью, т.е. проводит ток в одном направлении и является выпрямителем переменного тока.

Недостаток полупроводникового диода. При высокой температуре проводит ток в обоих направлениях.

Полупроводниковый триод–транзистор – полупроводник с двумя p-n-переходами



Транзистор имеет три вывода: эмиттер, база, коллектор.

Эмиттер - снабжает базу зарядами. *База* - пропускает заряды.

Коллектор - собирает заряды.

Транзистор служит для увеличения напряжения и силы тока на подключенной нагрузке.

Вопросы для самоконтроля и повторения:

1. Что понимают под электрическим током?
2. Какие условия необходимы для возникновения и поддержания электрического тока?
3. Что называют силой тока? Плотностью тока?
4. От чего зависит скорость направленного движения (скорость дрейфа) электронов в проводнике?
5. Сформулируйте закон Ома для участка цепи без ЭДС.
6. Как зависит сопротивление проводника от его длины, площади, поперечного сечения и материала?
7. Что называют удельным сопротивлением? удельной электропроводимостью проводника?
8. Как зависит удельное сопротивление проводника от температуры?
9. В чем состоит явление сверхпроводимости?
10. Что называют электродвижущей силой источника тока?
11. Сформулируйте закон Ома для полной цепи.

12. Какое соединение сопротивлений называют последовательным?
параллельным? Чему равно сопротивление цепи при этих
соединениях?
13. Сформулируйте закон Джоуля - Ленца.
14. Чему равна работа постоянного тока на участке цепи?
15. Чему равна мощность постоянного тока?
16. В чем заключается процесс электролиза?
17. Расскажите о применении электролиза в технике.
18. В чем разница между самостоятельным и несамостоятельным
разрядом в газах?
19. Чем создается электрический ток в вакууме?
20. В чем отличие проводников от полупроводников и изоляторов?
21. Что вы понимаете под собственной проводимостью
полупроводников?
22. Объясните проводимости p и n -типа.
23. Как зависит электрическая проводимость полупроводников от
температуры освещенности?
24. Как устроен и работает полупроводниковый диод?
25. Какими преимуществами обладают полупроводниковые диоды и
триоды по сравнению с ламповыми.

Лекция 17

Магнитное поле. Вектор индукции магнитного поля. Принцип суперпозиции магнитных полей.

Магнитное поле

Опыт Эрстеда

Начало настоящему пониманию природы магнетизма положил датский физик Х.Эрстед (1777-1851), обративший внимание на то, что стрелка компаса случайно оказавшаяся на столе под проводником, располагается в отсутствие тока параллельно проводнику

Смотрим видео ролик.

Одна из версий так рассказывает о его открытии (Ф.М. Дягилев. Из истории физики и жизни ее творцов). Эрстед, читая лекцию студентам университета, демонстрировал свойство электрического тока нагревать проволоку. Совершенно случайно около проволоки оказался компас, не имевший никакого отношения к демонстрируемому явлению. Один из студентов, имя которого так и осталось неизвестным, обратил внимание преподавателя на то, что стрелка компаса поворачивалась, когда по проволоке шел ток. Для профессора это был давно искомый эффект, обнаруженный совершенно случайно.

Опыт Эрстеда явился прямым доказательством взаимосвязи электричества и магнетизма: **электрический ток оказывает магнитное действие.**

Большой вклад в понимание природы магнетизма внес французский ученый А. Ампер. Им было установлено, что всякий электрический ток способен взаимодействовать с другим током с силой, которая не может быть объяснена кулоновским взаимодействием

Французский физик Ампер установил, что два проводника, расположенные параллельно друг другу, испытывают взаимное

притяжение, если ток течет по ним в одну сторону, и отталкивание, если токи текут в разные стороны.

Притяжение проводников с током объясняется не электрическим взаимодействием зарядов. В этом можно также убедиться, если поднести к проводникам с током незаряженную гильзу, которая не проявит ни притяжения, ни отталкивания по отношению к проводникам. Это также следует из того, что количество положительных и отрицательных зарядов в проводниках одинаково, и поэтому проводники в целом электрически нейтральны.

Поле, посредством которого осуществляется взаимодействие токов, расположенных на расстоянии, называется магнитным полем.

Магнитное поле – особый вид материи, посредством которого осуществляется взаимодействие между движущимися электрически заряженными частицами или телами, обладающими магнитным моментом.

Магнитное поле создается движущимся зарядом, электрическим током, переменным электрическим полем.

В природе не существует магнитных зарядов. Магнитное взаимодействие это взаимодействие токов. (Гипотеза Ампера)

Магнитное поле действует на проводник с током и движущийся заряд.

Действие магнитного поля

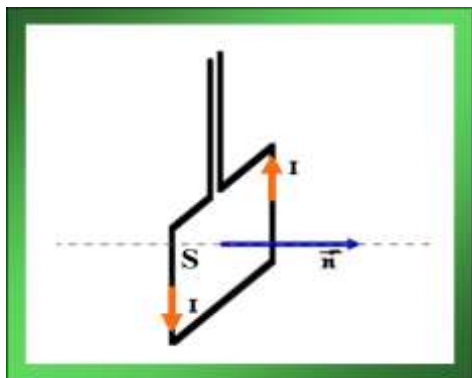
Поле обнаруживает себя по действию на помещенные в него:

- 1) магнитные стрелки – ориентирует (вращает);
- 2) контура (рамки) с током – ориентирует (вращает);
- 3) проводники с током – перемещает;
- 4) движущиеся электрически заряженные частицы – перемещает.

Замкнутый контур с током в магнитном поле.

Для исследования магнитного поля применим пробный ток, циркулирующий в плоском замкнутом контуре очень малых размеров.

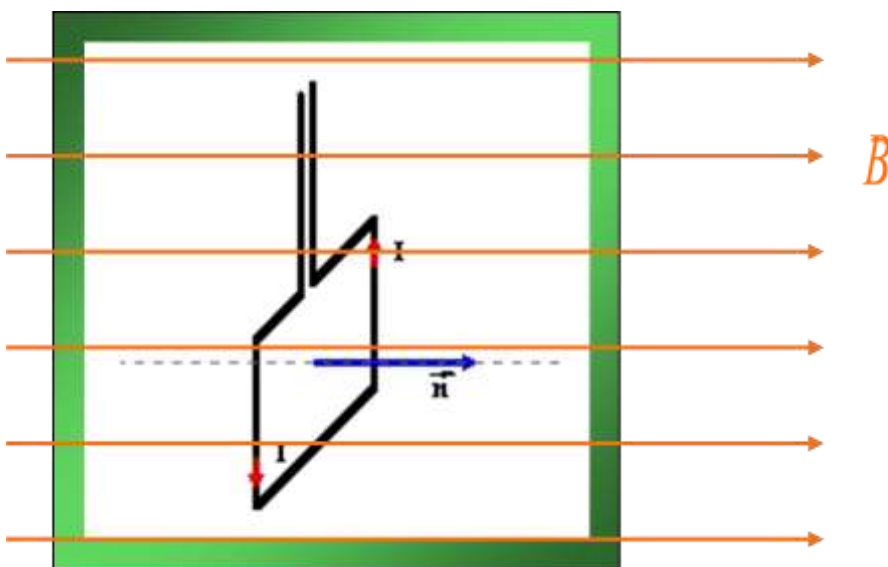
Будем называть такой контур пробным контуром.



Ориентацию его в пространстве характеризует направление нормали к контуру, восстанавливаемой по правилу правого винта (буравчика):

Если вращать рукоятку правого буравчика по направлению тока в контуре, тогда направление его поступательного движения даст направление нормали.

Помещая пробный контур в магнитное поле, обнаружим, что поле стремится повернуть контур (нормаль) в определенном направлении.



Вращающий момент, действующий на контур, зависит как от свойств магнитного поля в данной точке, так и от свойств контура.

Оказывается, что максимальная величина вращающего момента пропорциональна IS , т.е.:

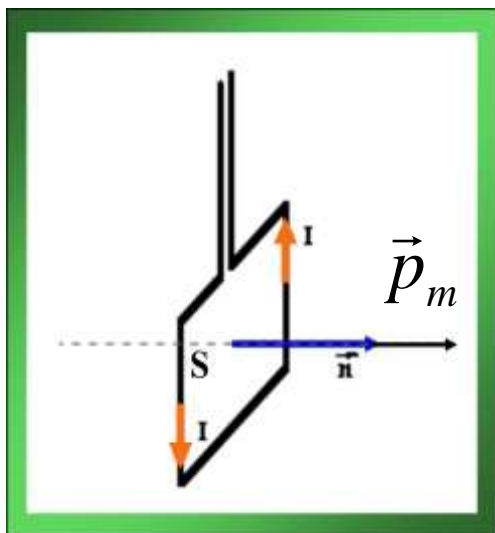
$$M_{max} \sim IS$$

S – площадь контура с током;

I – сила тока.

Векторную величину $\vec{p}_m = IS\vec{n}$ называют магнитным моментом контура.

В СИ измеряется в $A \cdot m^2$.



Вектор магнитной индукции

На пробные контуры с разными p_m , помещаемыми в данную точку магнитного поля, будут действовать разные по величине максимальные вращающие моменты M_{\max} .

Но отношение M_{\max} / p_m будет для всех контуров одинаково, оно будет являться силовой характеристикой магнитного поля — магнитной индукцией.

$$B = \frac{M_{\max}}{p_m}$$

Магнитная индукция есть вектор, направление которого совпадает с направлением нормали контура с током, свободно установившегося во внешнем магнитном поле.

За единицу магнитной индукции в СИ, называемой тесла (Тл) 1, принимается такая индукция, при которой на контур, магнитный момент

которого 1 A м^2 , действует максимальный вращающий момент, равный $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

$$1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н} \cdot \text{м}}{1 \text{ A} \cdot \text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{A} \cdot \text{м}}.$$

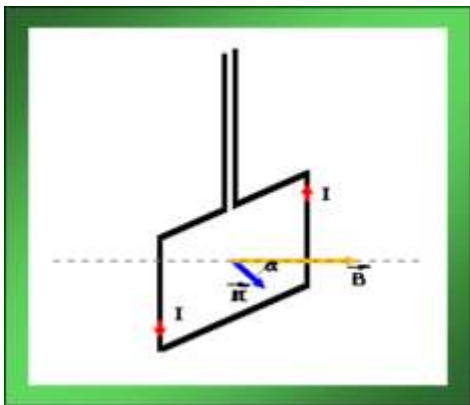
Вращающий момент

На контур с током, помещенный в магнитное поле с индукцией B , действует **вращающий момент**

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}]$$

В общем случае зависимость вращающего момента от ориентации контура выражается формулой

$$M = p_m B \sin \alpha,$$



При $\alpha = 90^\circ$ момент $M = M_{\text{max}}$ максимален.

При $\alpha = 0^\circ$ или $\alpha = 180^\circ$ момент $M = 0$.

Под действием вращательного момента рамка всегда повернется так, чтобы магнитная индукция стала параллельна нормали к рамке

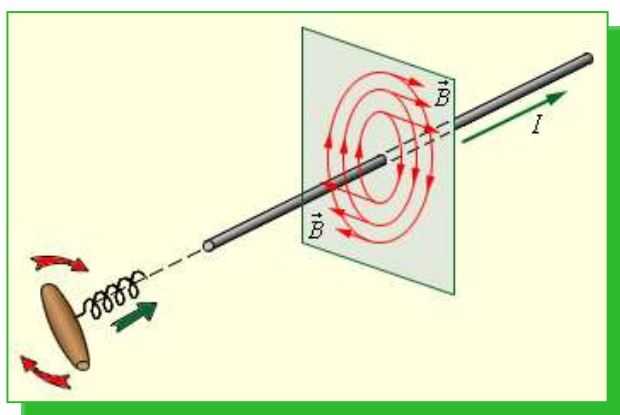
Смотрим видео

Линии магнитной индукции.

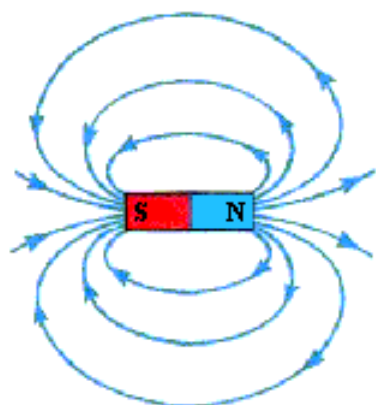
Магнитное поле изображается линиями магнитной индукции.

Силловые линии, или линии магнитной индукции, — это такие линии, касательные к которым направлены так же, как и вектор \vec{B} в данной точке поля.

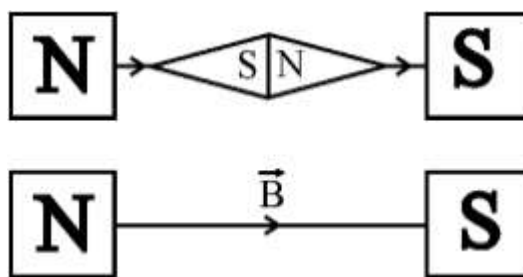
Линии магнитной индукции имеют направление, которое определяют с помощью правила правого винта (буравчика). Правило правого винта. Если поступательное движение винта направить по направлению тока, то направление вращения головки покажет направление линий магнитной индукции.



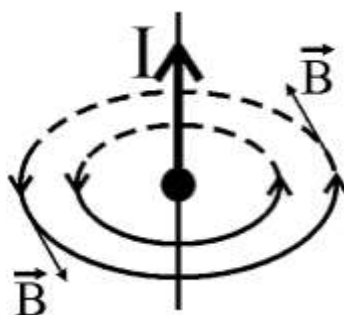
У постоянного магнита линии магнитной индукции из северного полюса выходят, а в южный полюс входят.



Силловая линия магнитного поля постоянных магнитов направлена по отношению к самим магнитам так, как показано на рисунке:



В случае **магнитного поля электрического тока** для определения направления силовых линий используют правило «**Правой руки**»: если взять проводник в правую руку так, чтобы большой палец был направлен по току, то четыре пальца, обхватывающие проводник, показывают направление силовых линий вокруг проводника:



Линии магнитной индукции поля прямого проводника с током представляют собой концентрические окружности, лежащие в плоскостях, перпендикулярных проводнику.

Магнитное поле вихревое, т.к. линии магнитной индукции замкнутые.

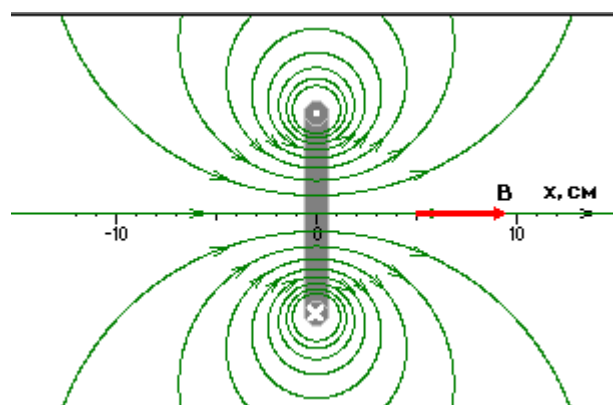
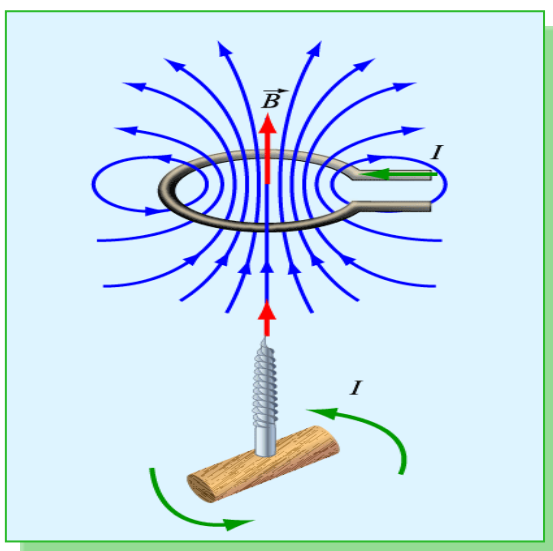
Линии магнитной индукции зависят от направления тока, силы тока и формы проводника

По густоте силовых линий можно судить о том, что по мере удаления от проводника индукция магнитного поля уменьшается. Магнитное поле **прямого тока является неоднородным.**

Поле, создаваемое током I , текущим по бесконечному прямому проводу, в точке, находящейся на расстоянии R от провода равно

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

Поле кругового тока неоднородно

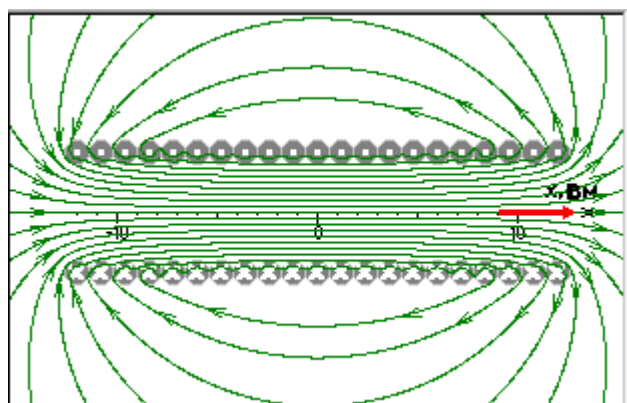


Если ток протекает по круговому витку, то в **центре витка индукция магнитного поля** определяется по формуле:

$$B_{\text{центр витка с током}} = \frac{\mu\mu_0 I}{2R}$$

Магнитное поле соленоида

Соленоидом (от греческого *соленоидес* – трубообразный) принято называть цилиндрическую катушку, витки которой плотно прилегают друг к другу. Направление вектора индукции магнитного поля в соленоиде связано с направлением тока правилом правого винта (правило буравчика).



Магнитное поле внутри соленоида является однородным.

Поле, магнитная индукция которого одинакова во всех точках, называется *однородным*.

Вблизи торцов катушки магнитное поле перестает быть однородным. Оно постепенно ослабевает, и силовые линии вектора магнитной индукции рассеиваются во внешнем пространстве.

Нетрудно увидеть сходство между магнитным полем соленоида и магнитным полем постоянного магнита. Конец катушки, из которого силовые линии выходят, аналогичен северному полюсу магнита, другой же конец катушки, в который силовые линии входят, аналогичен южному магнитному полюсу.

Магнитную индукцию внутри бесконечно длинного соленоида можно определить по формуле

$$B = \mu_0 n I,$$

где n – число витков соленоида, приходящееся на единицу его длины, I – сила тока в соленоиде.

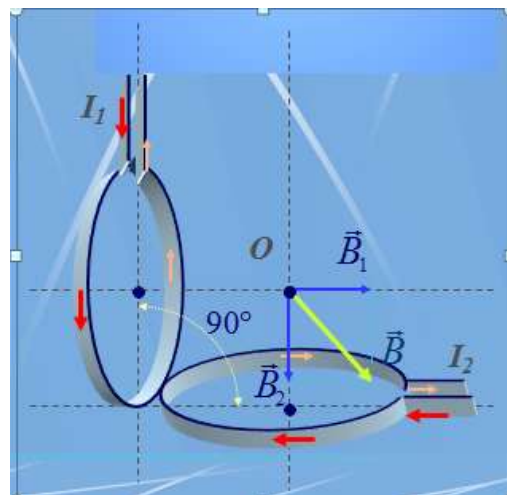
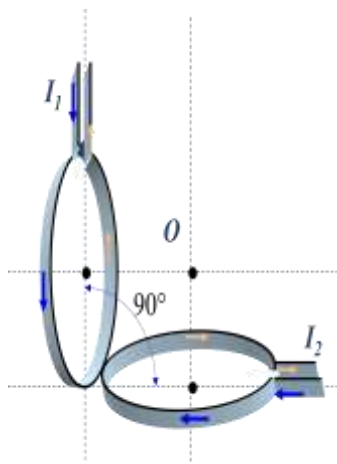
Принцип суперпозиции

Вектор магнитной индукции поля системы токов в некоторой точке равен геометрической сумме векторов индукции полей каждого из токов в отдельности:

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

Пример

Изобразите графически направление вектора магнитной индукции двух круговых токов, лежащих во взаимно перпендикулярных плоскостях, в точке O пересечения их осей.



Магнитная проницаемость среды.

Если с помощью проводника с током в различных веществах создавать магнитное поле и исследовать его с помощью пробного контура, то можно убедиться, что магнитная индукция зависит в данной точке от рода вещества, т. е. зависит от свойств среды. Пусть \vec{B} и \vec{B}_0 – магнитные индукции соответственно в данной однородной изотропной среде и в вакууме.

Их отношение

$$\mu = \frac{B}{B_0},$$

показывающее, во сколько раз магнитная индукция в среде больше (или меньше), чем в вакууме, называют магнитной проницаемостью среды. Относительная магнитная проницаемость характеризует магнитные свойства среды, она зависит от рода вещества и температуры: $\mu \geq 0$ – величина безразмерная; для вакуума $\mu = 1$. По значению μ , различают: а) диамагнетики ($\mu < 1$), например, вода, мрамор, золото, ртуть, инертные газы; б) парамагнетики ($\mu > 1$), например, кислород, алюминий, платина, щелочные металлы; ферромагнетики ($\mu \gg 1$), например железо, кобальт, никель. Из ферромагнетиков изготавливают постоянные магниты.

Магнитная индукция \mathbf{B} , - характеризует магнитное поле с учетом среды.

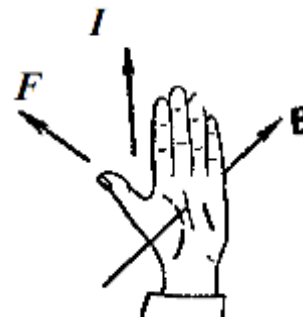
Напряженность магнитного поля. \mathbf{H} , - характеризует поле без учета среды. $[\mathbf{H}] = \text{А/м}$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H} \quad [\mathbf{B}] = \text{Тл (Тесла)}$$

$$\mu_0 - \text{магнитная постоянная. } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$$

Закон Ампера

Действие магнитного поля на проводники с током было обнаружено Г. Эрстедом и А. Ампером. Ампер подробно исследовал это явление и пришел к выводу, что **сила F , которая действует на прямолинейный проводник с током, находящийся в однородном магнитном поле, пропорциональна силе тока I в проводнике, его длине Δl , магнитной индукции B и синусу угла α между направлением тока в проводнике и вектором \vec{B} :**



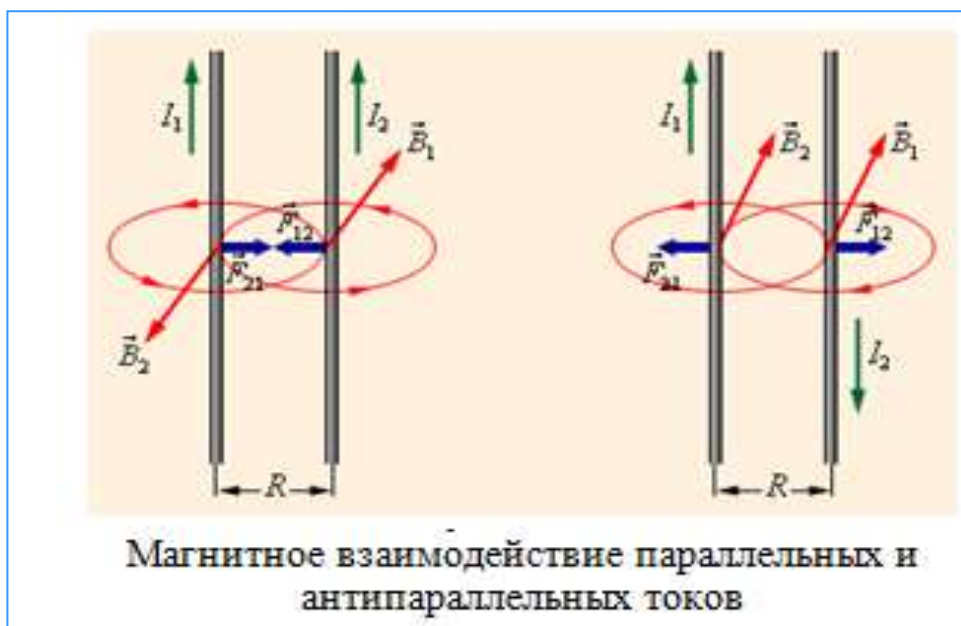
$$F = IB\Delta l \sin \alpha .$$

Это выражение носит название закона Ампера.

Закон Ампера не указывает направления силы $\Delta \vec{F}$ и поэтому не определяет ее полностью. Как показали опыты, направление силы \vec{F} можно найти по правилу левой руки: если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входили линии магнитной индукции, а четыре вытянутых пальца расположить по направлению электрического тока в проводнике, то отставленный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник со стороны поля. Это правило очень удобно, когда элемент $\Delta \vec{l}$ проводника с током перпендикулярен направлению магнитного поля. Во всех остальных случаях оно нуждается в дополнительных пояснениях.

Взаимодействие проводников с током.

Рассчитаем силу взаимодействия (на единицу длины) двух находящихся в вакууме бесконечно длинных прямых параллельных токов I_1 и I_2 , находящихся на расстоянии R друг от друга:



$$B_1 = \frac{\mu\mu_0 I_1}{2\pi R}$$

$$|\vec{F}_A| = I_2 B_1 l$$

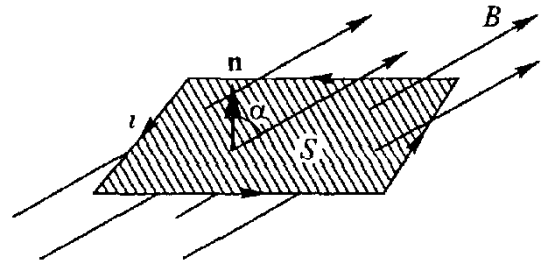
$$F_A = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi R}$$

Сила, с которой первый проводник действует на второй, пропорциональна произведению силы токов, текущих по проводникам, и обратно пропорциональна расстоянию между ними.

Магнитное взаимодействие проводников с током положено в определение **ампера** — единицы силы электрического тока, основной единицы СИ: *1 А. равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.*

Магнитный поток

Под магнитным потоком понимают поток Φ вектора магнитной индукции \mathbf{B} через какую-либо поверхность S



Физический смысл магнитного потока - количество линий магнитной индукции пронизывающих площадь S , ограниченную контуром с током.

Магнитный поток Φ , пронизывающий контур, равен произведению модуля магнитной индукции \mathbf{B} на площадь S , ограниченную этим контуром, и на косинус угла α между нормалью к плоскости контура \mathbf{n} и вектора \mathbf{B} (см. рисунок) $\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} \cdot \cos \alpha$

Магнитный поток характеризуется не только своей величиной, но и знаком, который зависит от того, какой знак имеет $\cos \alpha$. Этот знак зависит от выбора положительного направления нормали \vec{n} . Во всех электромагнитных явлениях всегда приходится рассматривать магнитный поток в связи с током, обтекающим контур, ограничивающий рассматриваемую поверхность. Поэтому положительное направление нормали естественно связать с направлением этого тока. Мы будем везде считать, что положительное направление нормали к площадке совпадает с направлением перемещения буравчика с правой нарезкой, вращаемого в направлении тока. Отсюда, в частности, следует, что магнитный поток, создаваемый каким-либо проволочным контуром с током, сквозь поверхность, ограниченную им самим, всегда положителен.

Если вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости контура, то $\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}_{\perp}$

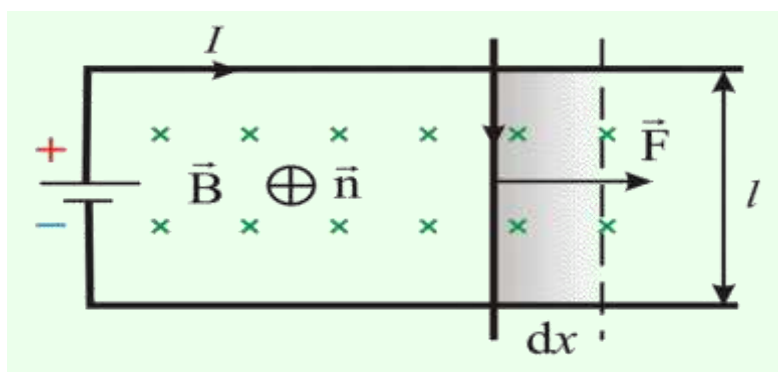
Магнитный поток через замкнутую поверхность равен нулю, так как число входящих силовых линий равно числу выходящих

1 Вб равен потоку через плоскую поверхность площадью 1 м², помещенную перпендикулярно силовым линиям однородного магнитного поля, индукция которого равна 1 Тл:

$$[\Phi] = \text{Вб (Вебер)} \quad \text{Вб} = \text{Тл} \cdot \text{м}^2$$

Работа по перемещению проводника с током

Рассмотрим контур с током, образованный неподвижными проводами и скользящей по ним подвижной перемычкой длиной l .



$$F_A = IBl$$

$$\Delta A = F_A \Delta x = IBl \Delta x = IB \Delta S = I \Delta \Phi$$

Работа, совершаемая проводником с током при перемещении его в магнитном поле, численно равна произведению силы тока на магнитный поток, пересечённый этим проводником.

Формула остаётся справедливой, если проводник любой формы движется под любым углом к линиям вектора магнитной индукции

Вопросы для самоконтроля и повторения

1. Что представляет собой магнитное поле? Какими свойствами оно обладает?
2. В чем заключалась гипотеза Ампера?
3. Что называют вектором магнитной индукции? Какой характеристикой поля он является?

4. Что называют линиями магнитной индукции? Какое направление они имеют?
5. Какие поля называют вихревыми?
6. Сформулируйте принцип суперпозиции полей.
7. Как связаны векторы напряженности и индукции магнитного поля?
8. Сформулируйте закон Ампера.
9. Расскажите о взаимодействии токов.
10. Что называют магнитным потоком? В каких единицах его выражают?
11. Чему равна работа по перемещению проводника с током в магнитном поле?

Лекция 18.

Действие магнитного поля на движущийся заряд

Сила Лоренца

Магнитное поле действует не только на проводники с током, но и на отдельные электрические заряды, движущиеся в поле. Этот вывод подтверждается целым рядом опытных фактов и, в частности, тем, что пучок свободно летящих заряженных частиц, например, электронный пучок, отклоняется магнитным полем.

Найдем выражение для силы, действующей на заряд, движущийся в магнитном поле. По закону Ампера, на элемент Δl проводника с током I , находящийся в магнитном поле, действует сила

$$F = IB\Delta l \sin \alpha .$$

Пусть по проводнику длиной Δl за время Δt проходит N одинаковых зарядов q . Это означает, что через проводник протекает ток $I = \frac{Nq}{\Delta t}$. Согласно

закону Ампера, на Nq зарядов действует сила

$$F = \frac{Nq}{\Delta t} B\Delta l \sin \alpha .$$

Сила, с которой поле действует на каждый отдельный заряд (сила Лоренца),

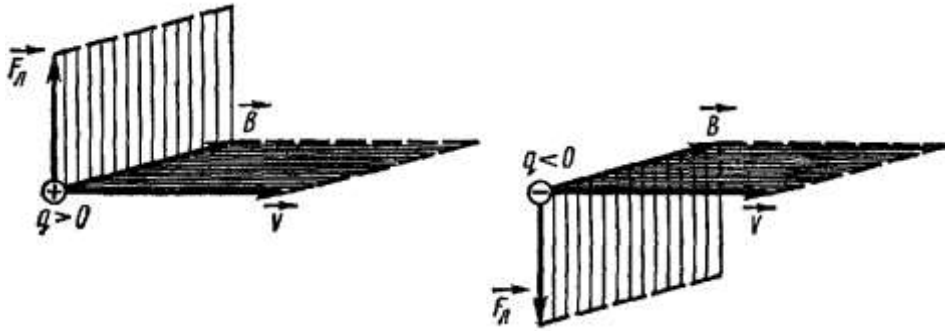
$$F_{\text{л}} = \frac{F}{N} = \frac{q}{\Delta t} B\Delta l \sin \alpha .$$

Учитывая, что $\frac{\Delta l}{\Delta t} = v$ – средняя скорость движения зарядов, получаем

$$F_{\text{л}} = qvB \sin \alpha .$$

где α – угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Взаимная ориентация векторов \vec{v} , \vec{B} и $\vec{F}_{\text{л}}$ для случая положительных зарядов ($q > 0$) и для случая отрицательных зарядов ($q < 0$) показана на рисунке.



Очевидно, что магнитное поле не действует на заряженную частицу в двух случаях: если $\vec{v} = 0$, т. е. частица неподвижна, или если $\sin \alpha = 0$ и $\vec{v} \parallel \vec{B}$, когда частица движется вдоль линий магнитного поля.

Обозначим массу движущейся частицы через m . Тогда по второму закону Ньютона частица получает ускорение \vec{a} :

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_L}{m}.$$

или с учетом выражения для силы Лоренца

$$\vec{a} = \frac{q}{m} [\vec{v} \times \vec{B}].$$

При произвольном движении вектор ускорения \vec{a} имеет две составляющие – касательное ускорение \vec{a}_k и нормальное \vec{a}_n . Анализируя последнюю формулу, мы видим, что при движении заряда в магнитном поле его ускорение \vec{a} перпендикулярно к скорости \vec{v} , т. е. всегда направлено по нормали к траектории. Это следует из того, что вектор $[\vec{v} \times \vec{B}]$, в соответствии с правилами векторного умножения, перпендикулярен к вектору \vec{v} (и, конечно, к вектору \vec{B}). Следовательно, в этом случае

$$\begin{cases} a_k = 0 \\ a_n = \frac{|q|}{m} v B \sin \alpha \end{cases}.$$

Вспомним, что изменение величины вектора скорости обусловлено составляющей ускорения $a_k = \frac{dv}{dt}$, в то время как составляющая ускорения

a_n изменяет направление вектора скорости, не меняя его величины. Следовательно, в нашем случае имеем

$$\frac{dv}{dt} = 0, \text{ или } v = \text{const}.$$

Значит, при движении заряженной частицы в постоянном магнитном поле скорость ее движения \vec{v} может изменяться лишь по направлению. Абсолютная же величина скорости v остается неизменной, а значит, не меняется и кинетическая энергия частицы:

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2} = \text{const},$$

т. е. постоянное магнитное поле не совершает работы над движущейся в нем заряженной частицей. Это может быть получено и из непосредственного рассмотрения выражения для силы \vec{F}_d , действующей на заряд, движущийся в магнитном поле. Эта сила перпендикулярна к скорости, т. е. перпендикулярна к направлению траектории частицы, и поэтому работа силы равна нулю.

Следует подчеркнуть, что неизменность величины скорости и кинетической энергии заряженной частицы в магнитном поле имеет место лишь в том случае, если это поле постоянно, не зависит от времени. Переменное магнитное поле ускоряет заряженные частицы (точнее, меняет не только направление, но и величину скорости).

Нормальное ускорение a_n всегда равно $\frac{v^2}{r}$, где r есть радиус кривизны траектории в данной точке. Тогда получим соотношение

$$\frac{|q|}{m} v B \sin \alpha = \frac{v^2}{r},$$

позволяющее определить радиус кривизны во всех точках траектории частицы

$$r = \frac{mv}{|q|B \sin \alpha}.$$

Разберем два простейших примера.

1. Заряженная частица влетает в однородное магнитное поле $\vec{B} = const$ с начальной скоростью \vec{v} , направленной перпендикулярно к вектору напряженности магнитного поля ($\vec{v} \perp \vec{B}$).

Поскольку \vec{F}_L и \vec{a} тоже перпендикулярны к \vec{B} , то в дальнейшем вектор скорости будет оставаться перпендикулярным к \vec{B} , и вся траектория будет лежать в плоскости, перпендикулярной к вектору индукции магнитного поля.

Тогда $\sin \alpha = \sin 90^\circ = 1$ и для радиуса кривизны получаем

$$r = \frac{mv}{|q|B} = const .$$

Т. е. радиус кривизны траектории остается постоянным, а сама траектория есть окружность радиуса r . Этот радиус для частиц данной природы (т. е. для данных значений m и q или для частиц с данным отношением q/m) прямо пропорционален скорости частицы v и обратно пропорционален индукции магнитного поля B . Длина окружности

$$L = 2\pi r = 2\pi \frac{mv}{|q|B}$$

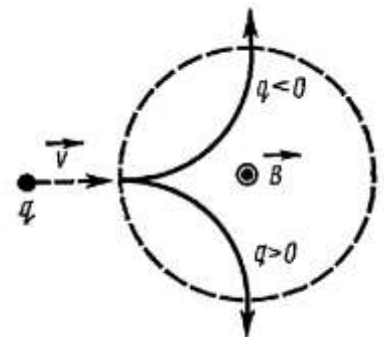
также пропорциональна скорости частицы, а период обращения ее в поле

$$T = \frac{L}{v} = 2\pi \frac{m}{|q|B}$$

зависит не от скорости v , а только от индукции магнитного поля \vec{B} , заряда q и массы m частицы.

Направления силы Лоренца \vec{F}_L и вызываемого ею отклонения заряженной частицы в магнитном поле зависят от знака ее заряда q . Если частица движется в плоскости чертежа слева направо, а магнитное поле направлено из-за чертежа перпендикулярно его плоскости, то при $q > 0$

частица отклоняется вниз, а при $q < 0$ – вверх. Таким образом, по характеру



отклонения частицы в магнитном поле можно судить о знаке ее заряда. Этим широко пользуются в исследованиях элементарных частиц.

2. Частица влетает в однородное магнитное поле $\vec{B} = const$, и направление вектора ее скорости \vec{v} составляет с линиями магнитного поля угол α , отличный от 90° . Мы можем разложить \vec{v} на две составляющие – перпендикулярную (\vec{v}_\perp) и параллельную (\vec{v}_\parallel) полю,

как показано на рисунке. Величины этих составляющих равны

$$v_\parallel = v \cos \alpha \text{ и } v_\perp = v \sin \alpha.$$

Сила, действующая на частицу,

$$F_n = |q|Bv \sin \alpha = |q|Bv_\perp,$$

лежит в плоскости, перпендикулярной к \vec{B} , определяется величиной вектора \vec{v}_\perp и изменяет его направление.

Движение частицы при этом можно представлять как сумму двух независимых движений. Одно из них происходит в направлении \vec{B} , а другое – в плоскости, перпендикулярной к \vec{B} , в которой действует сила \vec{F}_n . Испытывая эту силу, частица будет вращаться по окружности радиуса

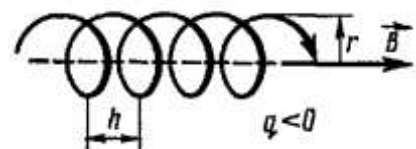
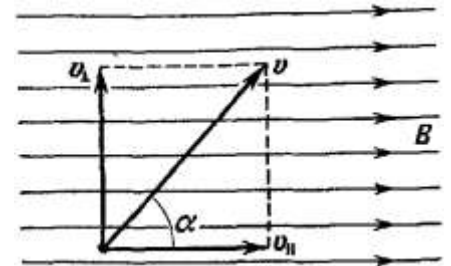
$$r = \frac{mv_\perp}{|q|B} = \frac{mv \sin \alpha}{|q|B}$$

в плоскости, перпендикулярной к вектору напряженности магнитного поля, и

будет совершать один оборот за время $T = \frac{2\pi m}{|q|B}$.

С другой стороны, поскольку $\vec{F}_n \perp \vec{B}$ и $\vec{F}_n \perp \vec{v}_\parallel$, то частица будет двигаться вдоль линий магнитного поля с постоянной поступательной скоростью $\vec{v}_\parallel = const$. Вследствие наложения этих двух движений –

поступательного вдоль линий поля и вращательного в перпендикулярной к ним плоскости – частица будет двигаться по

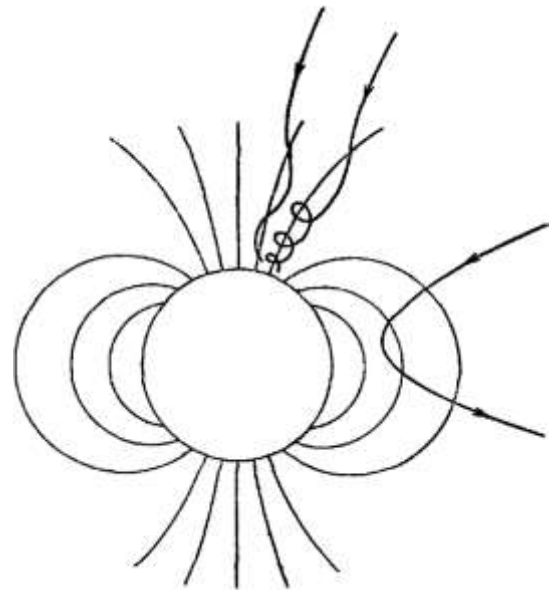


винтовой линии с шагом винта

$$h = T v_{\parallel} = \frac{2\pi m}{|q|B} v \cos \alpha.$$

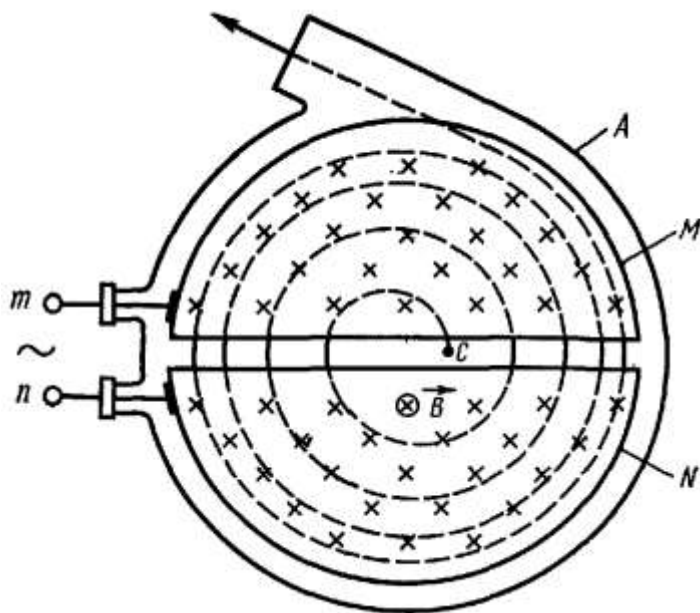
Рассмотренные простейшие примеры показывают, что заряженные частицы, влетающие в постоянное магнитное поле, изменяют направление своего движения и начинают «навиваться» на линии вектора \vec{B} . Этим свойством пользуются в некоторых приборах, чтобы удержать пучки заряженных частиц от расплывания. Если частица движется точно вдоль линии \vec{B} , то магнитное поле не оказывает на нее никакого воздействия ($\vec{v} \parallel \vec{B}$ и $\vec{F}_a = 0$). Если же частица по каким-либо причинам получит составляющую скорости \vec{v}_{\perp} , перпендикулярную к линиям поля, то она все равно не уйдет далеко в сторону от заданной траектории и будет двигаться по винтовой линии, навиваясь на эту траекторию.

Из мирового пространства на Землю приходят потоки заряженных частиц большой энергии – космические лучи. Кроме того, на Землю падает поток заряженных частиц, испускаемых Солнцем. При приближении к земной поверхности эти частицы начинают испытывать действие магнитного поля Земли. На рисунке показано изменение их траекторий. Те из них, которые направляются к магнитным полюсам Земли, будут двигаться почти вдоль линий земного магнитного поля и навиваться на последние. Так как по мере приближения к земной поверхности индукция магнитного поля B возрастает, то радиус окружности винтовой линии будет уменьшаться.



Заряженные частицы, подходящие к Земле вблизи экваториальной плоскости, направлены почти перпендикулярно к линиям магнитного поля и

отклоняются в сторону от своего первоначального направления. Лишь самые быстрые из них ($R \sim v$) смогут пройти до поверхности Земли. Такова причина так называемого широтного эффекта, заключающегося в том, что интенсивность космических лучей, доходящих до Земли вблизи экватора, заметно меньше, чем в более высоких широтах. Этим же обстоятельством объясняется и то, что свечение в верхних слоях атмосферы, вызываемое корпускулярным излучением Солнца (солнечным ветром), наблюдается главным образом в полярных областях (полярные сияния).



Независимость периода обращения T от скорости частицы в однородном магнитном поле была использована в ускорителе заряженных частиц, названном циклотроном, применяемом для исследований атомных ядер.

Смотрим видео

Циклотрон состоит из двух металлических дуантов M и N , представляющих собой две половины невысокой тонкостенной цилиндрической коробки, разделенные узкой щелью. Дуанты заключены в плоскую замкнутую камеру A , помещенную между полюсами сильного электромагнита. Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости чертежа. Дуанты с помощью электродов m и n присоединены к полюсам электрического генератора, создающего в щели между ними переменное электрическое поле. Введем в точку C положительный ион в тот момент, когда электрическое поле между дуантами максимально и направлено снизу вверх. Под действием электрического поля ион начнет равноускоренно

перемещаться в плоскости чертежа снизу вверх. Как только он войдет в дуант M , ускоряющее действие электрического поля прекратится, так как металлические стенки дуанта практически полностью экранируют его внутреннюю полость от электрического поля в зазоре. Внутри дуанта M ион под действием магнитного поля опишет полуокружность радиуса $r = \frac{mv}{|q|B}$. К тому моменту времени, когда ион, двигаясь в дуанте M , будет подходить к зазору между дуантами, направление электрического поля изменится на противоположное первоначальному и поле снова будет ускорять движение иона. Затем внутри дуанта N ион опишет полуокружность но уже несколько большего радиуса, соответствующего возросшей скорости. К моменту вылета иона в зазор электрическое поле снова изменит свое направление и будет ускорять движение иона. В результате многократного ускорения иона электрическим полем его кинетическая энергия может стать очень большой.

Для уменьшения вероятности торможения ионов из-за столкновения с молекулами воздуха в камере A создается высокий вакуум.

Описанный процесс непрерывного ускорения ионов возможен только в том случае, если движение иона и изменение электрического поля в зазоре будут происходить строго синхронно. В противном случае ион при прохождении через зазор будет то ускоряться, то замедляться. Таким образом, для нормальной работы циклотрона необходимо, чтобы период T_0 колебаний электрического поля совпадал с периодом T обращения иона:

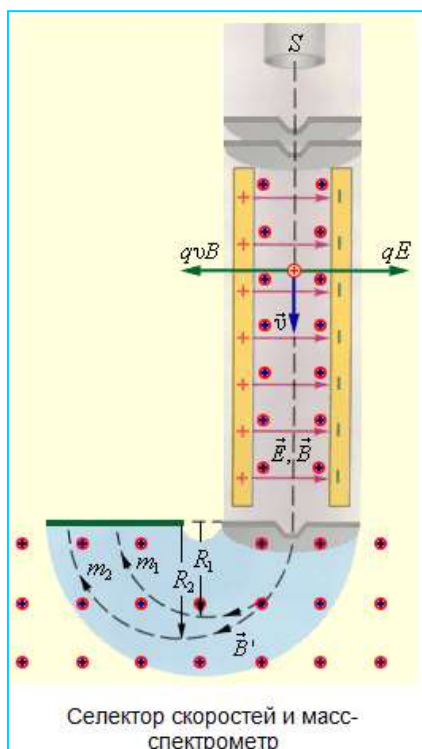
$$T_0 = T = \frac{2\pi m}{|q|B}.$$

Масс-спектрометры

Однородные магнитные поля используются во многих приборах и, в частности, в **масс-спектрометрах** – устройствах, с помощью которых можно измерять массы заряженных частиц – ионов или ядер различных атомов.

Масс-спектрометры используются для разделения изотопов, то есть ядер атомов с одинаковым зарядом, но разными массами (например, ^{20}Ne и ^{22}Ne).

Простейший масс-спектрометр показан на рисунке. Ионы, вылетающие из источника S , проходят через несколько небольших отверстий, формирующих узкий пучок.



Затем они попадают в **селектор скоростей**, в котором частицы движутся **в скрещенных** однородных электрическом и магнитном полях.

Электрическое поле создается между пластинами плоского конденсатора, магнитное поле – в зазоре между полюсами электромагнита. Начальная скорость \mathbf{v} заряженных частиц направлена перпендикулярно векторам \mathbf{E} и \mathbf{B} .

На частицу, движущуюся в скрещенных электрическом и магнитном полях, действуют электрическая сила Кулона и магнитная сила Лоренца.

При условии $\mathbf{E} = \mathbf{vB}$ эти силы **точно уравнивают друг друга**. Если это условие выполняется, частица будет двигаться **равномерно и**

прямолинейно и, пролетев через конденсатор, пройдет через отверстие в экране. При заданных значениях электрического и магнитного полей **селектор выделит** частицы, движущиеся со скоростью $\mathbf{v} = \mathbf{E}/\mathbf{B}$.

Далее частицы с одним и тем же значением скорости попадают в камеру масс-спектрометра, в которой создано однородное магнитное поле \mathbf{B}' .

Частицы движутся в камере в плоскости, **перпендикулярной** магнитному полю, под действием силы Лоренца.

Траектории частиц представляют собой **окружности радиусов:**

$$R = \frac{mv}{|q|B'}$$

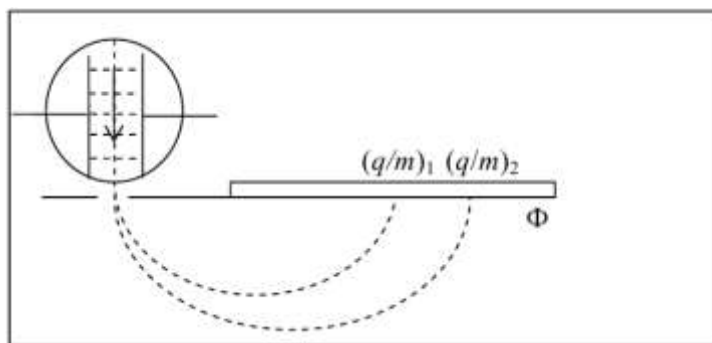
Измеряя радиусы траекторий R при известных значениях v и B' можно определить отношение q/m – удельный заряд заряженной частицы.

В случае изотопов ($q_1 = q_2$) масс-спектрометр позволяет разделить частицы с разными массами.

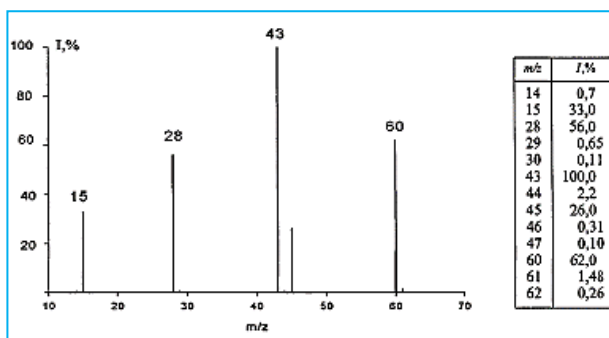
Радиус кривизны траектории R пропорционален импульсу $p = mv$. Поэтому, при прочих равных условиях сильнее будут закручиваться более легкие частицы, слабее – более тяжелые.

Вывод: частицы можно в пространстве разделить по массе, т. е. получить массовый спектр.

Современные масс-спектрометры позволяют измерять массы заряженных частиц с точностью выше 10^{-4} .



Представление масс-спектра в графической и табличной форме



Вопросы для самоконтроля и повторения:

1. Какая сила действует на электрический заряд, движущийся в магнитном поле? Чему она равна и как направлена?
2. Как движется заряженная частица в магнитном поле, если начальная скорость частицы перпендикулярна линиям магнитной индукции?
3. Почему сила Лоренца меняет направление скорости, но не меняет ее модуль?
4. Может ли магнитное поле изменить величину скорости заряженной частицы?
5. Каков характер движения заряженной частицы, влетающей в однородное магнитное поле под некоторым углом к ее линиям?
6. Для чего предназначен циклотрон и как он действует?

Примеры задач

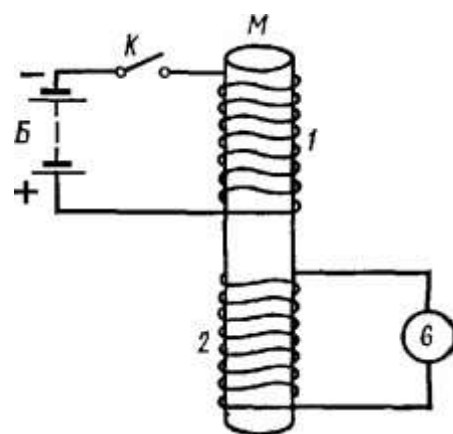
Лекция 19

Явление электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции.

Опыты Фарадея по индуцированию электрического тока.

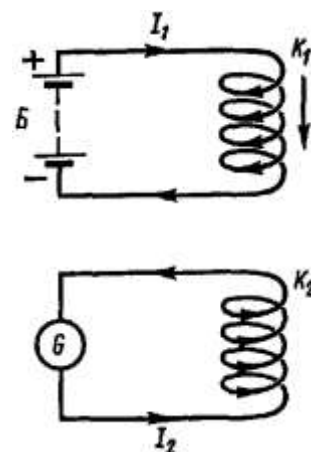
Мы знаем, магнитное поле создается электрическим током. Долгое время было непонятно, имеется ли обратная связь и можно ли возбудить ток в контуре с помощью магнитного поля.

Фарадей дал положительный ответ на этот вопрос, осуществив опыт, имевший огромное значение для дальнейшего развития физики и техники. Принципиальная схема установки Фарадея приведена на рисунке. На деревянный стержень M намотаны два длинных куска изолированного медного провода. Концы одного из них через ключ K присоединены к батарее гальванических элементов B , а концы другого – к гальванометру G . При неизменной силе тока в первой цепи гальванометр показывал отсутствие тока во второй. Однако при замыкании и размыкании ключа K стрелка гальванометра слегка отклонялась и затем быстро возвращалась в положение равновесия, что свидетельствовало о возникновении в проводнике 2 кратковременного тока, названного Фарадеем индукционным током. Направления индукционных токов при замыкании и размыкании ключа K были прямо противоположными. Заменяв ключ K реостатом, Фарадей заметил, что при изменении силы тока I_1 в первом проводнике во втором по-прежнему наводится индукционный ток, направление которого зависит от того, уменьшается I_1 или увеличивается.



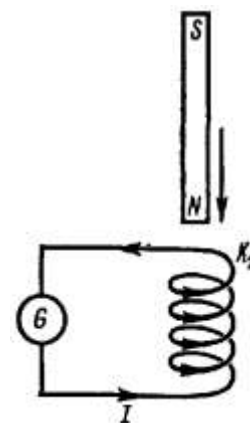
Изменение тока I_1 сопровождалось одновременным изменением его магнитного поля. Поэтому неясно было, что же является причиной возникновения индукционного тока: изменение тока I_1 или его магнитного

поля в той части пространства, где находится второй проводник? Ответ на этот вопрос был получен Фарадеем с помощью следующих опытов. Надо взять две катушки, одна из которых, K_1 замыкается на батарею B ; по этой катушке идет постоянный ток I_1 . Катушка K_2 замкнута на гальванометр. Если катушку K_1 приближать к K_2 , в последней возникает индукционный ток I_2 , направление которого показано на рисунке. При удалении катушки K_1 от K_2 ток I_2 также возникает, но имеет противоположное направление.



Аналогичная картина наблюдается при удалении или приближении катушки K_2 к неподвижной катушке K_1 . Наконец, ток I_2 отсутствует, когда взаимное расположение катушек не изменяется.

Опыты Фарадея ясно показали, что причиной возникновения индукционного тока I_2 является изменение магнитного поля, пронизывающего катушку K_2 . Чтобы окончательно убедиться в этом, Фарадей провел еще один опыт. Катушка с током была заменена длинным полосовым магнитом. При перемещении магнита вдоль оси катушки K_2 было обнаружено возникновение в ней индукционного тока, направление которого зависело от того, каким полюсом был обращен к катушке магнит и удалялся он от нее или приближался к ней. Результаты опыта полностью подтвердили сделанный выше вывод о причине возникновения индукционного тока.



Открытое Фарадеем явление получило название электромагнитной индукции.

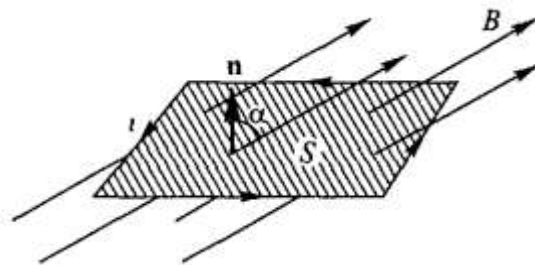
Возникновение тока в замкнутом контуре, обусловленное изменением магнитного поля называется электромагнитной индукцией.

Ток, возникающий в контуре, называется индукционным.

Магнитный поток.

Прежде чем двигаться дальше, вспомним понятие магнитного потока.

Рассмотрим сначала плоскую площадку S , находящуюся в однородном магнитном поле с индукцией B . Магнитным потоком или потоком вектора магнитной индукции сквозь площадку S называют величину



$$\Phi = BS \cos \alpha,$$

где α – угол между направлением нормали \vec{n} к площадке и направлением индукции \vec{B} . Магнитный поток есть скалярная величина, равная полному числу линий магнитной индукции, проходящих через данную поверхность.

Магнитный поток характеризуется не только своей величиной, но и знаком, который зависит от того, какой знак имеет $\cos \alpha$. Этот знак зависит от выбора положительного направления нормали \vec{n} . Во всех электромагнитных явлениях всегда приходится рассматривать магнитный поток в связи с током, обтекающим контур, ограничивающий рассматриваемую поверхность. Поэтому положительное направление нормали естественно связать с направлением этого тока. Мы будем везде считать, что положительное направление нормали к площадке совпадает с направлением перемещения буравчика с правой нарезкой, вращаемого в направлении тока. Отсюда, в частности, следует, что магнитный поток, создаваемый каким-либо проволочным контуром с током, сквозь поверхность, ограниченную им самим, всегда положителен.

Магнитный поток выражается в системе СИ в веберах (Вб).

Основной закон электромагнитной индукции.

Электрический ток появляется в том случае, если на свободные заряды в проводнике действуют сторонние силы.

Ток проводимости в замкнутой цепи может возникнуть только под действием стороннего электрического поля. Следовательно, в замкнутом контуре, находящемся в переменном магнитном поле, появляется так

называемое индуктированное электрическое поле. Энергетической мерой этого поля служит электродвижущая сила электромагнитной индукции E_i .

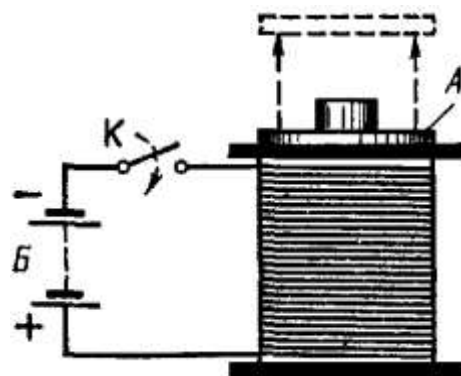
Дальнейшие исследования индукционного тока в контурах различной формы и размеров показали, что ЭДС электромагнитной индукции E_i в контуре пропорциональна скорости изменения магнитного потока Φ сквозь поверхность, ограниченную этим контур (закон Фарадея):

$$E_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Профессор Петербургского университета Ленц исследовал связь между направлением индукционного тока и характером вызвавшего его изменения магнитного потока. Он установил следующее правило (**правило Ленца**): **при всяком изменении магнитного потока сквозь поверхность, натянутую на замкнутый контур, в последнем возникает индукционный ток такого направления, что его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока.**

При усилении магнитного потока магнитное поле индукционного тока его ослабляет и наоборот.

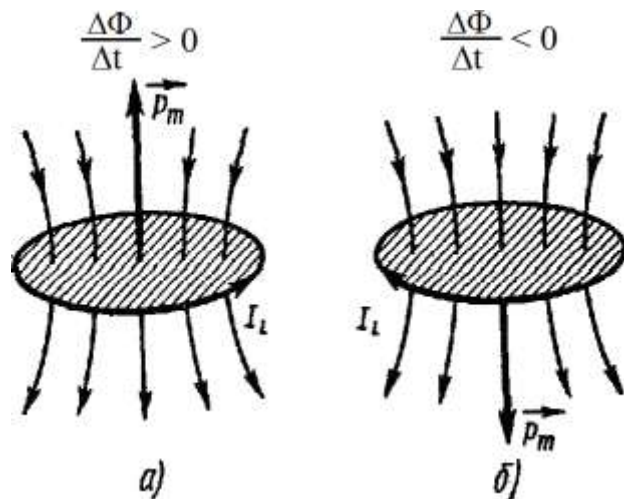
Интересной иллюстрацией закона Ленца служит следующий опыт. На вертикальный железный сердечник катушки с большим числом витков провода свободно надето алюминиевое кольцо A . Катушку можно включить в цепь аккумуляторной батареи B с помощью ключа K . При замыкании цепи катушки кольцо подскакивает вверх и падает на стол рядом с ней. Чтобы вновь надеть это кольцо на сердечник катушки, находящейся под током, требуется приложить некоторое усилие. В момент выключения тока кольцо, надетое на сердечник, прижимается к катушке. Такое поведение кольца объясняется возникновением в нем индукционного тока. Если ток в катушке отсутствует, то магнитный поток сквозь поверхность, ограниченную кольцом



(магнитный поток, сцепленный с кольцом), равен нулю. При замыкании цепи катушки магнитный поток, сцепленный с кольцом, резко возрастает. В кольце возникает индукционный ток, магнитное поле которого, согласно закону Ленца, должно быть противоположно по направлению магнитному полю тока в катушке. Поэтому индукционный ток в кольце направлен противоположно току в витках катушки. Между такими токами действует сила взаимного отталкивания, и кольцо подбрасывается вверх. При размыкании цепи катушки магнитный поток, сцепленный с кольцом, быстро уменьшается. Теперь в кольце возникает индукционный ток, совпадающий по направлению с током в катушке. Поэтому кольцо притягивается к ней.

Направления индукционного тока I_i при увеличении и уменьшении магнитного потока, сцепленного с кольцом, показаны на рисунке.

Условимся считать ЭДС электромагнитной индукции в контуре положительной, если магнитный момент \vec{p}_m



соответствующего ей индукционного тока образует острый угол с линиями магнитной индукции того поля, которое наводит этот ток. Тогда в случае, изображенном на рисунке *a*, $E_i < 0$, а в случае показанном на рисунке *б*, $E_i > 0$.

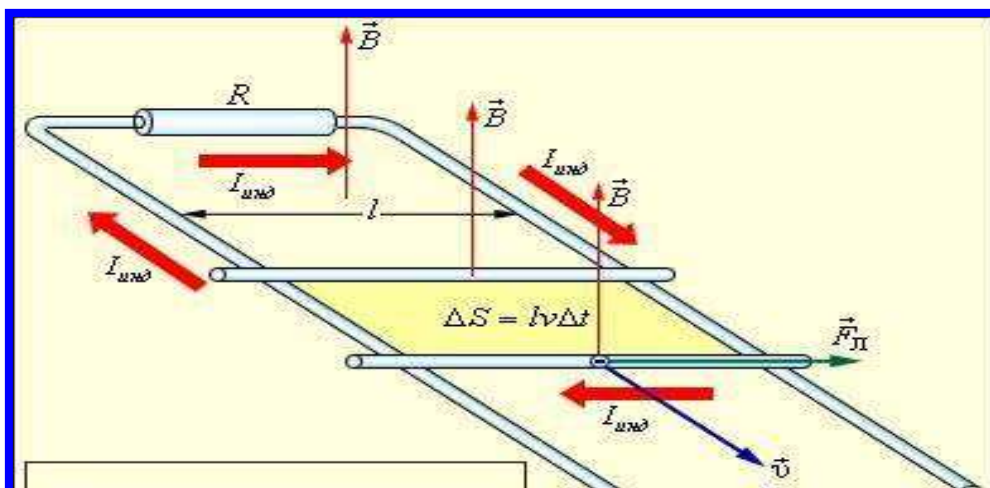
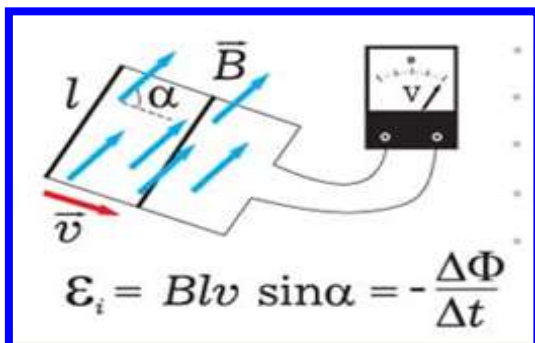
Объединяя закон Фарадея и правило Ленца, получим формулу

$$E_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

являющуюся математическим выражением основного закона электромагнитной индукции: электродвижущая сила электромагнитной индукции в замкнутом контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, натянутую на контур.

ЭДС индукции в движущемся проводнике

При движении проводника в магнитном поле со скоростью v вместе с ним с той же скоростью движутся «+» и «-» заряды, находящиеся в проводнике. На них в магнитном поле в противоположные стороны действует сила Лоренца, что приводит к перераспределению зарядов - возникает ЭДС.



Вихревое электрическое поле.

Переменное магнитное поле создает вихревое электрическое поле, которое возбуждает в замкнутом проводнике индукционный ток. Линии напряженности электрического поля замкнутые, поэтому электрическое поле – вихревое. Линии напряженности всегда перпендикулярны линиям магнитной индукции. Чем быстрее меняется индукция магнитного поля, тем больше напряженность электрического поля. Направление линий напряженности электрического поля совпадает с направлением индукционного тока.

Вихревые токи.

Индукционные токи, которые возникают в сплошных металлических телах, находящихся в переменном магнитном поле, и замыкаются внутри этих тел, называются вихревыми токами или токи Фуко.

Вихревые токи используют: в измерительных приборах для успокоения колебаний стрелки, в индукционных печах для закалки деталей, плавки металлов, изготовления сплавов. Для ослабления вредного действия вихревых токов в теле: тела, которые находятся в переменном магнитном поле, делают из отдельных изолированных листов.

Самоиндукция. Индуктивность

Электрический ток I , текущий в любом контуре, создает пронизывающий этот контур магнитный поток Φ . При изменениях I будет изменяться также Φ и, следовательно, в контуре будет индуцироваться ЭДС. Это явление называется самоиндукцией. Магнитная индукция B пропорциональна силе тока, вызвавшего поле. Отсюда вытекает, что ток в контуре I и создаваемый им полный магнитный поток через контур Φ друг другу пропорциональны:

$$\Phi = LI.$$

Коэффициент пропорциональности L между силой тока и полным магнитным потоком называется индуктивностью контура.

Линейная зависимость Φ от I имеет место лишь в том случае, если среда, которой окружен контур, не является ферромагнетиком.

Из сказанного следует, что индуктивность L зависит от геометрии контура (т. е. его формы и размеров) и от магнитных свойств (от μ) окружающей контур среды. Например, для соленоида длиной l и площадью сечения витка S , находящегося в вакууме или воздухе,

$$L = \mu\mu_0 n^2 l S = \mu\mu_0 n^2 V,$$

где μ_0 – магнитная постоянная, n – число витков, приходящихся на единицу длины, $V = lS$ – объем соленоида. Заменяв n через N/l (N – общее число витков соленоида) получим

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

За единицу индуктивности в СИ принимается индуктивность такого проводника, у которого при силе тока в нем в 1 А возникает полный поток Φ , равный 1 Вб. Эту единицу называют *генри* (Гн).

Как следует из опытов, индуктивность всякого контура зависит от свойств среды, в которой он находится. Например, если в катушку поместить железный сердечник, то сила тока самоиндукции возрастет во много раз. Это свидетельствует о том, что увеличилась индуктивность катушки.

Величину, равную отношению индуктивности L контура в однородной среде к индуктивности L_0 контура в вакууме, называют магнитной проницаемостью среды:

$$\mu = \frac{L}{L_0}.$$

Магнитная проницаемость, характеризующая магнитные свойства вещества, – величина безразмерная.

При изменениях силы тока в контуре возникает ЭДС самоиндукции E_s , равная

$$E_s = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Если L при изменениях силы тока остается постоянной (что, как уже отмечалось, возможно лишь при отсутствии ферромагнетиков), выражение для E_s имеет вид

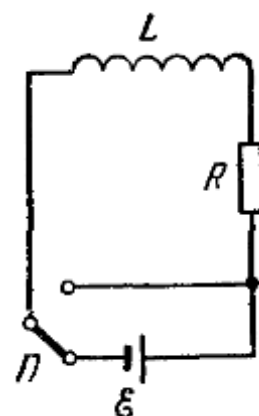
$$E_s = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Данное соотношение дает возможность определить индуктивность L как коэффициент пропорциональности между скоростью изменения силы

тока в контуре и возникающей вследствие этого ЭДС самоиндукции. Однако такое определение правильно лишь в случае, когда $L = \text{const}$. В этом случае изменение силы тока со скоростью 1 А/сек в проводнике с $L = 1$ Гн приводит к возникновению $E_s = 1$ В.

Примером, иллюстрирующим явление самоиндукции, является ток при замыкании и размыкании цепи.

По правилу Ленца дополнительные токи, возникающие в проводниках вследствие самоиндукции, всегда направлены так, чтобы воспрепятствовать изменениям тока, текущего в цепи. Это приводит к тому, что установление тока при замыкании цепи и убывание тока при размыкании цепи происходит не мгновенно, а постепенно.



После отключения источника ЭДС сила тока в цепи не обращается мгновенно в нуль, а убывает по экспоненциальному закону и чем больше отношение $\frac{R}{L}$, т. е. чем больше сопротивление цепи и меньше ее индуктивность, тем быстрее происходит убывание тока.

При включении источника ЭДС сила тока в цепи не возрастает мгновенно до установившегося значения, а растет по экспоненциальному закону и чем больше отношение $\frac{R}{L}$, т. е. чем больше сопротивление цепи и меньше ее индуктивность, тем круче происходит нарастание тока.

Из сказанного следует важный практический вывод: контур, содержащий индуктивность, нельзя резко размыкать. Если он рассчитан на рабочее напряжение E , то при резком размыкании возникающие в нем большие E_s могут привести к пробое изоляции и порче электроприборов. Сопротивление в такой контур надо вводить постепенно, с тем, чтобы E_s не превысила дозволённых значений. Опасным может быть и резкое

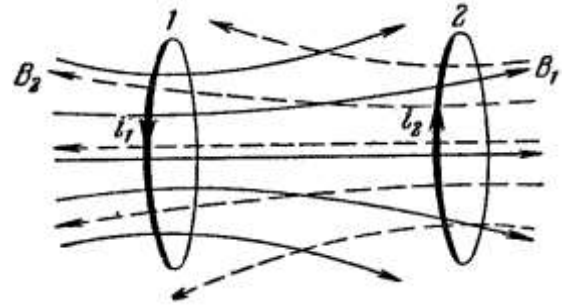
включение E , что может вызвать на отдельных участках контура недопустимо большие E_s .

Взаимная индукция

Рассмотрим систему, состоящую из двух контуров 1 и 2, расположенных друг относительно друга не очень далеко. Если в первом контуре течет ток силы I_1 , он создает через другой контур пропорциональный I_1 поток

$$\Phi_2 = L_{21}I_1$$

(поле, создающее этот поток, изображено на рисунке сплошными линиями).



При изменениях тока I_1 во втором контуре индуцируется ЭДС

$$E_{i2} = -L_{21} \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$$

Аналогично, при протекании во втором контуре тока силы I_2 возникает связанный с первым контуром поток

$$\Phi_1 = L_{12}I_2$$

(поле, создающее этот поток, изображено пунктирными линиями).

При изменениях тока I_2 в контуре 1 индуцируется ЭДС

$$E_{i1} = -L_{12} \frac{\Delta I_2}{\Delta t}$$

Контур 1 и 2 называются связанными, а явление возникновения ЭДС в одном из контуров при изменениях силы тока в другом называется взаимной индукцией.

Коэффициенты пропорциональности L_{12} и L_{21} называются взаимной индуктивностью (или коэффициентом взаимной индукции) контуров.

Эти коэффициенты всегда равны друг другу:

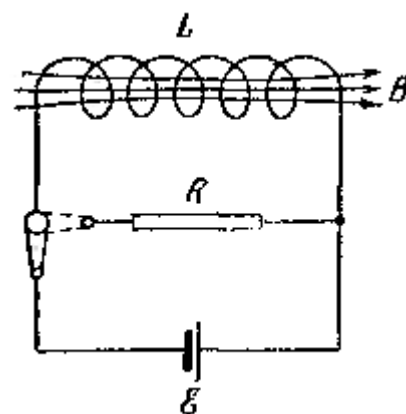
$$L_{12} = L_{21}.$$

Взаимная индуктивность L_{12} зависит от формы, размеров и взаимного расположения контуров, а также от магнитной проницаемости, окружающей контуры среды. Измеряется L_{12} в тех же единицах, что и индуктивность L .

На явлении взаимной индукции основано действие трансформатора – устройства, предназначенного для преобразования напряжения и силы переменного тока.

Энергия магнитного поля

Рассмотрим цепь, изображенную на рисунке. Сначала замкнем соленоид L на батарею E ; в нем установится ток I , который обусловит магнитное поле, сцепленное с витками соленоида. Если, отключив соленоид от батареи, замкнуть его через сопротивление R , то в образовавшейся цепи будет некоторое время течь постепенно убывающий ток, подчиняющийся закону Ома для полной цепи



$$I = E_s / R$$

где $E_s = -L \frac{dI}{dt}$ – ЭДС самоиндукции (предполагаем, что проводники с током находятся в неферромагнитной однородной и изотропной среде, сопротивлением соленоида пренебрегаем).

Таким образом

$$E_s = IR.$$

Умножим обе части данного выражения на $I \Delta t$:

$$E_s I \Delta t = I^2 R \Delta t.$$

Правая часть равенства представляет собой количество теплоты, выделяемое в проводнике при протекании в нем тока.

Левая часть данного равенства представляет собой элементарную работу, совершаемую током за время Δt , обусловленную индукционными явлениями. Полная работа, совершаемая в цепи за все время, в течение

которого происходит исчезновение магнитного поля, равная сумме элементарных работ, есть:

$$A = \frac{LI^2}{2}.$$

Данная работа идет на приращение внутренней энергии проводников, т. е. на их нагревание. Совершение этой работы сопровождается исчезновением магнитного поля, которое первоначально существовало в окружающем соленоид пространстве. Поскольку никаких других изменений в окружающих электрическую цепь телах не происходит, остается заключить, что магнитное поле является носителем энергии, за счет которой и совершается данная работа. **Таким образом, мы приходим к выводу, что проводник с индуктивностью L , по которому течет ток I , обладает энергией**

$$W = \frac{LI^2}{2},$$

которая локализована в возбуждаемом током магнитном поле.

Выразим энергию магнитного поля через величины, характеризующие само поле. В случае бесконечного соленоида

$$L = \mu\mu_0 n^2 V, \quad B = \mu\mu_0 n I,$$

откуда

$$I = \frac{B}{\mu\mu_0 n}.$$

Подставляя эти значения L и I в выражение для энергии и производя преобразования, получим

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

Магнитное поле бесконечно длинного соленоида однородно и отлично от нуля только внутри соленоида. Следовательно, энергия заключена в пределах соленоида и распределена по его объему с постоянной плотностью

w , которую можно получить, разделив W на V . Произведя это деление, получим

$$w = \frac{B^2}{2\mu_0}.$$

Полученное выражение для плотности энергии магнитного поля имеет вид, аналогичный выражению для плотности энергии электрического поля, с тем лишь отличием, что электрические величины в нем заменены соответствующими магнитными.

Вопросы для самоконтроля и повторения:

1. В чем состоит явление электромагнитной индукции? Опишите опыты Фарадея.
2. Что называется магнитным потоком?
3. Сформулируйте закон Фарадея и правило Ленца для электромагнитной индукции. Проиллюстрируйте их примерами.
4. Как определяется направление индукционного тока?
5. Сформулируйте основной закон электромагнитной индукции.
6. В чем состоит явление самоиндукции?
7. Что называется индуктивностью проводящего контура?
8. От чего зависят индуктивность проводящего контура и каков ее физический смысл?
9. Напишите выражение для ЭДС самоиндукции.
10. В чем состоит явление взаимной индукции?
12. Напишите выражения для ЭДС взаимной индукции.
13. Что называется взаимной индуктивностью двух контуров? От чего она зависит и каков ее физический смысл?
14. Приведите выражение для объемной плотности энергии магнитного поля.
15. Как распределена энергия магнитного поля соленоида в пространстве?

16. Чем создаётся вихревое электрическое поле?
17. Чем отличается электростатическое электрическое поле от вихревого эл.п.?
18. Что называется вихревыми токами? Где их используют?
19. Что делают с веществами, чтобы в них не возникали вихревые токи?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Дмитриева, В. Ф. Физика для профессий и специальностей технического профиля: учебник для использования в учебном процессе образовательных учреждений СПО на базе основного общего образования с получением среднего общего образования / В. Ф. Дмитриева ; В. Ф. Дмитриева. – 7-е изд., испр. и доп. – Москва: Академия, 2020. – 496 с. – (Профессиональное образование). – ISBN 9785446889730. – URL: <https://www.academia-moscow.ru/catalogue/4831/413933/>. – Текст: электронный.

Дополнительная литература

1. Дмитриева, В. Ф. Физика для профессий и специальностей технического профиля. Сборник задач: учебное пособие для использования в учебном процессе образовательных учреждений СПО на базе основного общего образования с получением среднего общего образования / В. Ф. Дмитриева; В. Ф. Дмитриева. – 4-е изд., стер. – Москва: Академия, 2019. – 256 с. – (Профессиональное образование). – ISBN 9785446886579. – URL: <https://www.academia-moscow.ru/catalogue/4831/418069/>. – Текст: электронный.

2. Дмитриева, В. Ф. Физика для профессий и специальностей технического профиля. Контрольные материалы: учебное пособие для использования в учебном процессе образовательных учреждений СПО на базе основного общего образования с получением среднего общего образования / В. Ф. Дмитриева, Л.И. Васильев; В. Ф. Дмитриева, Л.И. Васильев. – Москва: Академия, 2019. – 112 с. – (Профессиональное образование). – ISBN 9785446883202. – URL: <https://www.academia-moscow.ru/catalogue/4831/405727/>. – Текст: электронный.

3. Дмитриева, В. Ф. Физика для профессий и специальностей технического профиля. Лабораторный практикум: учебное пособие для использования в учебном процессе образовательных учреждений СПО на базе основного общего образования с получением среднего общего образования / В. Ф. Дмитриева, А.В. Коржуев, О.В. Муртазина; В. Ф. Дмитриева, А.В. Коржуев, О.В. Муртазина. – 5-е изд., стер. – Москва: Академия, 2019. – 160 с. – (Профессиональное образование). – ISBN 9785446883196. – URL: <https://www.academia-moscow.ru/catalogue/4831/413933/>. – Текст: электронный.

4. Айзензон, А. Е. Физика: учебник и практикум для среднего профессионального образования / А. Е. Айзензон. — Москва: Издательство Юрайт, 2020. — 335 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-00795-4. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/449185> (дата обращения: 30.01.2020).

5. Горлач, В. В. Физика. Задачи, тесты. Методы решения: учебное пособие для среднего профессионального образования / В. В. Горлач. — Москва: Издательство Юрайт, 2020. — 301 с. — (Профессиональное образование).

образование). — ISBN 978-5-534-08112-1. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/449119> (дата обращения: 30.01.2020).

6. Горлач, В. В. Физика: учебное пособие для среднего профессионального образования / В. В. Горлач. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2020. — 215 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-09366-7. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/449062> (дата обращения: 30.01.2020).

7. Трофимова, Т. И. Руководство к решению задач по физике: учебное пособие для среднего профессионального образования / Т. И. Трофимова. — 3-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 265 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-9916-7003-6. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/426398> (дата обращения: 30.01.2020).